



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA



Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências

Teoria quântica de campos
pelas trilhas da
eletrodinâmica quântica no Brasil, 1948-1980:
as contribuições dos físicos
J. Leite Lopes, T. Maris e J. A. Swieca

Walker Antonio Lins de Santana

Salvador - Bahia - Brasil

Setembro de 2019

Walker Antonio Lins de Santana

Teoria quântica de campos
pelas trilhas da
eletrodinâmica quântica no Brasil, 1948-1980:
as contribuições dos físicos
J. Leite Lopes, T. Maris e J. A. Swieca

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências da Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana para obtenção do título de Doutor em Ensino, Filosofia e História das Ciências.

Orientador: Osvaldo Frota Pessoa Junior.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Lins, Walker Antonio Lins de Santana
Teoria quântica de campos pelas trilhas da
eletrodinâmica quântica no Brasil, 1948-1980: as
contribuições dos físicos J. Leite Lopes, T. Maris e J.
A. Swieca / Walker Antonio Lins de Santana Lins. --
Salvador, BA, 2019.
198 f. : il

Orientador: Osvaldo F. Pessoa Junior Pessoa Jr..
Tese (Doutorado - Programa de Pós-graduação em
Ensino, Filosofia e História das Ciências) --
Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física,
2019.

1. Teoria Quântica de Campos no Brasil. 2.
Eletrodinâmica Quântica no Brasil. 3. José Leite Lopes.
4. Theodor A. Johannes Maris. 5. Jorge André Swieca.
I. Pessoa Jr., Osvaldo F. Pessoa Junior. II. Título.

WALKER ANTONIO LINS DE SANTANA

**Teoria quântica de campos
pelas trilhas da eletrodinâmica quântica no Brasil, 1948-1980:
as contribuições dos físicos J. Leite Lopes, T. Maris e J. A. Swieca**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências da Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana para obtenção do título de Doutor em Ensino, Filosofia e História das Ciências.

Salvador, 23 de setembro de 2019

Banca Examinadora

Prof. Dr. Osvaldo Frota Pessoa Junior – USP

Prof. Dr. Alexandre Leite Gadelha – UFBA

Prof. Dr. Gustavo Rodrigues Rocha – UEFS

Prof. Dr. José Fernando Moura Rocha – UFBA

Prof. Dr. Thiago Hartz Maia – UFRJ

Dedico este trabalho:

- A Waldelino Barbosa de Santana (*in memoriam*) e Maria Waldemira Lins de Santana, meus genitores, alicerces para tudo o aqui apresentado e por mim realizado.
- Aos meus irmãos pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Credito minha gratidão a:

- Olival Freire Jr., primeiro leitor dessas ideias, pelo incentivo e crítica;
- Osvaldo Frota Pessoa Jr., pela orientação, confiança e incentivo a essa tese;
- Indianara e Elder por apostarem nessas ideias;
- Aos membros da banca examinadora.

RESUMO

Este trabalho objetiva construir capítulos sobre a Teoria Quântica de Campos (TQC) pelas trilhas da Eletrodinâmica Quântica (EDQ) no Brasil, no período de 1948 a 1980, mediante o estudo das contribuições dos físicos J. Leite Lopes, T. Maris e J. A. Swieca. A tese parte da análise das pesquisas científicas universitárias realizadas por esses físicos, com base na EDQ (renormalizada, a partir de 1948), que deram suporte à física e às ciências correlatas. Destacando os contextos científico, social, econômico e político; é feito um esboço biográfico dos físicos protagonistas citados, localizando-os nesses contextos em que eles atuaram. O foco da narrativa está concentrado na evolução das pesquisas em TQC direcionadas para a prática e o desenvolvimento da EDQ no Brasil, e as consequentes pesquisas que foram norteadas por essa EDQ, principalmente quando do propósito de aplicá-la, também, a outra interação fundamental de partículas, que não a eletromagnética, tal como para a interação fraca. Para tal, o Brasil contou, já no início da década de 1950, com o suporte intelectual e presencial de um dos criadores da EDQ, o físico R. P. Feynman, que por várias vezes visitou as nossas instituições de ensino e pesquisa, a exemplo do CBPF e do ITA. Posteriormente, segue-se com as análises de motivações, convites e efetivas contribuições inerentes aos físicos protagonistas, culminando, portanto, com um significativo entendimento da formação, em seus primeiros e próximos passos, dos grupos de pesquisa no CBPF, USP, UFRGS, PUC e UFSCar direcionados para o desenvolvimento da TQC pelo formalismo conceitual da EDQ, com ênfase nos conteúdos de simetria e quebra espontânea de simetria, que efetivamente teve uma contribuição brasileira em solo pátrio ou estrangeiro, seja realizado por físicos brasileiros natos ou não, ou por físico estrangeiro, atuando em universidade brasileira.

PALAVRAS-CHAVE: Teoria Quântica de Campos no Brasil. Eletrodinâmica Quântica no Brasil. José Leite Lopes. Theodor August Johannes Maris. Jorge André Swieca.

ABSTRACT

This work aims to construct chapters of Quantum Field Theory (QFT) in Brazil, through the tracks of Quantum Electrodynamics (QED), from 1948 to 1980, involving the contributions of physicists J. Leite Lopes, T. Maris, and J. A. Swieca. The thesis starts with the analysis of the scientific researches carried out by these physicists, based on renormalized QED, which gave support to physics and related sciences. By highlighting the scientific, social, economic, and political contexts, biographical sketches of the aforementioned physicists are made, locating them in these contexts in which they acted. The narrative is focused on the evolution of QFT research, aiming at the practice and development of QED in Brazil, and the ensuing researches which were guided by this QED, especially when applied to fundamental interaction of particles other than the electromagnetic, as the weak interaction. To this end, Brazil had in the beginning of the 1950's the intellectual and presential support of one of the creators of renormalized QED, R. P. Feynman, who visited Brazilian research institutions several times, such as CBPF and ITA. Next, the motivations, invitations and effective contributions of the three protagonists are analyzed, culminating with a significant understanding of the formation, in its first and next steps, of the research centers at CBPF, USP, UFRGS, PUC and UFSCar, aimed at the development of TQC by the conceptual formalism of EDQ, with emphasis on the contents of symmetry and spontaneous symmetry breaking, which effectively had a Brazilian contribution in the country or abroad, whether performed by Brazilian physicists born or not in the country, or by a foreign physicist acting at a Brazilian university.

KEY WORDS: Quantum Field Theory in Brazil. Quantum Electrodynamics in Brazil. José Leite Lopes. Theodor August Johannes Maris. Jorge André Swieca.

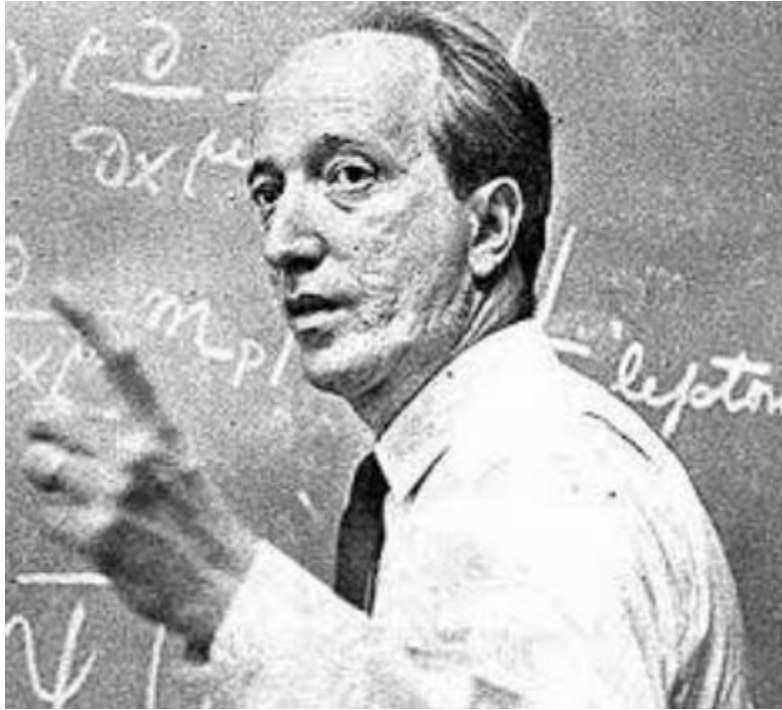


Fig. 1 José Leite Lopes
Fonte: CBPF

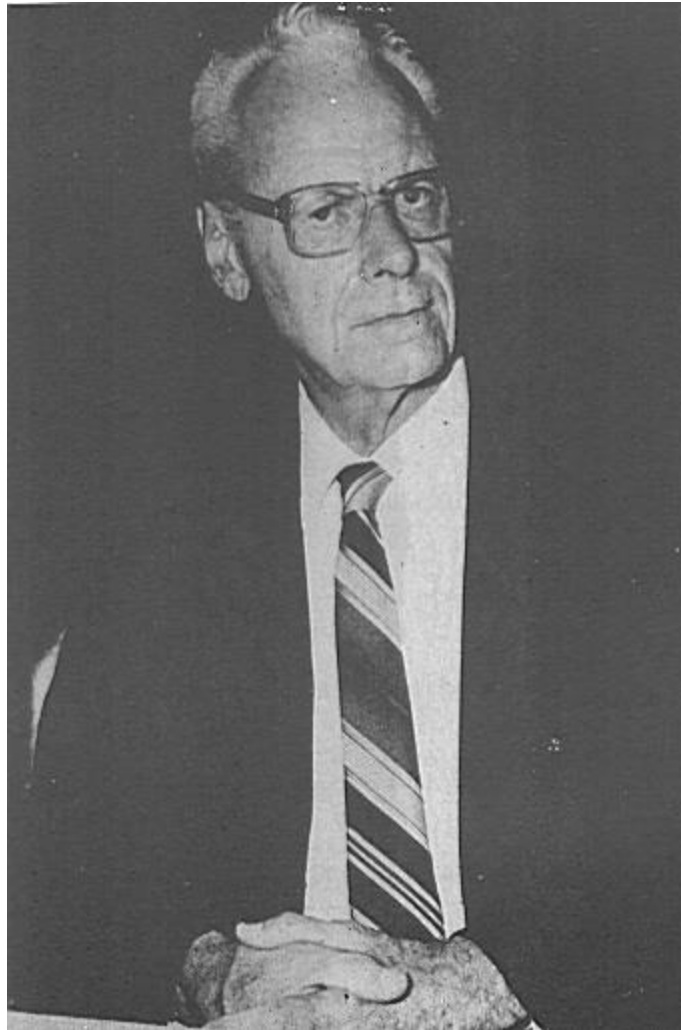


Fig. 2 Theodor A. J. Maris
Fonte: UFRGS

So it is important really to understand with
 the notion of the singularity of the light cone
 necessary for a quantum field theory to be this:

$$\text{where } \int_{\mathcal{D}} f(x) dx = \int_{\mathcal{D}} f(x) dx$$



$$J.A.S.(1) : \int_{\mathcal{D}} f(x) dx$$

we still see - teaching which is an aspect of
 the singularity and by Goldstone-Hellman and
 Weinberg. Let us first briefly describe that and

Fig. 3 Jorge André Swieca
 Fonte: UFSCar

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ABREVIATURAS E SIGLAS	xv
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1. INFORMAÇÃO ANTECESSÓRIA	1
1.1 MOTIVAÇÕES, OBJETIVO E METODOLOGIA	1
1.2 INTRODUÇÃO HISTÓRICA À TQC E EDQ	4
1.3 ORIGENS DAS PESQUISAS EM TQC E EDQ NO BRASIL	23
CAPÍTULO II – CIÊNCIA E TECNOLOGIA NO BRASIL DENTRO E FORA DOS MUROS DAS UNIVERSIDADES, 1948-1980	32
2. PANORAMA	32
2.1 CONTEXTO SÓCIO-ECONÔMICO E POLÍTICO-CIENTÍFICO DO BRASIL	32
2.2 UMA PAUSA PARA OLHAR PARA O CNPQ	37
2.3 BREVE ABORDAGEM SOBRE A CAPES	42
2.4 DE VOLTA AO CONTEXTO SÓCIO-ECONÔMICO E POLÍTICO-CIENTÍFICO, 1960-1980	44
CAPÍTULO III – CENÁRIO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS, TQC E EDQ NO BRASIL, 1948-1980: PRÓS E CONTRAS.....	48
3. COMPOSIÇÃO E AÇÕES	48
3.1 LUTAS, INTERCÂMBIOS E INCENTIVOS	48
3.2 DA UNIVERSIDADE DE CORNELL A PROFESSOR DO CBPF: A CONTRIBUIÇÃO DE R. P. FEYNMAN	50
CAPÍTULO IV – EVOLUÇÃO DA TQC PELO FORMALISMO CONCEITUAL DA EDQ NO BRASIL, 1948-1980	54
4. INSTITUIÇÕES DE PESQUISA	54
4.1 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NO CBPF : A CONTRIBUIÇÃO DE LEITE LOPES	54
4.2 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NA USP : A CONTRIBUIÇÃO DE J. A. SWIECA	74
4.3 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NA UFRGS : A CONTRIBUIÇÃO DE THEODOR MARIS	91
4.4 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NA PUC : A CONTRIBUIÇÃO DE J. A. SWIECA	128

4.5 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NA UFSCar: A BREVE CONTRIBUIÇÃO DE J. A. SWIECA	133
4.6 DIÁLOGOS E DEBATES CIENTÍFICOS ENTRE J. A. SWIECA E T. A. J. MARIS	140
CAPÍTULO V – LEGADO DOS FÍSICOS PROTAGONISTAS DA TQC PELAS TRILHAS DA EDQ	144
5. CONCLUSÃO	144
5.1 CONTRIBUIÇÕES	144
5.1.1 CONTRIBUIÇÕES DE J. LEITE LOPES	145
5.1.2 CONTRIBUIÇÕES DE T. A. J. MARIS	148
5.1.3 CONTRIBUIÇÕES DE J. A. SWIECA	151
5.1.4 INSTITUIÇÕES DE FOMENTO ÀS PESQUISAS	154
5.2 INTERSEÇÕES NA PRÁTICA DE PESQUISAS EM EDQ	155
5.2.1 MAIS UM OLHAR PARA A TCQ PELAS TRILHAS DA EDQ	157
REFERÊNCIAS	158
ANEXOS.....	173
A1 – ORIENTAÇÕES DE JOSÉ LEITE LOPES.....	173
A2 – ORIENTAÇÕES DE THEODOR A. J. MARIS	174
A3 – ORIENTAÇÕES DE JORGE A. SWIECA	175
A4 – ENTREVISTA COM J. M. F. BASSALO	177
A5 – ENTREVISTA COM G. JACOB	178
A6 – ENTREVISTA COM C. A. A. DE CARVALHO FILHO	180
A7 – ENTREVISTA COM W.F. WRESZINSKI	183

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 José Leite Lopes	ix
2 Theodor A. J. Maris	x
3 Jorge A. Swieca	xi
4 As partículas elementares que compõem o Modelo Padrão	21
5 Evolução de desembolsos	45
6 Reunião da SBPC	56
7 José Leite Lopes	71
8 Jorge André Swieca e colegas de profissão	88
9 Theodor A. J. Maris e colegas de profissão	125
10 Leite Lopes pela Folha de São Paulo	145
11 Theodor Maris pelo CNPq	148
12 Swieca pelo Physics Today	151

ABREVIATURAS, SIGLAS e SÍMBOLOS

TEORIAS

EDQ – Eletrodinâmica Quântica
EDQ2 – Eletrodinâmica Quântica em duas dimensões
CQD – Cromodinâmica Quântica
QCD – Quantum Chromodynamics
QED – Quantum Electrodynamics
QFT – Quantum Field Theory

PERIÓDICOS CIENTÍFICOS

An. Acad. Bras. de Ciências – Anais da Academia Brasileira de Ciências
Ann. NY Acad. Sciences – Anais da Academia de Ciências de New York
Appl. Phys. Lett. – Applied Physics Letters
Commun. Math. Phys. – Communications in Mathematical Physics
Il Nuovo Cimento
Math. Proc. Camb. Phil. Soc. – Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society
Phys. Rev. Lett. – Physical Review Letters
Proc. R. Soc. Lond. – Proceedings of the Royal Society of London
Rev. Bras. Ensino Fís. – Revista Brasileira de Ensino de Física
Nucl. Phys. – Nuclear Physics

INSTITUIÇÕES

Acad. Bras. de Ciências – Academia Brasileira de Ciências
BNDE - Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa
atualmente: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Caltech – California Institute of Technology
CPDOC – Centro de Pesquisa e Documentação de História Contemporânea do Brasil

CRN – Centre de Recherches Nucléaires (Strasbourg, França)
CTA – Centro Técnico de Aeronáutica (até 1968/69),
Centro Técnico Aeroespacial (a partir de 1969)
EUA – Estados Unidos da América
FAPERGS – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul
FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FGV – Fundação Getúlio Vargas
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
FNFi – Faculdade Nacional de Filosofia
FNDCT – Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
IAS – Institute for Advanced Study
IEA – Instituto de Energia Atômica
IF – Instituto de Física
IFT – Instituto de Física Teórica de São Paulo
IMPA – Instituto de Matemática Pura e Aplicada
IPR – Instituto de Pesquisas Radioativas
ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica
OAS – Organization of American States
PNF – Prêmio Nobel de Física
PPEFHC – Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências
PUC – Pontifícia Universidade Católica
SBC – Sociedade Brasileira de Ciência
SBPC – Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência
UB – Universidade do Brasil
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
UFPA – Universidade Federal do Pará
UFSCar – Universidade Federal de São Carlos
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNESP – Universidade Estado de São Paulo Júlio Mesquita
USP – Universidade de São Paulo

SÍMBOLOS

h – constante de Planck, cujo valor é $4,13566743 \times 10^{-15}$ eV.s ou $6,6260693 \times 10^{-34}$ J.s
 π - lê-se “pi”, representando o número irracional 3,1415926...

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1. INFORMAÇÃO ANTECESSÓRIA

Em se tratando essa tese de doutorado (TD) de historiar capítulos da Teoria Quântica de Campos (TQC) pelo formalismo conceitual da Eletrodinâmica Quântica (EDQ) desenvolvida no Brasil, no período 1948 – 1980, a linguagem, vocabulário e equações utilizados nessa TD, em várias situações, apresentam alguma complexidade para o leitor não iniciado em física quântica, mais particularmente em física de altas energias¹ e física de partículas. Portanto, para um melhor entendimento dessa TD é sugestivo que o leitor tenha conhecimento prévio de conteúdos tais como: teoria da relatividade restrita, mecânica quântica, teoria de grupos², álgebra de Lie, topologia, invariâncias e simetria; teoria de calibre e teoria eletrofraca.

1.1 MOTIVAÇÕES, OBJETIVO E METODOLOGIA

Nos atuais dias do século XXI, em que se pode isolar e caracterizar um único fóton ou átomo, dias em que a física de partículas elementares tem fomentado a descoberta de partículas importantes que formam o universo subatômico, com destaque para a descoberta do bóson de Higgs, dias em que o fenômeno da supercondutividade goza de posição diferenciada, alavancando a ciência e a tecnologia (C&T), constata-se que são descobertas

1 Ao ramo da física que se ocupa de estudar fenômenos físicos que envolvem as partículas atômicas e subatômicas, entende-se por física quântica. Dentre as áreas dessa física, tem-se a da **física de altas energias**. Ao longo dessa TD o termo física de alta energia irá estar presente na forma singular ou com as duas últimas palavras no plural (física de altas energias) para designar que a física que se está estudando (em análise, em evidência), ocupa-se de quantidade grande de energia para o domínio de uma **única** partícula (atômica ou subatômica), o que se conclui que física de altas energias é também física de partículas. A designação física de altas energias será usada também quando se referindo ao domínio da física que estuda as interações entre as partículas elementares (fundamentais) da natureza. Do mesmo modo é importante saber para melhor entendimento dessa TD (pelo leitor não iniciado na temática) que essa designação também **não** é usada para referir-se a física nuclear (física de baixa energia), ainda que nessa se esteja trabalhando com íons considerados pesados.

2 A sugestão do autor decorre do fato de que a propriedade de invariância está presente em vários fenômenos físicos, e também vinculada a alguma simetria, constitui-se portanto numa necessidade para o entendimento de determinados mecanismos em física, aqui em destaque TQC pelo formalismo conceitual da EDQ, saber operar mediante TG, pois os grupos atuam como sondas eficazes para averiguar a existência de simetria, essa que assim como sua quebra compõem os objetivos dessa TD.

científicas que têm em seus alicerces a contribuição de pesquisas em Teoria Quântica de Campos, representada por uma das suas teorias constituintes, denominada Eletrodinâmica Quântica.

Ciente de que o Brasil é um país que já tem uma significativa produção científica, fica nesse contexto a indagação: qual a efetiva contribuição da TQC, pelo formalismo conceitual da EDQ, realizada no Brasil por brasileiros ou estrangeiros radicados no Brasil, para a evolução de pesquisas nessa teoria? É esta indagação que compõe o problema de pesquisa dessa tese de doutorado, indagação esta que carece de investigação na literatura de história das ciências, tanto nacional quanto internacional.

Por sua vez, à medida que se constrói a história associada a essa indagação, sente-se a necessidade, para entendimento do encadeamento dos fatos, de se seguir um périplo histórico-conceitual, que consiste em se analisar os contextos científicos, políticos, sociais e econômicos que permearam as décadas de início das pesquisas em EDQ. Opta-se nesta tese por cobrir o período que se inicia em 1948, com as contribuições do físico Richard Feynman, até o ano de 1980, que corresponde ao falecimento do físico brasileiro Jorge André Swieca.

O objetivo desta tese é construir capítulos da TQC, pelo formalismo conceitual da EDQ renormalizada, avaliando a sua evolução, ou nessa referenciando-se, desenvolvida no Brasil, e no exterior, com a participação dos físicos brasileiros e estrangeiros atuantes ou radicados nesse país, no período de 1948-1980, a partir da análise das contribuições dos físicos José Leite Lopes, Theodor August Johannes Maris e Jorge André Swieca, que deram suporte à física de partículas elementares e às ciências correlatas, destacando os contextos científico, social, econômico e político.

Dentre os objetivos específicos, podem ser destacados dois:

(1) Mapeamento histórico-geográfico dos núcleos de pesquisas físicas em TQC pelo formalismo conceitual da EDQ, no período delimitado, identificando origem, direcionamento e as interfaces dessas pesquisas com outras áreas da física e ciências desenvolvidas no Brasil.

(2) Identificar contatos e intercâmbios realizados pelas universidades, centros de pesquisas e físicos brasileiros, com Feynman, Leite Lopes, Maris e Swieca, envolvendo os governos do Brasil, EUA, França e Alemanha, além de políticos, demais físicos e outros cientistas, com o propósito de analisar as efetivas políticas de fomento ao ensino e à pesquisa realizadas pelo estado brasileiro, enquanto sociedade civil e grupos militares, para desenvolvimento no Brasil da TQC pelo formalismo conceitual da EDQ.

(2.1) Construir o perfil dos grupos de pesquisa em TQC, pelo formalismo conceitual da EDQ, a partir da identificação da linha de pesquisa prioritária, nessa teoria, que fora adotada por cada físico protagonista, seus orientandos e respectivos parceiros de pesquisa.

Para a temática historiada nessa tese é adotada a metodologia de análise documental, na qual as fontes primárias e secundárias são sempre cotejadas, com o fito de se manter uma sequência narrativa lógica e cronológica para a contextualização adotada.

As fontes primárias consistem de:

- Entrevistas com físicos, políticos e executivos que foram próximos aos protagonistas do período, além de visitas virtuais aos documentos publicados pelo CBPF, ITA, USP, UFRGS, PUC, UFSCar e Caltech.
- Entrevistas realizadas por Tjerk Franken, depositadas no CPDOC da FGV, Rio de Janeiro.
- Dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos integrantes do período de pesquisa.

Já as fontes secundárias incluem os diversos itens mencionados na bibliografia.

Retomando de forma mais específica a motivação inicialmente apresentada, haja visto, no Brasil, o explícito progresso da TQC, pelas vias da EDQ, para esse período, lacunas se apresentam na história da física brasileira carentes de respostas, daí também se questionar: quais as efetivas implicações das estadas de Feynman no Brasil, com ênfase no ensino superior e em EDQ? Quais as linhas de pesquisas no país em TQC, aludidas à EDQ, adotadas e/ou prioritárias nas instituições civis, bem como as suas respectivas implicações em física e ciências correlatas? Quais, no Brasil, os efetivos facilitadores e dificultadores para a implantação e desenvolvimento da TQC, no período dessa pesquisa?

Quais outros físicos talentosos em TQC, pelas vias da EDQ, foram orientandos dos protagonistas dessa tese e que continuaram suas pesquisas e atividades docentes, nessa linha temática, no Brasil e/ou no exterior?

Pergunta-se ainda: qual a efetiva contribuição, no período em pauta dessa tese, da TQC praticada no Brasil pelo formalismo conceitual da EDQ ou referenciando-se nessa realizada pelos físicos protagonistas e seus respectivos grupos de pesquisa para os desenvolvimentos citados?

1.2 INTRODUÇÃO HISTÓRICA À TQC E EDQ

Iniciamos esta história na segunda década do século XIX, com a publicação em 1828 do livro “An Essay on the application of mathematical analysis to the theories of electricity and magnetism”³ de autoria do matemático britânico George Green no qual é desenvolvida uma técnica matemática muito importante, que passou a ser chamada “função de Green”, constituindo-se essa em uma ferramenta alternativa para solução de equações diferenciais não-homogêneas, com condições de contorno pré-estabelecidas (GREEN, 1828).

Decorridas mais de quatro décadas, em 1873, James Clerk Maxwell enunciou suas equações do eletromagnetismo⁴, concluindo que a luz é uma onda eletromagnética. Sua teoria passou a compor os alicerces da Física, principalmente, a partir do trabalho de Heinrich Hertz, em 1887⁵.

Por sua vez, Sophus Lie publicou em 1888 o texto *Theorie der Transformationsgruppen I*, com a ajuda de Friedrich Engel, tal como se lê em Lie (1888), dando continuidade a uma busca que objetivava entender os fenômenos físicos da natureza e suas relações com as

3 *Um ensaio sobre a aplicação de análise matemática para as teorias de eletricidade e magnetismo* é considerado o trabalho de maior impacto na física e matemática feito por G. Green (1793-1841), sendo-o inicialmente impresso e difundido por financiamento do próprio autor (GREEN, 1828).

4 Presentes em Maxwell (1861).

5 Pois coube a Hertz, experimentalmente, confirmar a existência de onda eletromagnética e gerá-la, sendo a luz uma onda dessa natureza, tal como já havia sido teorizada por Maxwell pela teoria ondulatória para a luz. Tal experimento, indubitavelmente, contribuiu com mais “visibilidade” para essa teoria de Maxwell (HERTZ, 1887).

invariâncias e consequentes simetrias, sendo que já se registrava essa busca desde a penúltima década do século XVII⁶.

É nesse contexto, com estudos que vão até 1904, procurando solucionar a incompatibilidade das transformações de Galileu quando aplicadas às equações de Maxwell, objetivando tornar essas invariantes, que o físico neerlandês Hendrik Lorentz (1853-1928), após relacionar para um ponto coordenadas espaço-temporais vinculadas a dois referenciais em que um referencial permanece imóvel relativamente ao éter e o outro se move em relação ao primeiro com movimento uniforme, constrói um conjunto de equações (transformações) no qual introduz, para objetos que se movem com velocidades próximas à velocidade da luz, as hipóteses de diminuição do comprimento e dilatação do tempo, registrando-se assim a relatividade desses, em oposição à condição de entes físicos newtonianos absolutos (LORENTZ, 1904).

Todavia, os caminhos para se obter a pretendida invariância exigia entendimentos diferenciados sobre tempo e espaço. Albert Einstein, em 1905, com hipóteses referenciadas nessas transformações, formulou sua versão da Teoria da Relatividade Restrita (TRR), presente em Einstein (1905c), postulando que a velocidade da luz (c) independe da velocidade da fonte e que *todas* as leis da física (não só as da mecânica) devem também ser invariantes para todos os sistemas inerciais. Essas afirmações passaram a formar uma estrutura robusta para que a física, em todas as suas áreas, pudesse incorporar novas contribuições.

Com estudos iniciados anteriormente, mas somente publicado em 1906, ocupando-se com a teoria da relatividade enquanto análise das equações de Lorentz, no artigo “Sur la dynamique de l’électron”⁷, o matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) simplificou-as, demonstrando que elas formavam um grupo que deixa invariantes as equações do eletromagnetismo e portanto, revelando a presença de simetrias⁸ (POINCARÉ, 1906).

6 Refiro-me à invariância por translação devido à conservação do momento, abordada em Newton (1687).

7 Sobre a dinâmica do elétron.

8 Daqui em diante é sugestivo entender que se algo, ou uma situação, é simétrico se esse for invariante ante uma certa transformação, tal como a simetria representada pela lei de Coulomb, pois a força eletrostática entre duas partículas carregadas é invariante ao invertermos o sinal dessas cargas, pois o que interessa para caracterizar essa força é o produto dos sinais das cargas, daí dizer-

Por sua vez, Einstein depois de demonstrar a independência das leis naturais pela ótica do observador descrita em Einstein (1905c), o físico alemão introduz as ideias iniciais sobre a teoria da relatividade geral (EINSTEIN, 1907).

Nos anos seguintes, os matemáticos britânicos Harry Bateman e Ebenezer Cunningham realizam estudos sobre invariâncias de escala e apresentam-os em dois artigos independentes, ambos publicados em 1910, nos quais esses pesquisadores, para as condições de diferentes escalas, mediante um conjunto de transformações das coordenadas do espaço-tempo, avaliam e confirmam serem invariantes as equações do eletromagnetismo presentes em Maxwell (1887) (BATEMAN, 1910; CUNNINGHAM, 1910).

Em 1911, Einstein, com os conteúdos presentes em Einstein (1907), se fundamenta para seguidamente afirmar em Einstein (1911) existir curvatura na trajetória da luz provocada pelo campo gravitacional.

Os desenvolvimentos desses estudos de Einstein são publicados em 1916 no artigo denominado “Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie” (Fundamentos da Teoria da Relatividade Geral), tendo como alicerces o princípio da covariância⁹ geral e o princípio da equivalência¹⁰, com causas e implicações tanto gravitacionais como cosmológicas. Nele o autor afirma ser a gravidade uma propriedade do espaço e do tempo (espaço-tempo curvo), descrito por 4 dimensões, estando a citada curvatura estritamente vinculada à energia e aos momentos, tanto de matéria como de radiação existentes, sendo matematicamente essa teoria representada por equações diferenciais parciais. Nessas condições, ainda segundo Einstein (1916), os corpos livres descrevem movimentos inerciais no espaço-tempo curvo.

se que a força eletrostática é simétrica quanto ao sinal das cargas interagentes. Por sua vez, dentre as simetrias destacam-se as de calibre que estão presentes no grupo $U(1)$ que envolve o campo eletromagnético (simetria caracterizada pela conservação da carga).

9 A escolha por covariância em física significa que as leis dessa disciplina se mantêm invariantes (inalteradas) por transformações em qualquer referencial.

10 O princípio referido, tal como desenvolvido por Einstein, por exemplo ao se verificar dentro de uma nave, afirma que não é possível diferenciar uma situação de aceleração da nave da situação em que ela está parada em um campo gravitacional (EINSTEIN, 1916).

Paralelamente, nessas citadas duas primeiras décadas do século XX, desenvolve-se a Física Quântica, com trabalhos de Max Planck¹¹, Albert Einstein e Niels Bohr¹², entre outros, registrando-se ainda no ano de 1916 que ela já contabilizava entre suas conquistas a definição da constante que também caracteriza a dimensão do campo eletromagnético, a constante de estrutura fina¹³, teorizada por Arnold Sommerfeld (1868-1951), com o valor aproximado de $1/137$.

Da sempre fundamental parceria entre a física e a matemática, coube à alemã Amalie Emmy Noether em 1918, entre outros feitos, desenvolver a *Teoria dos invariantes diferenciais em cálculo de variações*, que teve aplicação imediata em física quântica (NOETHER, 1918). Registra-se então a consistente vinculação entre simetria contínua¹⁴ e leis físicas de conservação.

Em anos que já se dispõem das teorias do eletromagnetismo, da relatividade restrita e da relatividade geral, registram-se os esforços do matemático alemão Hermann Weyl (1885-1955), em 1918, e do francês, também matemático, Éli Cartan (1869-1951), nos anos de 1923 e 1924, de entenderem o conceito de campo enquanto ente físico, descrito

11 Referindo-se inicialmente a PLANCK (1901).

12 Niels Henrick David Bohr (1885-1962) físico dinamarquês considerado um dos criadores da física quântica. Bohr é autor do princípio da correspondência (que estabelece limite entre os domínios das físicas clássica e quântica no mundo microscópico) e do princípio da complementaridade (que estabelece que a matéria e a radiação têm naturezas duais, ou seja, a condição de ser partícula ou de ser onda não são excludentes, mas sim complementares). A valiosa contribuição de Bohr para entendimento da estrutura do átomo e da radiação por esse emitida, proporcionaram-lhe ser laureado com o Prêmio Nobel de Física de 1922 (BOHR, 1913; BOHR, 1928).

13 Denominada de constante de estrutura fina porque pela fórmula que a calcula já era possível determinar valores da estrutura fina que compõem as linhas espectrais do átomo de hidrogênio (SOMMERFELD, 1916).

14 Em TQC, pode-se também definir calibre como um procedimento matemático próprio, que conduz aos melhores valores dos graus de liberdade da função lagrangiana. Para o entendimento do conteúdo simetria, faz-se necessário estabelecer algumas definições e classificações. Uma simetria de calibre, também denominada simetria de *gauge* e que está presente no grupo $U(1)$ que envolve o campo eletromagnético, é uma simetria caracterizada pela conservação da carga. Por sua vez, entre as classificações, tem-se a que classifica as simetrias em contínua e discreta. As simetrias contínuas, representadas por grupos de lie conexos, parametrizadas por variáveis contínuas como ângulo e vetor, estão relacionadas com leis de conservação e fundamentadas no teorema de Noether. Obtidas a partir das devidas transformações, tais simetrias são as de translação no tempo, translação no espaço, rotação e a simetria de calibre, que estão vinculadas respectivamente às leis de conservação de energia, de momento linear, de momento angular e da carga (WEYL, 1918, NOETHER, 1918).

matematicamente, e coerente com as leis de invariância física, já conhecidas (CARTAN, 1923,1924; WEIL,1928).

Por transformações de escala Weyl buscava recalibrar a unidade de medida no espaço-tempo, tentando assim unificar a teoria do eletromagnetismo e a teoria da relatividade geral. Todavia, não logrando êxito, essas pesquisas resultaram em uma nova teoria que serviu para ele mostrar ser possível, mediante transformações matemáticas, passar o campo da condição de simetria global¹⁵ para a de simetria local¹⁶, registrando-se assim uma conquista valiosa quanto ao entendimento do conceito de campo, sendo-a denominada de teoria de calibre (*gauge*) (WEYL, 1918).

As pesquisas prosseguem, algumas com implicações para a estabilidade da matéria ordinária. E é nesse contexto que em 1925 Wolfgang E. Pauli apresenta, e é aceito como princípio da Mecânica Quântica (MQ), o enunciado que afirma que duas partículas subatômicas iguais definidas como férmions não podem ocupar, concomitantemente, o mesmo estado quântico¹⁷ (PAULI, 1925).

Esse ano e o seguinte são ainda contemplados com publicações que desenvolveram significativamente a MQ, tanto a partir de trabalho seminal de Werner Heisenberg quanto da formulação matemática para se ter uma mecânica quântica matricial, de autoria dos físicos Max Born, Pascual Jordan e W. Heisenberg, que correspondem aos artigos Born & Jordan (1925) e Born; Jordan; Heisenberg (1926), os quais, do ponto de vista histórico,

15 Em física, enquanto disciplina, uma simetria de calibre pode ser global ou local, representada pela geometria ou por função matemática que a reja, gerando lagrangianas e/ou hamiltonianas invariantes sem a necessidade de se ter qualquer analogia geométrica. A simetria global tem, portanto, como propriedade conservar a carga elétrica, ou seja, facultar a existência de uma corrente conservada, atendendo-se assim ao Teorema de Noether (NOETHER, 1918).

16 Uma simetria interna é classificada como local quando permite que as transformações de simetrias sejam realizadas em locais diferentes, pontos diferentes das coordenadas do espaço-tempo, possibilitando assim se obter valores diferentes para tais parâmetros, ou seja, calibra-se a simetria, define-se com precisão as especificidades, os elementos, que caracterizam a interação (eletromagnética).

17 Denomina-se de estado quântico em física quântica (mecânica quântica, MQ) a condição de existência de um sistema físico (quântico), em que tal estado pode ser representado por um vetor de estado (quântico e que não tem interpretação física) ou por um conjunto de números quânticos (principal, secundário ou azimutal, magnético), considerando que num mesmo átomo não existem dois elétrons com números quânticos iguais).

contribuíram conceitualmente para a formação da disciplina que seria denominada de Teoria Quântica de Campos (TQC).

De forma independente, analisando a dinâmica das partículas quânticas, em 1926 Erwin Schrödinger¹⁸ desenvolveu a abordagem da mecânica ondulatória, teoria das ondas, que posteriormente mostrou-se equivalente à matricial.

Por sua vez rompendo com a causalidade clássica, M. Born propôs, em junho desse ano, interpretar função de onda como uma relação de densidade de probabilidade¹⁹ para se encontrar posição de partícula em determinado tempo, ou seja, adotar em MQ uma abordagem probabilística (estatística) para função de onda; proposta essa que gerou algumas insatisfações de pares, inclusive de A. Einstein (BORN, 1926).

Ainda nesse ano, com as devidas limitações²⁰, analisando uma partícula livre de spin zero, os físicos Oscar Klein e Walter Gordon, em artigos independentes, apresentam, para um campo escalar que descreve essa partícula, uma equação de onda de movimento relativística, com a possibilidade de energias negativas, sendo-a denominada equação de Klein-Gordon (GORDON, 1926; KLEIN, 1926).

Do até então pesquisado e publicado, registra-se que apesar dos esforços que tem sido feito em prol do desenvolvimento da física quântica, em fevereiro de 1927, no artigo “The quantum theory of the emission and absorption of radiation”, o matemático e físico inglês Paul Anderson Maurice Dirac afirma na página 243 que “quase nada foi feito até o momento em eletrodinâmica quântica”. Para sustentar a sua assertiva, o físico apresenta diferentemente de seus pares e em álgebra não-comutativa, operadores de criação e destruição, quantizando²¹ então o campo eletromagnético. Esse procedimento passou a ser

18 Trata-se de uma série de artigos publicados em 1926, aqui em destaque o artigo em que Schrödinger aborda a quantização dos autovetores, que se tornou conhecida entre os pares como equação de Schrödinger para a Mecânica Quântica (SCHRÖDINGER, 1926).

19 O módulo ao quadrado da função de onda ($|\psi(x)|^2$) fornece a amplitude de probabilidade de se encontrar a partícula numa determinada posição.

20 Uma das limitações é que se constatou ser o elétron portador de spin.

21 Entende-se ação em mecânica quântica (MQ) como o mecanismo que revela como um sistema físico evolui de um estado quântico para outro, e que pode ser representado por função matemática,

denominado de Segunda Quantização²², que consiste em um método de quantização pelo qual a emissão e absorção da radiação é tratada pelo criar e destruir de partículas; tem-se, portanto, o propósito de formular uma teoria quântica de campo, ainda sem o necessário êxito porque com limitações, originando-se assim o desenvolvimento de uma teoria em formação denominada eletrodinâmica quântica, cujo nome (já adotado por Dirac) é aceito e será mantido doravante pelos pares (DIRAC, 1927).

Ainda em 1927, Heisenberg publicou um trabalho singular sobre o *Princípio da Incerteza*, a partir do qual é feito um convite à física para um novo olhar sobre as partículas por essa estudadas, pois com tal princípio se afirma ser impossível determinar concomitantemente a posição e a velocidade de uma partícula com precisão, o que em tese é também uma afirmação para se renunciar ao conceito de trajetória em mecânica quântica (HEISENBERG, 1927).

Como marco de unificação da MQ com a TRR, em 1928, P. Dirac publica pela *Royal Society of London* dois artigos, “The quantum theory of the electron” e “The quantum theory of the electron. Part. II”, onde expressou a quantização de um elétron²³ dentro da teoria da

em que a evolução não se registra por unicidade de caminho, mas sim ocorre por todos os caminhos permitidos por essa função, a qual é usada para se deduzir equações de movimento, a exemplo da do campo eletromagnético. Por seu turno, denomina-se quantização ao procedimento adotado pela Mecânica Quântica que se utiliza de formalismo conceitual matemático para elaborar modelos quânticos que atendam às necessidades da física quântica e ciências correlatas, fazendo uso de aportes teóricos já existentes da física clássica para definir e caracterizar uma partícula como também para elaborar teorias consistentes para caracterizá-la quanto a interação com ela própria e com outras partículas. Quando um sistema físico está quantizado (o meio quântico onde ocorre a "ação") seus valores de energia e momento angular, por exemplos, assumem valores que são múltiplos da constante de Planck (h) ou dessa reduzida ($\hbar = h / 2\pi$), respectivamente, cuja unidade pode ser entendida como energia multiplicada pelo tempo (PLANCK, 1901; DIRAC, 1927).

22 A primeira quantização em Mecânica Quântica consiste numa metodologia empregada para se elaborar modelo para descrever uma partícula, referenciando-se em definições clássicas sobre seus espaços de fases; por sua vez, a segunda quantização consiste em uma metodologia empregada para se elaborar TQC, referenciando-se em teorias clássicas de campos, não quantizadas, já existentes. No caso de P. Dirac essa TQC, por ele criada, é a EDQ não renormalizada representada nessa TD pelos artigos Dirac (1927, 1928ab).

23 O elétron, que é uma partícula fundamental da natureza, tem carga negativa de valor igual $-1,6021 \times 10^{-19}$ C (Coulomb) ou $(4.891 \times 10^{-10}$ E.S.U), que é um valor quantizado, ou seja, discreto, denominado de carga fundamental; isto implica ser este o menor valor de carga que existe e outros valores para carga de partículas terão que ser múltiplos desse, não podendo, portanto, assumir quaisquer outros valores. Caso a partícula seja o próton, segue-se a mesma lógica conceitual, mudando-se apenas o sinal do valor da carga para positivo (MILLIKAN, 1910, 1911).

relatividade restrita, resultando na formulação da equação de onda relativística para partícula de spin²⁴ $\frac{1}{2}$, doravante denominada de *Equação de Dirac*, uma equação diferencial de primeira ordem, covariante, ou seja, que mantém a mesma forma em qualquer referencial inercial. Apesar das virtudes, tais como introduzir estados de energia negativa e a ideia de antipartículas, as limitações apareciam nos cálculos de determinados parâmetros sobre a forma de divergências, os infinitos (DIRAC, 1928ab).

No ano de 1928 que corresponde a **um século** após a publicação Green (1928), registra-se também proximidade entre a Mecânica Quântica vigente e a então Teoria de Grupos, criada por Evarist Galois no século anterior, quando o já mencionado Hermann Weyl afirma que representações de grupos matemáticos podem ser caracterizadas por índices que correspondam a cada número quântico não-principal (WEYL, 1931).

A quantização das teorias de campo clássicas, no contexto não-relativístico, fora inaugurada por Dirac e pelo físico alemão Pascual Jordan. A extensão para o domínio relativístico seria bastante problemática. Jordan apresentou uma proposta na conferência de Carcóvia (*Kharkov* ou *Kharkiv*), Ucrânia, no ano de 1929, embora se fizesse ciente de que essa seria uma abordagem transitória em Teoria Quântica de Campos (JORDAN, 1929).

É oportuno mencionar que até 1931 o elétron, o próton e o fóton são as partículas até então conhecidas e somente no ano seguinte é que o físico inglês James Chadwick (1891- 1974) ao irradiar berílio, com partículas alfa, a partir de uma fonte de polônio, observou a presença de radiação não carregada, estava descoberto o nêutron (CHADWICK, 1932, p. 699-701).

Por sua vez, a antipartícula prevista por Dirac (1928ab) foi, em 1932, observada pelo físico estadunidense Carl David Anderson: estava descoberto o pósitron, que tem carga de valor simétrico ao do elétron e mesmo valor de massa desse (aproximadamente $1/1836$ da massa do próton) (ANDERSON, 1932, 1933).

24 Caracteriza-se spin tanto como um ente matemático quanto físico, que está associado ao momento angular intrínseco de uma partícula elementar, cujo valor é expresso por número inteiro, para os bósons (0, 1, 2, ...) ou por múltiplos ímpares do valor $\frac{1}{2}$ para os férmions ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$); sendo h a constante de Planck, os valores dos spins fermiônicos são obtidos a partir de \hbar (DIRAC, 1928ab; LOPES, 1960).

Nos anos de 1932 e 1933 Heisenberg também se ocupou com a hipótese de que a coesão entre as partículas constituintes do núcleo de um átomo (prótons e nêutrons) era realizada por força da natureza que não dependia das cargas elétricas das partículas, o que explica porque os prótons de um núcleo não se afastam. Para Heisenberg, prótons e nêutrons constituíam dois estados quânticos²⁵ diferentes de uma mesma partícula, que o físico alemão (como também outros pares contemporâneos) denominou núcleon. Para diferenciá-los, foi também criado o conceito de isospin (HEISENBERG, 1932a, 1933).

A TQC vai se desenvolvendo como um alicerce teórico físico-matemático, portador de rigoroso formalismo, que objetiva descrever quanticamente sistemas físicos, com infinitos graus de liberdade. Em 1934, os húngaros John von Neumann e Eugene Paul Wigner, juntos com Jordan, publicam “On the algebraic generalization of the quantum mechanical formalism”, onde mostram que a utilização de álgebras, de operadores no espaço de Hilbert, é válida e eficaz ainda que estendida a dimensões infinitas (JORDAN et al., 1934).

Enquanto essas conquistas se realizam, o conteúdo da invariância de escala (também denominado invariância dilatacional) continua ocupando a agenda de outros pesquisadores, estando entre esses Dirac que, pelos seus dois artigos publicados no ano de 1936, conduziram-no a afirmar que a invariância existente nas equações de Maxwell, independentemente do sistema de escala de medição que se estivesse avaliando-as, deve-se ao fato de a massa de repouso do fóton ter valor zero (DIRAC, 1936ab).

Ainda nesse ano e seguintes as limitações da equação de Dirac continuam a incomodar, com físico H. Kramers registrando as diferenças de valores obtidos para a massa teórica do elétron e a experimental, Kramers (1936), e o também físico Robert Serber anotando

25 Estado quântico, nesses idos, já é entendido também como a condição de existência de um sistema físico quântico em que tal estado pode ser representado por uma função de onda. É oportuno mencionar que o estado quântico de menor energia é designado de estado fundamental e que interpretações físicas em MQ provêm dos valores de probabilidades que podem ser calculados a partir de vetores, portanto é a partir do estado quântico que se obtém (calcula) o valor dessas distribuições de probabilidades para cada observável do sistema, registrando-se assim o valor medido no sistema referente a cada observável. O estado quântico, portanto, é representado no espaço de Hilbert por um vetor (raio), mediante números complexos. Tal registro, em formalismo matemático, é feito usualmente pela notação de Dirac, também denominada de notação *bra-ket*, por exemplos vetor *bra* $\langle \phi |$ e vetor *ket* $|\psi \rangle$ (BORN, 1926; DIRAC, 1939).

diferenças para os valores de carga elétrica dessa partícula nas situações de nua e de presente no vácuo, Serber (1938), além dos esforços do próprio P. Dirac em Dirac (1938).

No ano de 1939, Wigner publica o artigo “On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group”, no qual demonstra a viabilidade da aplicação da teoria de grupos para classificar as partículas elementares, a partir do grupo de Poincaré.

Ainda nesse ano, no propósito de minimizar as divergências, os infinitos, da Segunda Quantização, que surgem quando se utiliza a EDQ de Dirac, o jovem físico estadunidense Sidney Michael Dancoff desenvolve equações com correções radiativas para o espalhamento do elétron (DANCOFF, 1939).

A história da física quântica registra que os anos de 1940 compõem uma década de grande produtividade científica, destacando-se no primeiro ano dessa a conclusão da tese de doutorado intitulada *On Contact Transformations and Group Theory in Quantum Mechanical Problems* do físico suíço Josef Maria Jauch (1938 – 1974), que foi assistente de W. E. Pauli (1900 – 1958) em Göttingen, Alemanha.

Também no início da década de 1940, já se cogitava vincular as limitações da Segunda Quantização, principalmente, referindo-se a equação relativista do elétron²⁶, ao fato dela não ser uma teoria quântica de campos relativística. E é por essa linha de pensamento, que no Japão em 1943, sem significativa divulgação na comunidade científica, o físico nipônico Sin-Itiro Tomonaga ao analisar a questão das divergências na EDQ de Dirac, adotando covariância relativística e a renormalização²⁷, eliminava os infinitos, obtendo, segundo o autor, resultados corretos e os publica no idioma pátrio (TOMONAGA, 1943).

26 Por serem o elétron, o fóton e o próton partículas “epicentro” dessa TD, nesse início de década é também oportuno recordar que para o elétron (cuja continuidade de estudo pelo seu melhor entendimento, enquanto partícula, registra-se desde 1897 pelo físico britânico Joseph John Thomson) a evolução da mecânica quântica conduziu a interpretá-lo como uma partícula subatômica pertencente à família dos férmions, que atende ao *Princípio da Exclusão de Pauli*, de maneira que dois elétrons não podem ter o mesmo estado quântico (PAULI, 1925, 1946).

27 Simplificadamente, pode-se afirmar que a renormalização na EDQ é um procedimento de cálculo que consiste em eliminar infinitos parciais que surgem quando da determinação de valores para massa e carga efetivas, tanto do elétron quanto de outras partículas carregadas, e que resulta em uma série de soma finita.

Em 1945, apesar do sucesso da teoria de perturbação, pelo formalismo da EDQ de Dirac, também continua sendo realidade as pesquisas para minimizar as limitações dessa teoria quando também extensivas a outras interações de partículas, conduzindo alguns dos pesquisadores de TQC a optarem por métodos de aproximação não perturbativos, estando entre esses, com tal propósito, o físico russo Igor Yevgenyevich Tamm, que assim procede pelo artigo *Relativistic Interaction of Elementary Particles*, conforme em Tamm (1945).

É também nesse ano que W. Pauli conquista o Prêmio Nobel de Física pelo descobrimento do *princípio de exclusão para férmions* (PAULI, 1925, 1946).

Por sua vez, em 1946, S. Tomonaga traduz aquele artigo de 1943 e publica-o em língua inglesa, com o título “On a relativistically invariant formulation of the quantum theory of wave fields”. Apesar de agora esse artigo gozar de maior visibilidade, não obteve, ainda, o devido convencimento dos pares de que a solução nele apresentada é eficaz como via para se eliminar os infinitos da já citada EDQ (TOMONAGA, 1946).

No ano seguinte, realizou-se nos EUA a *Conferência de Shelter Island*, de 1 a 3 de junho de 1947, que tem a solução para as divergências citadas como item de pauta. Nessa conferência os físicos Willis Eugene Lamb Jr. e Robert C. Retherford enfatizam, ainda mais, as já citadas limitações ao apresentarem como resultado de pesquisa, utilizando microonda aplicada ao átomo de hidrogênio, a singular situação energética verificada no espectro dos estados desse átomo, em que o estado $2p_{1/2}$ degenerava-se no estado $2s_{1/2}$, com diferença de energia, que não era possível calculá-la pela equação de Dirac, correspondente ao valor de energia de um fóton, registrando-se também estar a energia do elétron vinculada não apenas ao número quântico principal do átomo (orbital atômico), fenômeno físico que ficou conhecido como deslocamento (desvio) de Lamb (LAMB & RETHERFORD, 1947, p. 241).

Ainda nesse ano, outras pesquisas confirmaram essas divergências, reservando-se para o final desse ano a pesquisa dos físicos Polykarp Kusch e Henry Foley que, ao analisar os estados $2p_{3/2}$ e $2s_{1/2}$ do átomo de gálio, constataram valores divergentes também para o momento magnético do elétron quando comparados com os calculados pela equação de Dirac (KUSCH & FOLEY, 1947).

Por sua vez, no ano seguinte, coube a Schwinger solucionar tais divergências e desenvolver uma teoria de perturbação relativisticamente invariante; somando-se a essa contribuição, ainda nesse ano de 1948 e no próximo, têm-se as contribuições de Feynman, com iguais propósitos, que, mediante a utilização de integrais de caminho e o uso de diagramas, obteve o físico também soluções eficazes, superando as limitações da EDQ de Dirac (SCHWINGER, 1948; FEYNMAN, 1948ab, 1949ab).

No artigo Feynman (1948b) intitulado “Space-time approach to non-relativistic quantum mechanics” o autor apresenta uma formulação diferente da até então adotada pela mecânica quântica, conforme escreve:

A mecânica quântica não relativística é formulada aqui de modo diferente. No entanto, é matematicamente equivalente à formulação familiar. Na mecânica quântica, a probabilidade de um evento que pode acontecer de várias maneiras diferentes é o quadrado absoluto de uma soma de contribuições complexas, uma para cada maneira alternativa. A probabilidade de que uma partícula seja encontrada como tendo um caminho $x(t)$ situado em algum lugar dentro de uma região do espaço-tempo é o quadrado de uma soma de contribuições, uma para cada caminho na região. A contribuição de um único caminho é postulada como uma exponencial cuja fase (imaginária) é a ação clássica (em unidades de $\hbar [= h / 2\pi]$) para o caminho em questão. A contribuição total de todos os caminhos que atingem \mathbf{x}, \mathbf{t} a partir do passado é a função de onda $\psi(\mathbf{x}, t)$. Mostra-se que isto satisfaz a equação de Schrödinger. A relação com a matriz, a álgebra de matrizes e operadores é discutida. As aplicações são indicadas, em particular para eliminar as coordenadas dos osciladores de campo das equações da eletrodinâmica quântica.

Recordando aqueles idos, essa publicação é assim comentada pelo físico brasileiro Leite Lopes (1988, p. 5): “R. Feynman com a sua singular originalidade reconstruía a mecânica quântica”.

Em setembro de 1949, R. P. Feynman apresentou à comunidade científica mais dois artigos de impacto, ambos publicados pelo periódico Physical Review. Um denominado “The theory of positrons”, que entre as relevâncias do conteúdo o autor destaca a utilização da função de Green como propagador (FEYNMAN, 1949a, p. 750).

No outro artigo Feynman (1949b) intitulado “Space-time approach to quantum electrodynamics” continua o autor com o tratamento quântico para partículas, que é

estendido aos processos de cálculo de interação envolvendo elétrons e fótons; e o físico brasileiro continua seus comentários em LOPES (1988, p. 6):

Daí resultaram os famosos diagramas de Feynman e as chamadas regras de Feynman para com elas se escreverem as amplitudes de processos quânticos, envolvendo essas partículas. Foram contribuições que afetaram em profundidade a teoria quântica de campos e se estenderam a vários domínios da física [...]

Observa-se que das soluções apresentadas para o mesmo problema, a criada por Feynman tem, em seu formalismo, maior destaque por ser considerada mais prática e de fácil aplicação. Esta abordagem facilitou o cálculo das trocas de energia entre as partículas e permitiu “desenhar as suas trajetórias”, de maneira que a teoria de Feynman passou a ser amplamente adotada pelos físicos, ou seja, a física de partículas passa a ser estudada através dos diagramas de Feynman (FEYNMAN, 1949a,b).

Foram por esses diagramas que a TQC teve facilitado o cálculo das interações eletromagnéticas, descrevendo a criação e destruição de partículas, sendo que o fóton é o bóson mediador dessas interações eletromagnéticas. Tem-se, portanto estabelecida a Eletrodinâmica Quântica, agora renormalizada, como uma teoria quântica de campo que unifica o eletromagnetismo, a mecânica quântica e a teoria da relatividade restrita. Todas essas pesquisas e respectivas publicações tiveram em comum solucionar a questão dos infinitos responsáveis pelas divergências nos cálculos da EDQ, pelos já mencionados procedimentos de renormalização.

Por sua vez, ainda no ano de 1949, o físico inglês, posteriormente naturalizado estadunidense, Freeman J. Dyson, demonstrou que as abordagens e os formalismos desenvolvidos por Tomonaga, Schwinger e Feynman em prol da solução para os divergentes em pauta, que existiam na EDQ, eram formalismos covariantes equivalentes. Essa EDQ renormalizada passaria a ser chamada simplesmente de EDQ (*Quantum Electrodynamics* – QED), com Dyson proporcionando a S. Tomonaga o convencimento por ele buscado desde 1946 e a efetiva credibilidade junto aos pares como um dos autores dessa EDQ. Tem-se, portanto, construída uma TQC que proporciona interação entre o campo eletromagnético e a matéria onde operadores de campo se encarregam, no espaço-tempo, do mecanismo de criar e aniquilar partículas (DYSON, 1949).

A EDQ forneceu aos pesquisadores resultados teóricos que se ajustavam de maneira muito precisa aos dados experimentais. No esforço por otimizar cada vez mais a EDQ, o físico indiano Suraj N. Gupta publicou em 1950 um artigo que aborda o comportamento de fótons, considerado pelos pares da comunidade científica como uma relevante contribuição à TQC (GUPTA, 1950).

Haja visto o sucesso da EDQ e as comprovações de Dyson, outros caminhos para se realizar a renormalização continuam a ocupar a pauta de pesquisa dos pares da TQC. Assim procede S. M. Dancoff, que continua suas pesquisas iniciadas na década de 1930, e ainda presentes em 1950, com igual propósito ao de I. Y. Tamm, ou seja, sair das limitações da teoria da perturbação, utilizando método não-perturbativo. Essa realidade se comprova pelo artigo Dancoff (1950) no qual seu autor obteve semelhantes resultados aos obtidos em Tamm (1945), passando a literatura científica a registrar tais estudos como *Método Tamm-Dancoff*, ou seja, um procedimento pertencente aos métodos de cálculos em TQC, com o fito de eliminar divergências nessa.

No ano de 1951, tem-se o lançamento do livro *Cinquenta anos da teoria quântica*, por Arnold J. W. Sommerfeld e Friedrich A. Bopp (Fritz Bopp), que celebra o evento em título, valendo mencionar que Heisenberg foi aluno do primeiro autor e orientador do segundo, tendo os três em comum a Universidade de Göttingen, Alemanha. Ao longo dos anos, Bopp (1909-1987) tornou-se especialista em TQC e contabiliza entre seus alunos de doutorado o físico também alemão Rudolf Haag (1922-2016), que contribuiu para se ter uma formulação algébrica local, mediante seus axiomas, aplicada à TQC (SCHROER, 2016), tendo ainda publicado vários artigos e livros como também orientado físicos de diversos países, estando entre esses físicos brasileiros (contribuição essa posteriormente narrada, detalhadamente, no capítulo IV dessa tese).

Nessa década, merece também destaque o ano de 1954 pelo resgate da ideia de invariância de calibre (*gauge*) em Mills & Yang (1954), que afirma que as interações existentes entre partículas elementares são regidas por essa invariância.

Entende-se calibre como o formalismo (procedimento) matemático peculiar que objetiva otimizar os graus de liberdade da função lagrangiana, procedimento esse usualmente denominado de transformação de calibre. Tal afirmação tem implicações no melhor

entendimento de simetrias locais de calibre e na imediata sustentabilidade da Teoria de Calibre como aquela que estuda os mecanismos que regem as interações entre essas partículas (WEYL, 1931).

Fundamentada na evolução das pesquisas e respectivos artigos anteriormente citados, e por conseguinte atendendo ao seu formalismo conceitual, a EDQ é uma teoria quântica de campos relativística e abeliana²⁸ de calibre (gauge), com grupo de calibre U(1), ou seja, invariante por transformação de simetria de calibre nesse grupo, cujo campo de calibre que intermedia as interações, de spin $1/2$, é o campo eletromagnético, que se manifesta sob a ação do fóton que é um bóson de calibre (gauge) não massivo; a força que a rege portanto é a eletromagnética, a constante de acoplamento é 10^{-2} e o alcance (medido em metro) é infinito. As interações entre a partícula e a antipartícula (respectivamente elétron e pósitron) são descritas por função lagrangiana, onde se apresentam na equação dessa função os campos eletromagnéticos da partícula e sua antipartícula (DIRAC, 1927,1928ab; FEYNMAN, 1948ab; FEYNMAN 1949ab).

Ocupando-se agora de exemplificar a interação descrita pela EDQ, em linguagem física-matemática, adotando-se a notação mais usada nos artigos, a lagrangiana da EDQ pode ser escrita, conforme a seguir:

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m) \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

em que ψ são campos espinoriais²⁹, componentes de um espinor (“bispinor”), $\bar{\psi}$ é o dual desses campos (“Dirac adjoint”); γ^μ é a matriz de Dirac (4 matrizes 4x4)³⁰, $F_{\mu\nu}$ é o tensor

28 Uma TG que se ocupa de analisar as invariâncias e simetrias a elas vinculadas é classificada como abeliana se o grupo de simetria ao qual ela pertence atende propriedade específica que é comutativa quando em operação binária; em caso contrário, a TG é classificada como não-abeliana WEIL (1931, pp. 113-118).

29 São quatro componentes complexas.

30 $\gamma^\mu = \{\gamma^0 \gamma^1 \gamma^2 \gamma^3\}$

do campo eletromagnético e $F^{\mu\nu}$ o dual desse tensor; D_μ é a derivada covariante de calibre e m é a massa do elétron³¹.

Para melhor entendimento de procedimentos que conduzem a essa lagrangiana, com pertinentes analogias, é oportuno recordar, em nível de breve abordagem, que a mecânica newtoniana, que se alicerça na hipótese de ação a distância, experiencia uma nova realidade trazida pela mecânica quântica (MQ), que consiste em se determinar grandezas físicas, mediante a não existência de ação à distância instantânea, que em linguagem mais simplificada, inicialmente pode ser entendida pela influência que uma carga elétrica registra quando diante de outra, podendo tal realidade ser em condições relativistas ou não relativistas.

Por sua vez, essa realidade é fruto de se substituir o ente físico newtoniano trajetória pelo quântico denominado campo, em que esse tem infinitos graus de liberdade, com valor definido para cada ponto do espaço. Para a obtenção desse valor pontual na MQ é utilizada uma função de onda, ao passo que na TQC, por considerar a Relatividade Restrita (Especial), em vez de se empregar essa função utiliza-se o operador de campo, impondo-se seguidamente novas relações de comutação e/ou anticomutação, estando assim os campos quantizados (DIRAC, 1927, 1928a; FEYNMAN, 1949a; LOPES, 1960).

31 Para intentos presentes e ulteriores, o autor dessa TD, considera pertinente para o leitor não iniciado na temática, entender que quando acelerados, em colisão, os elétrons emitem energia sob a forma de fótons, portanto, interessa analisar o elétron quando em colisão, acelerado, nas suas diversas formas de espalhamento, regidas pelas interações fraca e eletromagnética, movendo-se em relação aos campos magnéticos externos e a um observador (LOPES, 1960, 1981). Por sua vez, é oportuno também entender que a presença da força eletrostática de Coulomb sobre o elétron pode provocar a criação de um par virtual elétron-pósitron, sendo esse pósitron atraído pelo elétron original (nu), enquanto que o elétron que fora criado (modificado, vestido), ou seja, blindado (porque envolto por uma nuvem de pósitrons virtuais) é repellido. Essa condição de elétron vestido, corresponde ao que se entende como elétron gerador de corrente elétrica nos condutores elétricos. Este fenômeno físico que produziu a blindagem da carga (que tornou o elétron vestido) é denominado polarização do vácuo, o que faz do vácuo ser entendido como uma região atômica não vazia e, portanto, com constante dielétrica de valor maior que 1, já que a carga efetiva do elétron criado (vestido) é menor do que seu valor despido (nu, original) (DIRAC, 1928, 1929, LOPES, 1960).

Por seu turno, a necessidade de calcular amplitudes de probabilidade de uma partícula para viajar (“ir e/ou vir”) de um ponto para outro do espaço em determinado intervalo de tempo, com ou sem interações com outras partículas, conduz ao uso em TQC de função matemática que correlaciona esses pontos para descrever a “viagem”, sendo tal função denominada propagador, a qual também pode informar sobre a energia e/ou momento necessários para a viagem, ou seja, fisicamente o propagador registra para cada ponto do espaço, que corresponde ao seu valor, a informação transportada pela partícula carregada, que em linguagem um pouco mais formal, pode-se afirmar que ele descreve, mediante uma amplitude de transição, a evolução do sistema quântico para ir de um estado inicial para um estado final. Pela contribuição da matemática, essa função do propagador, na maioria das vezes, é a solução de uma equação diferencial não-homogênea, denominada função de Green (ver seção 1.1 dessa TD) (DIRAC, 1933a; FEYNMAN, 1948b; LOPES, 1960).

Desconsiderando no tempo influências perturbativas sobre a partícula, a ideia, portanto, é que em se conhecendo o seu estado inicial e o seu propagador se poder descrever a evolução temporal da partícula.

Em TQC (condição relativista) o propagador tem, portanto, a propriedade de ser uma função invariante de Lorentz (que não se altera para quaisquer que sejam os observadores que se movem, um em relação ao outro, dentro de um referencial inercial) que registra a amplitude de probabilidade da partícula viajar entre dois pontos do espaço-tempo e podem ser classificados em vários tipos, tais como propagador escalar e propagador vetorial (LOPES, 1960).

O propagador é definido como escalar quando descreve um campo escalar, aqui em pauta um campo escalar livre (campo de Klein-Gordon), ou seja, um campo em que não há interações e as partículas têm spin zero. Por sua vez, o propagador de campo escalar livre pode ser do espaço de posição ou do espaço de momento. Em sendo do espaço de posição, corresponde à função de Green para a equação de Klein-Gordon no espaço-tempo de Minkowski. Se do espaço de momento, corresponde à transformada de Fourier (série de Fourier) e se vinculam às condições de contorno e causalidade da função. (GORDON, 1926; KLEIN, 1926; DIRAC 1928a; LOPES, 1960).

Um propagador de significativa utilização em TQC é o propagador de Dirac, que é empregado para férmions (partículas de spin com valor fracionário), sendo-o aplicado ao elétron e a sua antipartícula (DIRAC, 1928ab).

Já o denominado propagador de Feynman goza de maior aplicação por ser amplamente usado em EDQ para descrever interações entre partículas, antipartículas e mediadores de interação, sendo-o também representado por desenho geométrico que compõe o denominado diagrama de Feynman. Vários são os métodos para se calcular (determinar) o propagador, sendo em TQC e EDQ o método das *Integrais de Caminho de Feynman* o mais utilizado (FEYNMAN, 1948b).

Até 1956, ainda se mantinha o entendimento de que as leis físicas conservavam a simetria por paridade, mas a partir deste ano, com a publicação de Lee & Yang (1956) e seguidamente com o experimento descrito em Wu et al. (1957), demonstrou-se a quebra de simetria de paridade na interação fraca, embora mantida na interação eletromagnética. Por seu turno, no ano de 1961, ao universo das partículas elementares, mais uma partícula é adicionada, pois as pesquisas do físico experimental de origem palestina Aihud Pevsner (1925-2018) e colaboradores conduziram ao descobrimento da ressonância (partícula), de origem mesônica, denominada **eta** e representada pela letra η (PEVESNER et al., 1961, p. 421).

Nos dois próximos anos, o físico Schwinger apresenta aos pares a alternativa de se estudar a EDQ por modelos bidimensionais, no artigo Schwinger (1962), e em 1963, pela abordagem por ele realizada para esses modelos no evento *Trieste Lectures*, ocorrido na Itália e organizado pelo IAEA (International Atomic Energy Agency).

Referenciada na EDQ, e portanto no comportamento do seu grupo de simetria $U(1)$, nos anos de 1967- 69, a Cromodinâmica Quântica (CQD) vai se estabelecendo como uma TQC não abeliana de interações fortes, regida pelo grupo de simetria $SU(3)$, nascida a partir das contribuições de vários físicos, principalmente Oscar Greenberg, Yoshiro Nambu e Moo-Young Han, que entre os conteúdos seminais proporcionados se destacam, graus de

liberdade, carga cor, simetria e quiralidade³² (GREENBERG, 1964, NAMBU & JONA-LASINIO, 1961a, HAM & NAMBU, 1965).

A década dos anos de 1970 se inicia e nos primeiros anos, entre 1971 e 1973, mais uma TQC é criada, denominada Modelo Padrão (MP), para o estudo e descrição das partículas elementares, mais particularmente para descrever os férmions e bósons³³(ver Fig. 4), e as interações (forças) fundamentais da natureza: a eletromagnética, a forte e a fraca, excetuando-se a interação gravitacional (LOPES, 1981).

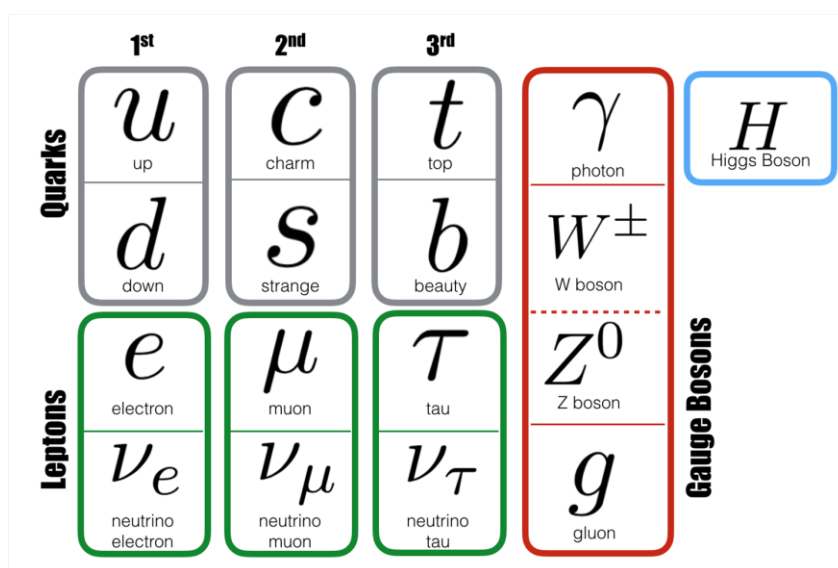


Fig. 4 As partículas elementares que compõem o Modelo Padrão

Fonte: < <https://www.physik.uzh.ch/en/researcharea/lhcb/outreach/StandardModel.html> >

32 Em EDQ, simetria quiral significa que a partícula ao realizar rotação implica na existência de invariância sob paridade, tal como registrada em um férmion de Dirac (NAMBU; JONA-LASINIO, 1961a).

33 Férmions são partículas fundamentais, com valor de spin semi-inteiro (1/2, 3/2...), que obedecem ao Princípio de Exclusão de Pauli, e atendem a estatística quântica (distribuição) de Fermi-Dirac. Os bósons são as partículas fundamentais, com valor de spin inteiro (1, 2...), que não obedecem a esse princípio e atendem à estatística quântica (distribuição) de Bose-Einstein (LOPES, 1960).

1.3 ORIGENS DAS PESQUISAS EM TQC E EDQ NO BRASIL

No início do século XX, que tem o ano de 1918 como marco do fim da Primeira Guerra Mundial e 1920 que marca a criação da Universidade do Rio de Janeiro, nascem nesses anos, respectivamente, duas personalidades, José Leite Lopes (1918- 2006) e Jayme Tiomno (1920- 2011). No ano de 1937 essa instituição passa a ser denominada Universidade do Brasil e tem em seu organograma a Faculdade Nacional de Filosofia, Ciências e Letras (FNCL), faculdade em que se tornariam mais tarde, Jayme Tiomno em 1941 e J. L. Lopes em 1942, bacharéis em Física.

Por sua vez no ano seguinte, 1943, Leite Lopes, mediante bolsa de estudos, migra para São Paulo capital, para estudar física de partículas na USP, sob a orientação de Mário Schönberg (1914-1990), que está entre os físicos que pesquisam como eliminar as divergências que surgem nos cálculos de parâmetros do elétron, tal como nos valores da sua energia, já observadas desde 1928 quando se utiliza para cálculo desses a EDQ de Dirac. Os estudos desses físicos visam eliminá-las sem a utilização da renormalização. Dessas pesquisas nascem os artigos Schönberg (1948a) e Schönberg (1948b).

O Brasil dessas décadas é país aliado dos EUA e dentre as cooperações entre essas nações tem-se o intercâmbio de cientistas.

Convencido e decidido pela especialização na área de Física de Partículas, em 1944, por indicação de Schönberg, Leite Lopes insere-se nesse intercâmbio na busca por agregar valores ao seu currículo, com bolsa do Governo dos EUA. Dirigiu-se para a Universidade de Princeton para cursar o doutorado em física, sob a orientação de W. Pauli e Josef Maria Jauch, com anteprojeto intitulado *High energy neutron-proton scattering and the mesons theory of nuclear forces with strong coupling* (Espalhamento nêutron-próton em alta energia e a teoria mesônica de forças nucleares com acoplamento forte).

Leite Lopes permanece vinculado à Universidade de Princeton até 1946, ano em que faz a defesa da sua tese de doutorado de igual nome ao do anteprojeto, sobre o espalhamento próton-nêutron e o comportamento de mésons nucleares. No ano seguinte, Tiomno é contratado pela USP como professor assistente de Física Teórica (conforme *Curriculum Vitae* de cada um desses físicos). Em 1947, com o seu doutorado concluído, Lopes dá

continuidade a outros estudos já em desenvolvimento, com destaque para Lopes (1947) intitulado “On the divergences of quantum electrodynamics” e Lopes & Tiomno (1947) sobre o espalhamento entre prótons.

Nesse ínterim o Brasil passa por mudanças, entre as quais a deposição do presidente Getúlio Vargas em 1945, assumindo o comando do país o governo provisório do magistrado José Linhares (SKIDMORE, 2000), com consequentes reestruturações do organograma universitário, estando entre essas as mudanças na então FNCL, que passa a ser denominada, ainda nesse ano, Faculdade Nacional de Filosofia (FNFi).

Com as relações cortadas entre o Brasil e a Rússia, somando-se as demais pressões investidas contra os brasileiros de ideologia comunista, entre esses vários professores universitários, o Brasil de 1947, que tem como seu chefe de estado o militar marechal Eurico Gaspar Dutra, mantém a cooperação econômica conjunta, com os EUA, que tem Harry Truman como presidente (SKIDMORE, 2000).

Apesar das insatisfações reinantes entre várias classes sociais, inclusos aqui professores e estudantes em nível secundário e universitário, o Brasil produz bons trabalhos nessa década, tanto nos segmentos artísticos e literários quanto científicos, com a física e os físicos brasileiros dando continuidade às suas pesquisas, mais particularmente em física de partículas, aqui representadas em 1948 pelas pesquisas na USP em que o físico M. Schönberg apresenta à comunidade científica conclusões referentes à continuidade dos seus estudos sobre a teoria quântica do elétron pontual, que, embora no formalismo clássico, representa esforços do físico para minimizar os infinitos indesejáveis nos valores dos parâmetros característicos do elétron, conforme SCHÖNBERG (1948a, p. 738):

Um novo tratamento da teoria quântica do campo eletromagnético é discutido. As interações entre as partículas e suas interações com o campo de radiação são tratadas de acordo com as idéias da teoria clássica do autor. [...] Em nosso formalismo é possível evitar todas as divergências por meio de uma escolha adequada da função de onda das partículas do sistema mais o campo. [...] Existe também a possibilidade de obter auto-energias finitas e que não desaparecem.

As então divergências são ainda, no mês de outubro desse ano, assim analisadas pelo físico brasileiro em SCHÖNBERG (1948b, p. 748):

As divergências da teoria dos mésons são evitadas, usando um método introduzido pelo autor em eletrodinâmica quântica; o método é elaborado para o caso de mésons com carga pseudo-escalar. As forças quase estáticas entre os núcleons³⁴ são tratadas como ações relativísticas à distância; dois pseudos escalares complexos independentes são usados na descrição do campo mesônico. Mostra-se que é possível escolher separadamente o tipo de força nuclear e a interação com o campo mesônico, devido ao tratamento com ação a distância. O formalismo, associado às regras especiais de interpretação, conduz às probabilidades de transições finitas; ele também pode ser aplicado a problemas de auto-energia e conduz a valores de auto-energias e momentos magnéticos finitos. No cálculo das auto-energias e dos momentos magnéticos, aparecem duas constantes, que podem ser escolhidas de modo a dar diferentes massas ao próton e ao nêutron.

A credibilidade como cientista de Schönberg somada ao talento em física de Tiomno e a cooperação econômica conjunta entre Brasil e EUA contribuem para que nesse ano de 1948 Tiomno adquira bolsa de estudos na Universidade de Princeton, EUA, para obter a titulação de Mestre em Artes (Física).

Nesse período, no Brasil, a física quântica está presente em cursos de Física, em nível de graduação, na Faculdade Nacional de Filosofia (FNFil) no Rio de Janeiro e na Faculdade de Filosofia e Letras da Universidade de São Paulo (USP), nessa, com contribuições relevantes de Schönberg, conforme já citadas. Mas as condições para pesquisa não eram plenamente satisfatórias, destacando-se a negativa dada pela Universidade do Brasil de investir em pesquisa de partículas e TQC.

Sendo assim, prevaleceu entre os físicos interessados a ideia de se criar no Rio de Janeiro, uma instituição privada para pesquisa em física, com foco em física de partículas e física nuclear, em nível de pós-graduação. Fundou-se assim o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), em 15 de janeiro de 1949. A fundação do CBPF teve o apoio de alguns políticos, de militares como o almirante Álvaro Alberto, do economista Rômulo Almeida e do prestígio do físico Cesar Lattes (1924-2005), tendo ainda entre seus sócios fundadores

34 Perdurou até a década de 1960 a ideia de que o núcleo do átomo era formado unicamente por núcleons (prótons e nêutrons), conforme introduzida pelo físico Heisenberg (seção 1.2), daí o termo (a palavra) núcleon para se referir tanto ao próton quanto ao nêutron. Mas após essa década, a partir da publicação do artigo de Gell-Mann (1964), a Cromodinâmica Quântica (CQD) se encarregou de mostrar que além de prótons e nêutrons existem os *quarks*, que são partículas elementares da natureza dotadas de carga elétrica, massa, carga de cor e *spin*, sendo encontrados seis tipos de quarks na natureza: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* e *top*.

os físicos Elisa Frota-Pessoa (1921-2018), Jayme Tiomno, José Leite Lopes e outras personalidades (LOPES, 2010).

Com a recém defendida tese de doutorado em mente, em 1949, Leite Lopes volta aos EUA, desta vez para pesquisar no Institute for Advanced Study (IAS), em Princeton, que era dirigido pelo físico estadunidense Julius Robert Oppenheimer (1904-1967). Com uma bolsa de estudos da *John Simon Guggenheim Memorial*, Leite Lopes realizou pesquisas nesse instituto durante o período 1949-1950. Dessas pesquisas, resultou o artigo intitulado “The nucleon magnetic moment in meson pair theories”, publicado nos Anais da Academia Brasileira de Ciências (1949) e *Physical Review* (1950), sobre o momento magnético do núcleon (próton ou nêutron), no qual se lê:

A contribuição para o momento magnético do núcleon, a partir de uma interação do núcleon com um *spinor* ou campo de pares de méson escalar, é calculada. Em ambos os casos, é considerada logaritmicamente divergente.

As áreas comuns de pesquisa em física de partículas, o convívio no IAS e a vizinhança desse instituto com a Universidade de Princeton, criaram nos EUA o ambiente favorável para que em 1949 Leite Lopes tivesse o seu primeiro encontro com Feynman, assim descrito em LOPES (2010, p. 41):

[..] Eu o conheci nos Estados Unidos, em 49. Em 50, o convidei para que viesse; conseguimos um dinheiro, já não me lembro como. Ele teve o ano sabático de 51 a 52, que veio passar no Rio, conosco.

Lopes aproveitou o ensejo e ofereceu turmas, no Rio de Janeiro, do curso de graduação em física da FNFi e disciplinas no CBPF para Feynman nessas instituições lecionar, conforme continua a relatar no documento anterior em igual página:

[...] Eu era professor na Faculdade de Filosofia, Lattes era professor de Física Nuclear e uma cadeira minha de Teoria Eletromagnética passei ao Feynman para que ele desse. Aprendeu português, falava razoavelmente, deu o curso o ano inteiro na Faculdade de Filosofia e no Centro [CBPF].

Ações e iniciativas como as de Leite Lopes e outros físicos de partículas elementares da natureza, somaram-se no Brasil como catalisadores para que se fundassem novos núcleos de pesquisa em TQC aludida ao formalismo da EDQ, ou se ampliassem os núcleos já existentes, no período de 1948 a 1980.

Além dessas ações, em prol da continuidade de pesquisa em EDQ, na USP liderada inicialmente nessa área por Schönberg e no CBPF por Leite Lopes (início em 1951), essas ações reverberaram na UFRGS, na PUC e UFSCar.

Nesse contexto, somam-se os intercâmbios entre físicos brasileiros e estrangeiros, para agregar novos valores à física brasileira, facilitados por bolsas de estudos para nossos físicos. John A. Wheeler, que fora orientador de Feynman, orientou também o físico brasileiro Jayme Tiomno. Nesses intercâmbios de maior proximidade, destacam-se, ainda, as participações de Tiomno, no período de 1949 a 1950, por trabalhos conjuntos, com E. P. Wigner e C.N. Yang (esses dois últimos físicos futuros ganhadores do prêmio Nobel) e, mais particularmente, a parceria entre o físico estadunidense Feynman e o físico brasileiro José Leite Lopes, sendo que o primeiro encontro entre esses dois ocorreu em 1949 no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, EUA (LOPES, 2010).

Mesmo sendo um físico de intensa pauta de pesquisas e logros já conquistados, Feynman encontrou tempo e dedicou-se, com especial atenção, à física brasileira (como veremos no capítulo III), por um interesse de ver também nascer no Brasil uma especialidade da Física Quântica, TQC pelo formalismo conceitual da EDQ renormalizada, de modo que não deixasse o país distante dos grandes centros internacionais de pesquisas físicas nessa especialidade, unindo-se ainda a essa proposta o fato de ser também o Brasil o país onde ele encontrava seus amigos de outrora e, portanto, podia aqui associar a pesquisa ao ensino, ao lúdico e à aprendizagem do idioma português.

Fato é que nas suas estadas pelo Brasil, Feynman não se limita apenas a fazer palestras sobre EDQ, mas procura também contribuir para uma melhor formação teórica e prática dos nossos físicos nessa disciplina. Nesse sentido, registra-se ele aumentando sua jornada de trabalho nos centros de pesquisas brasileiros, comparecendo à reunião anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), publicando junto com físico brasileiro, mobilizando-se para adquirir livros para a biblioteca de centro de pesquisa, e incentivando sempre os intercâmbios entre as instituições de pesquisas físicas brasileiras e as dos EUA (LOPES, 1988).

Na década de 1950, também, a Teoria das Distribuições se torna uma importante ferramenta matemática para a teoria das partículas elementares, ao lado da Teoria de

Grupos, com uso efetivo pelos físicos especializados em TQC, estando entre esses os da USP, que graças aos intercâmbios com matemáticos franceses introduziram essa ferramenta e outros conteúdos pré-requisitos à TQC e à EDQ no Instituto de Física dessa universidade (SCHROER, 2009, p. 6).

A fundação do Instituto de Física Teórica de São Paulo (IFT) ocorreu em 14 de junho de 1952 e ao longo da década de 1950 teve ampliado o seu quadro de docentes e pesquisadores, principalmente com professores estrangeiros, especializados na área de TQC, alguns tendo a Alemanha como país de origem, estando entre eles o Prof. Werner Güttinger, proveniente do Instituto de Tecnologia de Aachen. Nascido em 1925, Güttinger concluíra seu doutorado em 1953, com a tese intitulada *Sobre o tratamento analítico de distribuição da teoria do campo quântico*, pela Universidade de Tübingen.

Esses professores atendiam aos propósitos de formar bacharéis, licenciados, doutores e pesquisadores, nessa área da física, conforme se lê em UNESP (2018):

Na década de 1950, o IFT presenciou a vinda de muitos professores estrangeiros [vindos] do Max Planck Institut für Physik, de Göttingen, Alemanha, [...] e o Prof. Werner Güttinger, do Instituto de Tecnologia de Aachen, que permaneceram no IFT por um período de dois anos.

No início da década de 1960, a USP contrata Güttinger, que permaneceu no IFUSP por um período de dois anos, o suficiente para, entre outras atividades desenvolvidas, orientar o físico brasileiro Jorge André Swieca (1936-1980), que iniciou o doutorado em 1961 e concluiu em 1963, com a tese que aborda as aplicações do *Método Tamm-Dancoff* (atualizado) em TQC. Ulteriormente, ano de 1967, Swieca foi nomeado professor pesquisador assistente, tendo entre suas funções as atividades de orientações de alunos e publicações, atividades essas que contribuíram para proporcionar credibilidade ao IFUSP como centro de pesquisa em EDQ, ainda nessas décadas.

Já o CBPF, principalmente pela liderança funcional/regimental e intelectual de Leite Lopes, manteve-se em igual linha de trabalho para alcançar seus objetivos de também ser um centro de referência para pesquisa em EDQ no Brasil. Esse centro intensificou os intercâmbios científicos nessa área da física e correlatas, promoveu a vinda ao Brasil de líderes de pesquisa, principalmente, nas três interações fundamentais da natureza, a forte, a fraca e a eletromagnética, e nas quais também se especializaram (não oficialmente,

nesses anos) físicos em EDQ. Essas atividades que, também, se estenderam às décadas de 1960 e 1970, podem ser ainda entendidas, nessa TD, pelas frases de LOPES (2010, p. 45):

[...] Feynman dava cursos avançados no CBPF [...] veio um alemão especialista em alto-vácuo, Helmut Schwartz, e instalou uma oficina de alto-vácuo [...] cursos do [Guido] Beck, cursos do Molière, seminários, do Tiomno, esse pessoal todo trabalhando [...] A UNESCO nos mandou também o Hepp que era um teórico da Phillips da Holanda [...] Então formou-se um verdadeiro pequeno Centro sério, [...].

Essas ações renderam pesquisas relevantes, com reconhecimento internacional, entre essas as realizadas por Leite Lopes sobre a interação fraca, conforme em LOPES (2010, p. 103):

[...] estávamos ali fazendo Física atual, viva, Teoria dos Campos, Teoria das Partículas [...] Os trabalhos foram publicados, pesquisa viva feita pelo Centro [...].

A UFRGS, que foi formalmente fundada em 1954 e seu Instituto de Física em 1959, mobiliza-se e, ainda nesse ano, contrata o físico holandês Theodor A. J. Maris (1920- 2010), que a partir de então imprime um ritmo de ensino, pesquisa e publicações em periódicos de credibilidade internacional. Maris fora orientado por Fritz Bopp, mencionado anteriormente, concluindo sua tese em 1954, pela universidade de Munique, intitulada *Sobre a interpretação estatística da entropia em processos não-estacionários* (DILLENBURG; JACOB, 2003).

Como líder de pesquisas em TQC, ainda no contexto da UFRGS, T. Maris publica artigos em EDQ, tais como “Broken symmetries and electron-muon problem” (MARIS et al., 1964b), continuando com a ampliação da abordagem desse artigo no ano seguinte (MARIS et al., 1965). Neste ano de 1965, a pós-graduação foi oficializada no Brasil, proporcionando maior visibilidade e estímulo para docentes e discentes pesquisadores.

Seguidamente, Maris participa de experimentos de simetria, cooperando com a orientação de aluno para desenvolver a temática *Radiação gama e testes de simetria*, em nível de mestrado, cuja dissertação foi defendida em 1968, sendo nessa abordadas as invariâncias de forças nucleares perante transformações discretas de Paridade (P), Inversão Temporal (T) e Conjugação de Carga (C), embora o foco seja as duas primeiras, ao tempo em que defendem a tese de não ser possível em TQC existir interação entre partículas elementares que quebrem a simetria (a combinação, também denominada produto) PCT (SCHERER,

1968). O ritmo de trabalho em pesquisa, com semelhante dinâmica, prossegue na década seguinte, anos de 1970, tendo entre os temas prioritários de pesquisa em TQC as simetrias, suas violações e quebras espontâneas em EDQ.

No Brasil, ocorre o Golpe Militar em 1964, com suas perseguições políticas a cidadãos de vários segmentos sociais, estando entre esses físicos brasileiros com credibilidade no exterior, a exemplo de José Leite Lopes. Observa-se que, apesar do regime militar, o Brasil teve significativa produção em TQC, mais particularmente na descrição das interações fraca e eletromagnética.

A PUC-RJ, por sua vez, que teve em 1965 e 1968 respectivamente a implantação da pós-graduação em física nas modalidades de mestrado e doutorado, tinha entre suas linhas de pesquisa a EDQ, estando entre seus orientadores J. A. Swieca, a partir do ano de 1971. Na sua estada pela PUC, foram vários os orientandos dele, com respectivas publicações; entre essas destaque, com Valério Kurak, seu aluno de doutorado, o artigo Kurak, V.; Schroer, B.; Swieca, J. A. "Comments on confinement criteria", publicado no ano de 1978, no qual procura-se avaliar as aplicações possíveis da Eletrodinâmica Quântica em duas dimensões (EDQ2), extensiva a outras interações fundamentais, tal como a sua viabilidade para campos de quarks³⁵.

Ao longo dos anos, a graduação em física tivera seus currículos atualizados e a pós-graduação seguiu sua trajetória. A TQC por sua vez continuou sendo desenvolvida no país, sendo tema de várias atividades científicas, realizadas por diversos físicos que investiram no seu ensino e pesquisa. As principais instituições, como já vimos, e que serão analisadas quanto à temática dessa tese são USP, PUC e UFSCar, representadas por Swieca; CBPF, representado por Leite Lopes, e a UFRGS, representada por Maris. São itinerários que se apresentam ricos para a história da física brasileira, até agora pouco explorados tanto na

35 O quark, que é somente encontrado confinado (juntamente com outros quarks), obedece ao Princípio de Exclusão de Pauli e segundo o Modelo Padrão (teoria formulado em 1972/1973 que se ocupa de estudar e descrever as partículas fundamentais da natureza e suas interações, excetuando-se a gravitacional) é a única partícula cujo valor de carga não é um múltiplo da carga fundamental, do elétron, sendo ainda específico para o quark a propriedade de interagir pelas forças fundamentais da natureza que são a fraca e a eletromagnética (eletrofraca), a forte e a gravitacional (GELL-MANN, 1964; ZWEIG, 1964).

literatura de física nacional quanto internacional, e que formam o objeto de pesquisa dessa TD, ulteriormente abordado em maior nível de detalhe.

Por sua vez, em 1980, três décadas depois das investidas de Feynman no Brasil, registra-se que a EDQ praticada em nossas instituições mantinha sua inserção internacional pelos intercâmbios científicos, seminários, pesquisas e artigos publicados. Mas 1980 é também o ano que o Brasil registra a morte de Jorge André Swieca, com apenas quarenta e quatro anos de idade; daí a escolha do ano de 1980 como limite final de pesquisa dessa tese.

CAPÍTULO II – CIÊNCIA E TECNOLOGIA NO BRASIL, DENTRO E FORA DOS MUROS DAS UNIVERSIDADES, 1948-1980

2. PANORAMA DO PERÍODO

Num período que perpassa por vários presidentes, turbulências políticas e uma nova constituição para o país, são aqui abordadas as parcelas de instituições, integrantes de diferenciados segmentos do saber e do poder político, que em maior ou menor grau, a despeito de determinadas oposições para investimentos em C&T, contribuíram para o aperfeiçoamento dos nossos docentes e pesquisadores, mais particularmente dos físicos brasileiros natos ou não e os estrangeiros, atuantes no país, possibilitando-os interagir com as comunidades científicas de credibilidade, seus pares, dentro ou fora do Brasil. Para tal narrativa, dois olhares gozam de maior foco que são os direcionados para a CAPES e o CNPq.

2.1 CONTEXTO SÓCIO-ECONÔMICO E POLÍTICO-CIENTÍFICO DO BRASIL

O primeiro governo do presidente Getúlio Dornelles Vargas se iniciou em 1930 e findou em 1945, sendo dividido classicamente em três etapas: Governo Provisório (1930-1934), Governo Constitucional (1934-1937) e Estado Novo (1937-1945). Os quinze anos da Era Vargas tiveram características ditatorial, nacionalista e populista, e esse governo, embora com essas características por muitos indesejáveis, foi também marcado por conquistas sociais, aos exemplos da criação da Justiça Trabalhista, com a Consolidação das Leis Trabalhistas, e o nascimento dos Sindicatos; obras de infraestrutura como a criação de empresas estatais representadas pela Companhia Siderúrgica Nacional, Companhia Vale do Rio Doce e a Hidrelétrica do São Francisco, registrando-se ainda modesto apoio à ciência e pesquisa, a exemplo do proporcionado ao Instituto Nacional de Geografia e Estatística.

Portanto, haja visto os esforços do Governo Vargas, suas ações em 1945 eram consideradas tímidas diante de um contexto internacional de pós-guerra e de busca de soberania. Entre os insatisfeitos no Brasil estavam segmentos sociais e grupos militares, o que culminou com a tomada do poder por esses, em 29 de outubro de 1945 seguida de eleições gerais em 2 de dezembro, ainda nesse ano. Assim o país saiu de um sistema não muito favorável à pesquisa em Ciência & Tecnologia (C&T), sendo que era praxe daquele

governo o controle da imprensa e da propaganda de forma oficial, exercida pelo órgão nacional que nesse governo foi criado e denominado de Departamento de Imprensa e Propaganda.

Essa mudança de governo, dentro do que era chamada de busca da democratização, se deu mediante uma transição de governo desde a data do golpe militar até as eleições gerais, na data anteriormente citada, vencida pelo general Eurico Gaspar Dutra, candidato oficial apoiado pelo então governo, eleito pelo voto popular, iniciando o seu mandato em 1946 e findando-o em 1951.

Com o compromisso de democratizar o país, Dutra, em seu governo de base eminentemente capitalista, alinhou suas plataformas sócio-econômica e político-científica com os EUA, que de pronto ele visitou, assim como fez com outras nações desse bloco, declarando formalmente o rompimento de relações com a União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) e nações de iguais ideologias políticas a essa.

No compromisso de cumprir o prometido ao eleitorado brasileiro, uma das primeiras medidas de Dutra, e a de maior impacto, foi a elaboração de uma nova lei magna para o país, a Constituição de 1946, que entre outros feitos ratificou os direitos primordiais de liberdades existentes na Constituição de 1934 e que vinham sendo desobedecidos pelo governo anterior, além de restabelecer eleições diretas em nível municipal, estadual, federal e inclusive para presidente da República. Esses direitos, sumariamente, eram aqui representados pela liberdade e igualdade de todos os brasileiros perante a lei, permissão para formação de associações no país, liberdade de manifestação de pensamento, com garantia de direito de defesa para os indivíduos acusados e o fim da censura, existindo apenas para eventos como espetáculos destinados à recreação pública (SKIDMORE, 2000).

Essas posturas do governo Dutra certamente criam clima favorável para a liberdade de pensamento nas artes, religiões e principalmente nas instituições científicas. No entanto, apesar de viger em muitas nações o ideal de democracia, em termos internacionais, o ano de 1948 se inicia e transcorre com datas difíceis de não serem lembradas pois, em meio aos esforços pela instalação da paz entre as nações, paradoxalmente no dia 30 de janeiro desse ano tem-se de forma covarde o assassinato do pacifista Mohandas Karamchand

Gandhi, mundialmente conhecido por Mahatma Ghandi, sobre o qual o físico Albert Einstein declarou³⁶: “as gerações por vir terão dificuldade em acreditar que um homem como este realmente existiu e caminhou sobre a Terra”. Contrabalançando o prejuízo social, tem-se no campo científico as conquistas em EDQ, agora protagonizadas por Feynman, Schwinger e Tomonaga, representadas pelos artigos já citados nessa tese.

Por sua vez, em termos nacionais, com o Brasil reiniciando sua democratização e portanto, abrindo novos espaços para a ciência e a cultura, uma das datas de relevo está representada pelo diário carioca *A Manhã*, na sua edição dominical do dia 28 de março de 1948, pois nessa data registra-se a circulação do primeiro exemplar de suplemento de divulgação científica no Brasil, intitulado *Ciência para Todos* (CpT), que traz, à página 1, a manchete *Novos Horizontes para a Física Atômica – A importância dos Trabalhos do Cientista Brasileiro Cesar Lattes*, com redação do físico José Leite Lopes, tendo-se ainda nesse suplemento relatos de pesquisas e descobertas de outros cientistas brasileiros e estrangeiros. Observa-se ao longo dos anos que neste suplemento científico a física goza de significativa posição na preferência por artigos publicados, conforme registro em ESTEVES (2006, p. 74):

Tema	Número de Artigos
Medicina	25
Tecnologia	24
Física	21
Biologia	18
Química	13
Astronomia	10
Geologia	9
Atividades Institucionais	9
Paleontologia	8
Epistemologia	2
Matemática	1
Antropologia	1
Outros	7
Total	148

³⁶ EINSTEIN, Albert. Escritos da maturidade: artigos sobre ciência, educação, religião, relações sociais, racismo, ciências sociais e religião. Tradução de Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1994. Mahatma Gandhi (1939), p. 253.

Outra data de relevo é a do lançamento da revista *Ciência Popular*, um periódico mensal que totalizou 212 edições, em 18 anos, até seu último ano 1966, que nasceu também do anseio da comunidade científica e cultural do Brasil, sob a direção do militar e engenheiro eletricitista Ary Maurell Lobo, com apoio editorial de Edgard Roquette-Pinto. Além de divulgar e difundir o exercício da ciência em solo brasileiro, com tiragem média de 32.000 exemplares distribuídos em todos os estados e territórios do país. Essa revista vem também com uma proposta de cobrança ao governo brasileiro, que é a de planejar e implantar melhores condições de educação básica no país e por extensão criar alicerces para se edificar uma sociedade calcada na cultura, ciência e tecnologia. O talento do diretor e os anseios de intelectuais e da população são assim descritos por SILVA (2006, p. 1-3):

[Ary Lobo] proferiu palestras nas principais rádios da época, inclusive um curso de física na antiga Rádio Sociedade do Rio de Janeiro (hoje Rádio MEC) [...] Para muitos intelectuais do período, o Brasil necessitava desenvolver a ciência e a tecnologia para se tornar competitivo internacionalmente e se livrar definitivamente da imagem de país habitado por “índios” e fadado a ficar à margem da civilização. [...] O grande interesse pelas novas conquistas da ciência despertou, em parcela da população brasileira, a busca por novas informações na crença de que as possibilidades que a ciência apontava representavam uma solução para o desenvolvimento do país.

Ainda nesse ano de 1948, tem-se a criação da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), uma entidade que tem o propósito de reunir pessoas e instituições para promover o progresso da ciência no Brasil, e que já no ano seguinte cria a sua revista intitulada *Ciência e Cultura* como mais um instrumento que, além da divulgação científica, objetivava também agregar os cientistas e pesquisadores brasileiros, contribuindo portanto para criar uma maior massa crítica nessas áreas, conforme narra ESTEVES (2006, p. 83):

No Brasil, houve um grande interesse público pela física nesse período, ligado em parte aos feitos de Lattes, à fundação do CBPF em 1949 e CNPq em 1951.

Portanto, nessa nova atmosfera política, tem-se uma conquista de espaços para instituições científicas e assim elas foram criadas. Cientistas estrangeiros foram convidados para proferirem palestras e lecionarem nas instituições de pesquisa e ensino superior do Brasil, estando entre esses Richard Feynman.

Já o ano de 1950, que antecede às novas eleições e que é marcado pela primeira transmissão de televisão no país e pela instalação da montadora alemã de automóveis Volkswagen, registram-se também as publicações do físico Leite Lopes bem como a sua volta do exterior para lecionar e pesquisar no Brasil. Tramita pelo Congresso Nacional, ainda nesse ano, a lei 1.310 que autoriza a criação no Rio de Janeiro do CNPq, Conselho Nacional de Pesquisas, sendo sancionada nos primeiros dias de 1951, final do governo Dutra.

De volta ao poder, por eleições diretas, Getúlio Vargas inicia o seu segundo mandato e já no ano de 1951, como reflexo das conquistas democráticas do governo anterior, dá prosseguimento ao planejado em prol do CNPq e autoriza a criação da Campanha de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), posteriormente Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. No ano seguinte, autoriza a criação do Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), em 15 de outubro de 1952, localizado no Rio de Janeiro (IMPA, 2018) e em 1953 tem-se, na área da UFMG, criado o Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), conforme em UFMG (1952).

No ano que o Brasil registra a morte do seu conceituado romancista Graciliano Ramos de Oliveira, que tanto mostrou e criticou problemas sociais brasileiros, empenhando-se para minimizá-los, mas particularmente os do Nordeste brasileiro, 1953 é também o ano que registra uma significativa produção intelectual brasileira em diversas áreas da ciência, estando entre essas a contribuição do físico Leite Lopes, então docente da FNFi, ocupando a 9ª posição em publicação na *Ciência para Todos* (CpT), que objetiva a divulgação da ciência no Brasil, conforme aparece em ESTEVES (2006, p. 71):

Autores Brasileiros com mais Contribuições Publicadas em CpT²³

Autor	Instituição	Nº de Textos
Walter da Silva Curvello	Museu Nacional	12
Emanoel de Azevedo Martins	Museu Nacional	6
Cândido Simões Ferreira	Museu Nacional	6
Francisco Benedetti	Sanatório Canavial	6
Werner Gustav Krauledat	Faculdade Nacional de Filosofia	6
Carlos de Paula Couto	Museu Nacional	5
Sebastião José de Oliveira	Instituto Oswaldo Cruz	5
Guilherme Franco	Serviço de Alimentação da Prev. Social	4
⇒ José Leite Lopes	Faculdade Nacional de Filosofia	4

Em 1956, com Juscelino Kubitschek (JK) como presidente do Brasil, inicia-se um período (1956-1961) de política desenvolvimentista, que tinha como marca de campanha “50 anos em 5”; e realmente houve desenvolvimento em vários setores da economia, haja visto os entraves políticos. Mas o governo JK não se destacou em dar ênfase para a ciência de base e tecnologia com raízes nacionais.

O Brasil prossegue e conclui os anos dessa década, mantendo o propósito de continuar com a política de incentivo à C&T, embora com investimentos econômico-financeiros tímidos nessa. A ênfase que se dá, e de forma pontual, é em infraestrutura para ensino e pesquisa, sendo representada principalmente pelo desenvolvimento das instituições militares de ensino e pesquisa federais (do Exército³⁷, Marinha³⁸ e Aeronáutica³⁹), pelas universidades já consagradas, como a USP, e pelas filosofias de atuações do CNPq e da CAPES.

2.2 UMA PAUSA PARA OLHAR PARA O CNPq

A revolução de 1930 ocorrida no Brasil promoveu um convite à sociedade brasileira para que o Brasil saísse de uma economia calcada no setor primário, avançando paulatinamente para o secundário, ou seja, sair da condição de um país de exploração dos recursos naturais e agropecuário para um país industrializado. E é seguindo essa orientação que entre as instituições criadas no país está o CNPq.

Antes da criação desta instituição, no início da década de 1950, tem-se uma significativa mobilização social e científica, com destaque para as atuações da USP, SBPC e Academia

37 A instituição do exército é representada pelo Instituto Militar de Engenharia (IME), que é uma instituição de ensino superior pertencente ao Exército Brasileiro, e foi fundado em 17 de dezembro de 1792, com sede no Rio de Janeiro. Fonte: < <http://www.ime.eb.mil.br/pt/historia.html> >.

38 Representada pela Escola Naval, que é uma instituição de ensino superior pertencente à Marinha do Brasil, cuja origem é portuguesa e foi fundada no ano de 1782, sendo implantada no Brasil em 1808, com a vinda da Família Real para o Brasil. Após várias sedes, a Escola Naval instalou-se, desde 1938, na Ilha de Villegagnon, interior da Baía de Guanabara, na cidade do Rio de Janeiro. Fonte: < https://www.marinha.mil.br/ensino/escola-naval/en_princ >.

39 A instituição da aeronáutica é representada pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), que é uma instituição de ensino superior pertencente à Força Aérea Brasileira, fundada em 16 de janeiro de 1950, com sede em São José dos Campos, SP, cuja pós-graduação se iniciou com a lei federal nº 2.165/54, sendo regulamentada em 1961. Fonte: <www.ita.br>.

Brasileira de Ciência (ABC). O CBPF tinha sido fundado recentemente por um grupo de cientistas e políticos, entre os quais Cesar Lattes, Leite Lopes e Jayme Tiomno, com destaque para o empenho do almirante Álvaro Alberto (MOTOYAMA, 1985, p. 138). É nesse contexto que em 1951, no final do governo Dutra, esse presidente sanciona a lei 1310 que autoriza a criação do CNPq.

O CNPq inicia sua pauta de trabalho, tendo o almirante Álvaro Alberto como seu primeiro presidente, e destacam-se as pesquisas em física, pois queria o almirante um país com política de desenvolvimento, sem excessos de ênfase em física nuclear e sem exagerada dependência dos EUA. O almirante não ignorava que os pesquisadores brasileiros já haviam produzido em física nuclear e de partículas, a exemplo das pesquisas dos físicos Leite Lopes, Tiomno e outros; tanto é que a pauta da primeira reunião do CNPq tem o seguinte item (CNPq, 2018):

Já na primeira reunião do CNPq, dia 17 de abril de 1951, foi discutida a aquisição de um sincrocíclotron (tipo de acelerador de partículas) para o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), que serviria para realização de pesquisas e para o treinamento de pesquisadores.

Ou seja, desejava o almirante que o Brasil iniciasse as pesquisas físicas em física nuclear, uma que vez já existiam no país profissionais especializados em física nuclear e de partículas. E com essa pauta o CNPq trabalha até 1953 com a chamada “política de compensações específicas”, que estabelecia o direito ao acesso à tecnologia nuclear para fins pacíficos para os países possuidores de matéria prima com potencial atômico. É nesse ano que os EUA criam o programa *Átomos para a Paz* e muitas nações aderem, entre essas o Brasil, que de pronto desvincula a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) do CNPq, atendendo ao modelo estadunidense, tendo-se portanto como consequência a minimização de dotações orçamentárias para esse órgão (MOTOYAMA, 1985).

Esses fatos, somados à política de trabalho do almirante, que não agradava nem aos EUA nem à maioria da cúpula das forças armadas brasileiras, mais a saída de Getúlio Vargas, conduziram em 02/03/1955 a que o almirante Álvaro Alberto pedisse sua exoneração do cargo, o que aconteceu, com a respectiva renúncia. Tem-se, portanto, o fim de uma política de compensações específicas que vinha sendo praticada pelo CNPq desde sua fundação (MOTOYAMA, 1996, p. 80).

Mas entre esses fatos está o de que não havia espaço na CNEN e nos centros de pesquisas militares para Lattes, Leite Lopes, Tiomno, Schönberg e outros, pois eram físicos de ideologias contrárias às praticadas então pelos militares.

O CNPq, que ora trabalha com verbas bem menores para pesquisas em diversas áreas, a exemplo da deficiência de bolsas de doutorado e *post-doctor*, contabiliza entre os reflexos imediatos dessa política, o migrar de pesquisadores em nível de doutorado para outras áreas como física nuclear ou partirem para o mercado externo, fora dos muros públicos universitários ou dos centros de pesquisa. Semelhante postura de distribuição de verbas para pesquisa, após suas criações, foram adotadas também pela FAPESP, FINEP e CAPES. E assim 1955 se encerra, registrando ainda a realização de cursos de “pós-graduação”⁴⁰ no CNPq, financiados pela CNEN. Tem-se uma mudança clara de prioridade na política científica brasileira (GORDON, 2003, p. 411).

O ano de 1956 se inicia com a posse de Juscelino Kubitschek, e apesar dos esforços de uma parcela de pesquisadores do CNPq, esse órgão continua a movimentar por mais cinco anos pequenas dotações orçamentárias, minimizando, ainda mais, a sua força como órgão fomentador de pesquisas. Nesse ano, o físico Gerhard Jacob⁴¹, docente e pesquisador no Instituto de Física da UFRGS, frequenta, como aluno de pós-graduação, o Instituto de Energia Atômica (IEA), em São Paulo, e participa da instalação do primeiro reator nuclear do Brasil, nesta instituição. Ele começou pesquisando na área de EDQ, migrando posteriormente para a física nuclear.

Portanto, de 1951 até 1956, a então política de contingenciamento de verbas de pesquisa se mantém, onde a exceção à regra é liberar verbas de pesquisa para algum conteúdo que esteja em evidência em termos mundiais, tendo os EUA como referência. Embora existam internamente no CNPq divergências entre nacionalistas e não-nacionalistas, a literatura especializada constata que a criação do CNPq é marcada por vitórias, vantagens e lucro

40 São usadas as aspas porque nesse ano a pós-graduação no Brasil ainda não estava oficializada.

41 Físico graduado e funcionário de carreira pela UFRGS, Gerard Jacob décadas depois se tornaria reitor dessa universidade (1988-1990) e presidente do CNPq (1990-1991), mais detalhes sobre ele na seção 4.3.

para o Brasil. Com esses valores, quantitativamente, considerados tímidos, no último ano dessa década, o CNPq já realiza suas atividades de fomento tais como:

- concessão de bolsas de estudo, em nível de pós-graduação, para formação e aperfeiçoamento de pesquisadores, no Brasil e no exterior;
- apoio à realização de reuniões científicas nacionais e internacionais;
- apoio ao intercâmbio científico no país e no exterior (CNPq, 2018).

Em meio ao que alguns críticos poderiam classificar como paradoxo, nos anos das décadas de 1960 e 1970 o Brasil tem progresso em C&T, com implantação de indústrias e investimentos em ciência de base. Para os propósitos dessa TD, registra-se que apesar do olhar curto e da falta de maturidade política de determinados governantes para com as instituições de ensino superior e de pós-graduação, o Brasil teve em prol do seu desenvolvimento em C&T alternativas como as de física nuclear e física de estado sólido. Nessas décadas, registra também que a física de partículas, mediante a TQC pelo formalismo conceitual da EDQ, conquistou seu espaço até 1980 (MARQUES, 1990).

Num âmbito mais amplo, apesar das limitações impostas pelo Golpe Militar de 1964, essas conquistas científicas aconteceram devido à Reforma do Ensino Superior implantada em 1968 pelo então presidente da República Federativa do Brasil, marechal Costa e Silva, com a extinção do sistema de cátedras e a respectiva departamentalização⁴² das universidades.

A despeito do regime ditatorial e opressor de 1964 até 1980 (já com o presidente Gal. João B. Figueredo, pois que assume em março de 1979), os investimentos em C&T aumentaram no Brasil, principalmente, com as atuações dos bancos nacionais que foram criados para auxiliar o desenvolvimento do país, entre esses o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDE, depois BNDS) e suas agências estaduais, que incentivaram com recursos econômicos e financeiros as universidades e institutos de pesquisa a dinamizarem suas atividades.

42 A departamentalização consistiu na implantação do modelo de *campus* universitário adotado nos EUA, com algumas adaptações regionais para o Brasil, mas que em essência corresponde a uma organização interna da universidade em departamentos, institutos e centros, com cada um desses situados em prédios independentes, que podem estar distribuídos em áreas geograficamente distantes ou não.

Todavia se registra que algumas universidades e institutos, por falta de diálogo entre pesquisadores e governantes, estacionaram, retrocederam ou não lograram avanços significativos em pesquisa científica e tecnologia, haja visto os esforços de determinadas categorias, a exemplo da SBPC e órgãos ou agências de fomento à C&T, como a FINEP (dirigida pelo economista José Pelucio Ferreira), que são referências de intermediação para negociação entre as partes aqui em foco.

Merece ainda registro aqueles pesquisadores, burocratas ou executivos que mesmo estando à frente de postos de pesquisa ou do lado governamental, confundem-se quanto ao tipo de incentivo e prática de política científico-tecnológica a ser adotada: se C&T, se desenvolvimento científico ou se inovação, mesmo ainda não se conhecendo ou dominando o que se está em vigência, mas querendo o novo pelo novo, além da cruel dúvida de se se deve priorizar o investimento (a alocação dos recursos) em C&T na universidade, em centros de pesquisa ou se alocá-lo diretamente na indústria.

A então situação se agrava, ainda mais, quando o governo quer C&T instaladas no país e a população delas se beneficiando, mas por nenhum desses caminhos e sim pela compra do “pacote pronto” de C&T, sem transferência alguma do saber técnico para o comprador, a exemplo do que acontecera em larga medida⁴³ com o programa nuclear brasileiro no Governo Giesel (1974-1979), em detrimento das pesquisas já desenvolvidas no IEA/IPEN, conforme descreve GORDON (2002, p. 405):

No meio da década de 1970, vimos o esforço despendido por nossos pesquisadores do IEA correr o risco de abandono quando o governo toma a decisão de comprar uma usina totalmente pronta, a despeito do posicionamento contrário da opinião pública, sobretudo da comunidade científica.

E assim, mantendo essa ótica, própria do Regime Militar, entre erros e acertos, o CNPq chega ao ano de 1980, com significativo progresso em prol da C&T brasileira, porque prevalecendo os acertos; certamente com percentual de progresso aquém do esperado por determinadas parcelas que integram os grupos de pesquisas existentes no Brasil naqueles idos.

43 Em larga medida porque, de acordo com o contrato Brasil-Alemanha, firmaram-se alguns cursos de pós-graduação para os pesquisadores brasileiros e também se registrou a criação da pós-graduação no Instituto de Energia Atômica, com essa temática, embora não viabilizasse para esses pesquisadores o exercício do aprendizado adquirido nas décadas seguintes.

2.3 BREVE ABORDAGEM SOBRE A CAPES

Em olhar recuado sobre a CAPES, registra-se que essa instituição, cuja sigla significava, inicialmente, Campanha Nacional de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, foi fundada em 11 de julho de 1951, pelo Decreto nº 29.741, e, portanto, no mesmo ano do CNPq, sendo que esse a antecede. As datas de fundação muito próximas traduzem a ideia de que não seria suficiente criar apenas uma instituição para nutrir a pesquisa científica e tecnológica no país, com a alocação de recursos e crescimento da lista de pesquisadores do Brasil, mas que seria necessário também para o mesmo intento ter-se uma estrutura especializada para administrar o recurso humano, os pesquisadores, e aí se justifica a fundação da CAPES.

A CAPES, tendo inicialmente como secretário geral o professor Anísio Teixeira, nasce portanto com esse propósito que é o de administrar a mão-de-obra que almeja por especialização, em nível de apoio às universidades e instituições de pesquisas, em diversas áreas, principalmente nas ciências de base, cursos técnicos, finanças e de apoio ao desenvolvimento social. Essas atribuições da CAPES estão sincronizadas com os interesses governamentais, no início do segundo governo de Getúlio Vargas, de construir uma nação industrializada e independente.

Por essa ótica, a CAPES implanta no ano de 1953 uma linha de trabalho, junto às instituições citadas, denominada Programa Universitário, pela qual foram concedidas nesse ano 79 bolsas, com os seguintes critérios:

- para utilização no Brasil: 2 para formação e 23 para aperfeiçoamento;
- para utilização no exterior: 54.

No ano seguinte o programa é ampliado, com mais bolsas concedidas, totalizando 155, pelo seguinte critério:

- para utilização no Brasil: 32 para formação e 51 para aperfeiçoamento;
- para utilização no exterior: 72.

E assim a CAPES vai atuando, conforme os propósitos que regeram a sua criação, que são os de fomentar as instituições universitárias na busca constante de especialização dos quadros docentes e de pesquisadores; e para tal toma as seguintes ações: “promove a vinda para o Brasil de professores estrangeiros, estimula atividades de intercâmbio e cooperação científica entre instituições, concede bolsas de estudos e apoia eventos de natureza científica em várias áreas” (CAPES, 2018). A década dos anos de 1950 se encerra, registrando em 1959 a matrícula na USP no curso de pós-graduação, doutorado em física, do aluno Jorge André Swieca; e ainda que não seja pelas vias diretas de atuação da CAPES, mas concorde com a política de especialização por essa implantada, pelos esforços da URGS, chega ao Brasil nesse ano para contribuir com a pós-graduação nessa instituição o físico holandês Theodor A. J. Maris.

Chegada a década de 1960, a CAPES experimenta uma nova forma de trabalho, a partir de 1961, que é a de ser um órgão subordinado à presidência da República; e registra também em 1963 a conclusão da tese de doutorado de Swieca, ulteriormente abordada mais detalhadamente nessa TD.

Com o início do regime militar no Brasil, em 1964, Anísio Teixeira é destituído do cargo, uma nova direção assume o órgão, mantém a sigla e muda o seu nome para Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, e a CAPES volta a ser subordinada ao MEC.

Já sendo consenso a importância e necessidade de se ter cursos de pós-graduação no país, no ano seguinte, 1965, são classificados nas universidades brasileiras pela CAPES, em nível de mestrado, 27 cursos e em nível de doutorado 11, totalizando 38 cursos. O Brasil, portanto, definitivamente entra na lista de países que tem compromisso oficial com a pós-graduação *stricto sensu* (CAPES, 2018).

Em 1966, o governo apresenta planos de desenvolvimento e propostas de melhoria para a educação, tendo-se como destaque a, já citada, Reforma do Ensino Superior no ano de 1968, implantada no governo do presidente Mal. Costa e Silva, que departamentalizou as instituições e gerou significativos avanços nos índices de ensino e pesquisa das universidades.

A CAPES cresce em importância à medida que se adapta às mudanças governamentais, sem perder o foco no apoio logístico à educação, ao ensino e à pesquisa, e, entre essas mudanças, tem-se no período 1972-1974 a implantação do Programa Estratégico de Governo e o 1º Plano Nacional de Desenvolvimento (FERREIRA, 2002).

A soma dessas medidas, mesmo em meio à oscilação de recursos financeiros, vai conferindo à CAPES autoridade para intervir e participar cada vez mais na qualificação dos corpos docentes e de pesquisadores das universidades brasileiras; e é assim que no ano de 1980 a pós-graduação já se encontra expandida no território brasileiro, inclusive nas regiões Norte e Nordeste, com reconhecida qualidade dos seus cursos.

Num âmbito nacional, desde sua fundação até essa data, a CAPES exige cada vez mais das instituições e pesquisadores que a produção científica tenha os resultados de suas pesquisas publicados em periódicos de credibilidade nacional e internacional, procedimento gerencial adotado pela CAPES não apenas para assegurar o intercâmbio do conhecimento científico produzido, mas principalmente para registrar a sua atuação como órgão fiscalizador da produção intelectual dos programas de pós-graduação, que trabalha com recursos econômico-financeiros públicos, da União, perante a sociedade.

2.4 DE VOLTA AO CONTEXTO SÓCIO-ECONÔMICO E POLÍTICO-CIENTÍFICO, 1960-1980

Vimos que, a partir da década de 1960, apesar das instabilidades políticas nacionais, é fato que o progresso em C&T contempla a nossa sociedade em saúde, educação, infraestruturas rodoviária, ferroviária, aérea e portuária, assim como também em ciência de base. O progresso em ciência de base, prioritariamente nas ciências classificadas como exatas e biomédicas, derivando dessas as respectivas tecnologias, foram estimuladas pelas ações governamentais envolvendo a criação de órgãos fomentadores de C&T, tais como em 1960 a criação da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), em 1961 a criação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e em 1967 a criação da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

A FINEP é uma empresa pública que ganha destaque pela função e posição ocupada na hierarquia da República Federativa, pois além do desempenho técnico reconhecido por

especialistas em administração de projetos vinculados ao ensino superior, a FINEP fica vinculada por vezes diretamente ao Poder Executivo, ainda que não o fosse oficialmente. Nessas décadas de Regime Militar, o Executivo interferia diretamente na alocação dos recursos econômicos e financeiros, destinando-os para as instituições cujos projetos de pesquisa se enquadrassem nos interesses desse regime.

A atuação da FINEP se fortalece mais ainda, com a sua vinculação ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) criado em 1969, conforme se lê em FINEP (2018):

O FNDCT foi criado em 31 de julho de 1969 através do Decreto Lei nº 719 com a finalidade de dar apoio financeiro aos programas e projetos prioritários de desenvolvimento científico e tecnológico, notadamente para a implantação do Plano Básico de Desenvolvimento Científico Tecnológico - PBDCT.

O decreto previa que o Fundo seria dotado de uma Secretaria Executiva cuja organização e funcionamento seriam estabelecidos em Regulamento. Tal determinação foi atendida com o decreto nº 68.748 de 15 de junho de 1971, que atribuiu essa função à Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), ficando esta responsável por todos os atos de natureza técnica e administrativa necessários à gestão do Fundo.

Na década de 1970, deve-se enfatizar que já em 1973 o Brasil é também vítima da crise internacional do petróleo que afetou as grandes economias do planeta. Disso resultou o empenho governamental por outras alternativas de desenvolvimento, a exemplo do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado pelo governo do Brasil, incentivando a produção de álcool combustível para minimizar os efeitos da crise mundial do petróleo sobre os recursos econômicos e financeiros do país. Mesmo assim, a economia brasileira foi afetada com diminuição da produção interna e conseqüente redução de oferta de emprego.

Políticas de incentivos fiscais, e minimização de taxas e impostos, foram ofertadas pelo governo brasileiro para que empresas estrangeiras de C&T se instalassem no Brasil. Com erros e acertos, pois algumas dessas multinacionais já não eram eficientes em seus países de origem, mas mesmo assim alguns parques industriais deram certos, a exemplo dos petroquímicos.

Vale também registrar que o país implantou nessa década uma política de reserva de mercado para o setor de informática, mas pelos critérios dessa reserva algumas empresas do setor podiam se instalar, desde que desenvolvesse pesquisa em solo nacional; e por

esse critério empresas multinacionais como a International Business Machines (IBM), já instalada no Brasil desde décadas anteriores, implantou no país um centro de pesquisa nos anos de 1970 (BAGATOLLI et al., 2017).

O gráfico seguinte retrata a atuação da FINEP e do FNDCT, com foco no período dessa tese. A leitura do gráfico proporciona mais detalhes sobre a injeção de recursos financeiros para C&T realizada pelo governo brasileiro.

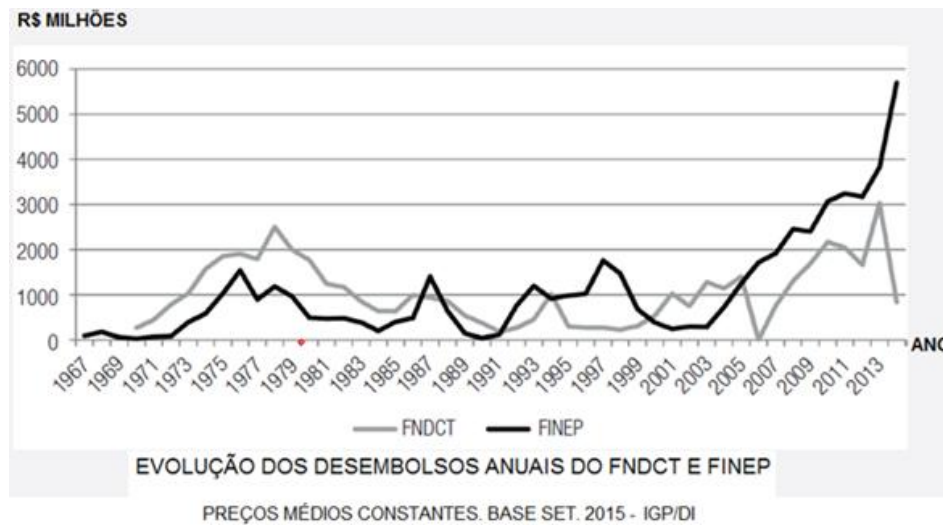


Fig. 5 Evolução dos desembolsos

Fonte: Araújo (2012); Siafi (2015); Finep (2015) in BAGATOLLI, 2017.

Para o interesse de abordagem nessa TD, retomando a política governamental para as ciências de base, a Física, nas décadas de 1960 e 1970, conquistou posição de destaque em investimento, por estar entre as ciências classificadas como exatas e com projetos em áreas que atendiam aos interesses do regime militar (GORDON, 2002).

Na segunda metade da década de 1970, surge uma nova prioridade governamental representada pela adoção de novas estratégias para com a Física brasileira, podendo ser brevemente aqui descritas como que em três etapas, denominadas I, II e III:

- I - Uma diminuição na ênfase para com a física nuclear, enquanto alocação de recursos, de forma transparente, nas universidades para pesquisa e formação de físicos nessa área.

- II - Manutenção das pesquisas em física nuclear de forma secreta, em nichos específicos de C&T nuclear de ponta, com contratações de “mão-de-obra de peso”, físicos brasileiros de renome internacional, para tocar a “sete-chaves” o secreto programa nuclear brasileiro.

- III - Na década de 1970, a prioridade de política em Física, abertamente declarada pelo governo do regime militar, com alocação de recursos e formação de físicos especializados, é para a área de física do estado sólido, por ser essa uma física de alcance social imediato e também coerente com o modelo de desenvolvimento em voga no Brasil, e em outros países, pois essa área da física atende necessidades da medicina, sistemas de comunicações, produção de fármacos, a indústria em vários segmentos etc. (vide SANTANA & FREIRE Jr., 2010).

O ano de 1980 chega, registrando-se no mês de novembro a aprovação pelo Congresso Nacional do Brasil da emenda constitucional que restabelece eleições diretas para os governos estaduais e do distrito federal, sinalizando, portanto, para o retorno da democracia ao país e uma conseqüente expectativa de minimização de desentendimentos (conflitos) entre o regime militar que governa o país e os vários segmentos da sociedade, estando entre esses os pesquisadores das instituições universitárias, com maior ênfase nessa TD para as implicações nas pesquisas em TQC realizadas pelo físico Leite Lopes.

CAPÍTULO III – CENÁRIO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS, TQC E EDQ NO BRASIL, 1948-1980: PRÓS E CONTRAS

3. COMPOSIÇÃO E AÇÕES

São apresentados neste capítulo os facilitadores e dificultadores que permeavam o ambiente das universidades e da política no Brasil para desenvolvimento de pesquisas em TQC pelas trilhas da EDQ; ênfases são dadas para os esforços e contribuições de físicos como Mário Schönberg e Richard Feynman, com o objetivo de que nossos físicos protagonistas alcançassem os seus desideratos.

3.1 LUTAS, INTERCÂMBIOS E INCENTIVOS

A história da física de partículas no Brasil dá seus primeiros passos na USP, conforme já introdutoriamente apresentada no capítulo I, com a atividade desenvolvida por professores e pesquisadores brasileiros, somando-se à colaboração de pares estrangeiros. Em um período pós segunda guerra mundial em que os interesses se voltam para a física nuclear, o Brasil também não ficou distante dessa realidade, presenciando-se nesse país, semelhantemente aos países desenvolvidos, uma política de final da década de 1940 até primeira metade da década de 1970 com uma declarada atenção governamental por essa área da física, traduzida por alocação de recursos, intercâmbios universitários e contratação de professores e pesquisadores estrangeiros para que a física nuclear se tornasse realidade nacional.

Por sua vez, a incipiente TQC, que integra a física de partículas, em solo brasileiro goza de interesse por alguns físicos, com destaque inicial para o líder de pesquisa da USP, o professor Mario Schönberg, que tem publicações em periódico científico especializado estrangeiro e desfrutando de relativa credibilidade. A atividade de Schönberg se inicia com estudos que ele denomina de *Teoria pontual do elétron* e que geraram artigos, já abordados na seção 1.3 dessa tese, os quais têm um formalismo conceitual próprio. Esses estudos de Schönberg diferiam conceitualmente da abordagem contemporânea de EDQ desenvolvida por Tomonaga, Schwinger e Feynman.

A atividade de Schönberg, de meritório valor para a física brasileira, ganha destaque aqui também pelos incentivos por ele realizados para que físicos como Leite Lopes e J. A. Swieca direcionassem suas carreiras para a física de partículas elementares, com ênfase, registrada no currículo desses, para a TQC pelo formalismo conceitual (vigente) da EDQ.

Esse incentivo foi o suficiente para que esses profissionais realizassem seus doutorados (parcial ou totalmente) em universidades estrangeiras conceituadas (vide seção 1.3 dessa tese). Uma vez concluídos seus doutorados, esses físicos se tornaram professores e pesquisadores, a partir de 1949, em centros de pesquisa como o CBPF e universidades como a USP, PUC e UFSCar.

No início da década de 1960, às pesquisas desses profissionais se somam as do físico holandês Theodor Maris, contratado pela UFRGS (então URGS) em 1959, que inicia, lidera e desenvolve as pesquisas em física nuclear e em EDQ nessa universidade.

As verbas governamentais, dessas décadas, eram curtas e mesmo havendo recursos econômico-financeiros canalizados para física de partículas, a regra era clara de que o interesse principal do governo era o de direcioná-los para pesquisas em física nuclear. Apesar dessa ótica governamental, as pesquisas em EDQ não cessaram e cresceram no Brasil, com credibilidade internacional, embora convivendo os físicos dessa área com as limitações financeiras para intercâmbios e investimentos em pesquisas, ainda que as pesquisas em EDQ fossem prevalecentemente pesquisas de natureza teórica e, portanto, de custos significativamente menores quando comparadas com as experimentais. Essa postura governamental também incomodou a Feynman, conforme narrativas posteriores na seção 3.2 desse capítulo.

A TQC e respectiva EDQ é uma área (ou subárea) da Física-Matemática que requer pré-requisitos matemáticos em nível avançado de cálculo integral e diferencial, álgebra matricial, teoria de grupos, séries de Fourier, funções lagrangiana e hamiltoniana, teoria de perturbação, entre outros tópicos. Nessas décadas, a falta desses conteúdos matemáticos, pré-requisitos para a aprendizagem da TQC, constituíram-se no Brasil em dificultadores para a pós-graduação nessa e noutras disciplinas, fato assim narrado por REZENDE (1987, p. 66):

Uma das principais dificuldades na formação de mestres e doutores em Física-Matemática no Brasil tem sua origem no nível matemático deficiente

dos egressos nos cursos de Física. Paralelamente aos cursos de pós-graduação anuais, torna-se necessário uma formação suplementar em Matemática, o que exige do estudante e orientador um esforço redobrado quando comparado a outras áreas da Física.

Nessa mescla de luta, intercâmbios e incentivos, esses físicos tanto trouxeram e promoveram eventos, com espaços para TQC em solo brasileiro, como publicaram pesquisas em periódicos científicos de reputação internacional e foram convidados para apresentar os resultados das suas pesquisas desenvolvidas no Brasil, além de receberem convites de universidades estrangeiras da França e dos EUA para eles lecionarem e pesquisarem nessas universidades na área temática dessa TD.

Decorridas as décadas de produtividade dos físicos brasileiros especialistas em física de partículas e TQC, em 1979 se realiza o *1º Encontro Nacional de Física de Partículas e Campo*, no período de 6 a 9 de junho, na cidade de Cambuquira, MG. Com o êxito alcançado, esse passou a ser o primeiro de uma série de eventos que iria compor as agendas de física nessas especialidades no Brasil, com especial destaque para as *Escolas de Verão de Partículas e Campos*, que acontecem com regularidade pelas décadas seguintes e ainda nos dias de hoje.

3.2 DA UNIVERSIDADE DE CORNELL A PROFESSOR DO CBPF: A CONTRIBUIÇÃO DE R. P. FEYNMAN

No recém criado CBPF, Tiomno e Lattes sentiam-se à vontade para convidar os seus colegas físicos estrangeiros para visitas, e entre esses o físico Richard P. Feynman, que aquiesce ao convite e vem ao Brasil, fazendo no CBPF, em 1949, uma breve estada (LEITE LOPES, 1988).

Apesar de curta a primeira visita ao CBPF, ele leva a imagem da competência e dedicação dos seus líderes de pesquisa, fato que o conduz a colocar a nova instituição como parte integrante do seu calendário de visitas às instituições estrangeiras e assim procede, visitando o CBPF nos anos de 1951, 1952 e 1953.

Em 1951, com o CBPF dispondo de mais recursos, Leite Lopes convida Feynman para ministrar curso de Física Nuclear, no seu ano sabático, ocasião em que ele se transfere da

Universidade de Cornell para o California Institute of Technology (Caltech), ambos nos EUA. Ele concorda e estende essa atividade de pós-graduação à FNFi, comparecendo, ainda nesse ano, à reunião da SBPC, conforme LOPES (1988, p. 8):

No CBPF Feynman deu um curso sobre física nuclear e na FNFi um curso sobre eletromagnetismo. Com ele colaborei numa investigação sobre a teoria de campo mesônico pseudo-nuclear e a descrição de algumas propriedades do dêuteron, uma colaboração na qual conheci as suas extraordinárias habilidades de cálculo acopladas a uma visão física intuitiva excepcional [...] compareceu à reunião da SBPC em Belo Horizonte onde interagiu com cientistas de várias áreas [...]

Com patrocínio do CNPq e da Academia Brasileira de Ciência (ABC), Feynman retorna ao Brasil no ano seguinte para realizar um simpósio, conforme também se lê em LOPES (1988, p. 8):

No ano de 1952 realizou-se um Simpósio sobre as Novas Técnicas de Pesquisa em Física⁴⁴, sob os auspícios do recém-criado CNPq e da Academia Brasileira de Ciências e ao qual compareceram físicos do calibre de Eugene Wigner, Emilio Segre, David Bohm [então na USP] [...]

Saindo do Rio de Janeiro para São Paulo, Feynman visita o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), contribuindo para a formação dos professores dessa instituição. O físico José Israel Vargas, que naquela instituição trabalhava, recorda aquele período, na entrevista VARGAS (1977, p. 15):

[...] em 1952 fui para São José dos Campos, como instrutor do ITA. Foi um período extremamente ativo do ITA. [...] Então houve um curso de especialização de professores de Física organizado pelo Pompéia⁴⁵ [...]. Participaram o Abraão de Morais⁴⁶, o Cintra, Sala [...] Lattes, Tiomno e Feynman. [...] O curioso é que havia umas técnicas matemáticas que eu

44 Esse simpósio, denominado *Symposium on New Research Techniques in Physics*, sob os auspícios do CNPq, realizou-se nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, dos dias 15 a 29 de julho de 1952. Nele foi apresentado o tema *On the pseudoscalar meson theory of the deuteron* pelos físicos R. P. Feynman e J. Leite Lopes presente em *Anais Academia Brasileira de Ciências*, 1952.

45 Paulus Aulus Pompéia (1911-1993), graduou-se como engenheiro eletricitista (1935) e seguidamente como físico (1939) pela USP, tendo entre os seus feitos o estudo de raios cósmicos com o físico Gleb Wataghin na USP, pesquisas com o físico Arthur L. Compton na Universidade de Chicago até 1942 e a implantação do departamento de física e química do ITA, onde atuou de 1949 a 1964, sendo chefe do departamento de física por amplo período, aposentando-se por essa instituição em 1966. Fonte: < <http://acervo.if.usp.br/bio07> >.

46 Abraão de Morais (1917-1970) foi professor do IFUSP, com maior destaque em astronomia e geofísica, tendo como reconhecimento das suas pesquisas, pela comunidade astronômica internacional, a denominação de uma cratera de impacto na Lua com o seu nome: Cratera De Moraes. Fonte: < <http://acervo.if.usp.br/> >.

vim descobrir na pós-graduação segundo um curso de Feynman⁴⁷ [...] O Pompéia me recrutou para o Dept. de Física do ITA. Foi um período muito bom. Não havia pós-graduação registrada, mas nós tínhamos o [...]

Como fruto daquele trabalho conjunto do ano anterior, ainda em 1952, Feynman publica, com Leite Lopes, o artigo “On the pseudoscalar meson theory of the deuteron”.⁴⁸

Em 1953 Feynman retorna ao Brasil para dar continuidade às suas pesquisas sobre a transição do hélio líquido, fazer nova conferência na FNFi, e inspecionar o ensino de física no Brasil, entre outras atividades.

Decorridos quatro anos, o físico Herch Moyses Nussenzveig, que foi graduado pela USP em 1954, conclui seu doutorado sob a orientação do físico Guido Beck, nessa mesma instituição no ano de 1957, com a tese intitulada *Solution of a diffraction problem*. Após a defesa, sabendo o orientador que Feynman nesse período estava no CBPF, Beck solicitou ao seu orientando que fosse ao Rio de Janeiro e repetisse a defesa daquela para se ter as considerações do ilustre visitante, ao que Moyses aquiesceu e assim narra em NUSSENZVEIG (2008):

Essa tese, eu a defendi duas vezes, de fato: uma vez na prova oficial, que foi com o Schönberg, o Beck e outras pessoas na banca, e depois eu tive de defendê-la de novo perante o Richard Feynman (que era visitante constante aqui no Rio), e o Beck fez com que eu repassasse aquilo tudo, ele me interrogando. Foi uma defesa dupla.

Os anos se passam e apesar da ausência física no Brasil, Feynman procura sempre se manter informado do que aqui acontece. Essa sua preocupação com a física brasileira pode minimamente aqui ser ilustrada pela carta de 1959, dirigida aos colegas americanos e estrangeiros quando ele se encontrava nos EUA, copiada em LOPES (1988, p. 13):

47 A técnica matemática a que se refere o físico Israel Vargas consiste no processo de renormalização aplicado por Feynman à teoria do elétron de Dirac, o qual permitiu, entre outras conquistas, corrigir os valores da carga e da massa do elétron para os valores físicos corretos (com ótima aproximação), já que se apresentavam divergentes quando calculados pelos mecanismos da teoria citada.

48 O artigo encontra-se nos anais do evento *Symposium on New Research Techniques in Physics*, julho de 1952, p. 251.

3 de junho de 1959

De: Richard P. Feynman
Para meus colegas

Como vocês sabem, sempre me interessei pelo desenvolvimento da física no Brasil. Eu estive lá quatro vezes, fazendo palestras no “Centro Brasileiro de Pesquisa Física”, em uma dessas vezes, permaneci lá por 10 meses. O “Centro” está localizado em um pequeno prédio de 15 ou 20 salas, com uma pequena biblioteca. É nessa instituição que todo⁴⁹ o trabalho avançado e útil em física no Brasil é feito, os mais importantes professores de física fazem sua pesquisa e ensino avançado lá, e seu ensino mais básico na Universidade Federal. [...]

Em visita virtual aos arquivos do Caltech encontro que, ainda em 1959, quando em suas reflexões sobre o ensino e pesquisa em física na América Latina, Feynman observa os facilitadores e dificultadores para tal:

A dificuldade está nos problemas terríveis que eles têm no seu país. Por exemplo, o centro de pesquisas físicas, no Rio [referindo-se ao CBPF], que é um dos líderes da América Latina, tornou-se isolado do resto do mundo por causa de uma coisa muito simples: ninguém quer pagar as revistas *Physical Review* ou *Nuovo Cimento*. Ninguém quer pagar para ter as revistas que podem manter as pessoas informadas sobre o que acontece em outro lugar. (FEYNMAN, 1959, p. 30)

Recordando a influência de Feynman no ensino e pesquisa em EDQ nas instituições brasileiras, já em 1960, Leite Lopes assim se recorda, na introdução do livro *Introdução à eletrodinâmica quântica* (LOPES, 1960):

As presentes notas constituem uma introdução à eletrodinâmica quântica, como curso oferecido, em várias oportunidades, aos estudantes graduados na FNF, CBPF e ITA, [esse localizado] em São José dos Campos. O método seguido é o de Feynman [...]. Seguimos, assim, tanto quanto possível, a apresentação de Feynman nos seus trabalhos [publicados na] *Physical Review* [...], bem como suas notas de curso de *Quantum Electrodynamics* [...].

Do convívio profissional do físico estadunidense com os brasileiros resultou a seguinte frase de Leite Lopes, quando indagado sobre a atuação do nobelista da EDQ no CBPF: “Feynman sozinho é um Departamento de Física, um homem de uma inteligência extraordinária” (LOPES, 2010, p. 44).

49 Apesar da ênfase de Feynman sobre as pesquisas físicas realizadas no então CBPF, já são de relevo, também, as pesquisas físicas em nível de pós-graduação feitas em outras instituições do Brasil, a exemplo das realizadas na USP.

CAPÍTULO IV – EVOLUÇÃO DA TQC PELO FORMALISMO CONCEITUAL DA EDQ NO BRASIL, 1948-1980

4. INSTITUIÇÕES DE PESQUISA

Dos estudos realizados para elaboração dessa tese, pode-se afirmar que a introdução no Brasil da TQC pelo formalismo conceitual da EDQ contou com o apoio institucional do CNP(q), CBPF, USP, FNF_i, PUC, UFSCar e UFRGS, além da colaboração de instituições nacionais e internacionais de fomento à pesquisa, que também contemplaram nossos físicos com bolsas de estudos no Brasil e no exterior para realizarem cursos de pós-graduação.

A partir deste capítulo, serão consideradas como pesquisa em TQC e EDQ as publicações científicas que façam uso desse formalismo, sendo também analisadas aquelas em que houve uma opção do pesquisador por adotar o formalismo citado em algumas das interações fundamentais da natureza, do interesse dessa tese. Convém esclarecer ainda que em alguns trechos dessa TD são citadas produções científicas que não atendem a este critério, e isso ocorre apenas para situar o físico protagonista no espaço-tempo da narrativa e proporcionar um melhor entendimento dessa ao leitor.

4.1 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NO CBPF: A CONTRIBUIÇÃO DE LEITE LOPES

Conforme já apresentado, o CBPF, embora fundado em 15 de janeiro de 1949, já possui nessa data um grupo de físicos conceituados e entre esses está o físico pernambucano José Leite Lopes, então com 30 anos de idade, ele que nasceu em Recife no dia 28 de outubro de 1918, e que após ser contemplado com bolsa de estudo concedida pelo *John Simon Guggenheim Memorial*, ainda nesse ano emigra para os EUA, permanecendo lá até o início do ano seguinte. Em Princeton, no *Institute for Advanced Study* (IAS), Leite Lopes, já em tempos de EDQ renormalizada, continua suas pesquisas sobre o momento magnético anômalo do núcleon, introduzindo essa EDQ, e ainda em 1949 publica os resultados dessas pesquisas como “Notas sobre o momento magnético do núcleon” nos *Anais da Academia Brasileira de Ciências* e seguidamente em artigo intitulado “The nucleon magnetic moment in meson pair theories” na *Physical Review*, em 1950, no qual se lê:

A contribuição para o momento magnético de núcleon a partir de uma interação desse com um espinor⁵⁰ ou campo de pares de méson escalar é calculada. Em ambos os casos, encontra-se que ela é logaritmicamente divergente.

Desse ano em diante, o físico brasileiro segue uma certa tendência dos pares, reflexo da expectativa gerada pela EDQ renormalizada, de estendê-la para outras interações, que não sejam apenas as interações entre elétrons e entre esses e pósitrons.

Essa temática, pela sua força peculiar, mantém-se ainda, no final da década anterior (1949) e início da década seguinte, como tema de pesquisa de Leite Lopes em parceria com o físico Adel da Silveira. É nesse contexto, em artigo intitulado “Polarização do vácuo e energia própria na teoria quântica de campos”⁵¹, publicado pela revista *Ciência e Cultura* no ano de 1951, que é feito um convite para que se realize pesquisa em TQC pelo formalismo conceitual da EDQ, extensiva a outras partículas de massa nula, sugerindo-se que seja não necessariamente apenas com o fóton, mas podendo ser extensiva a outras modalidades de interação fundamental da natureza, que não seja obrigatoriamente à eletromagnética, a exemplo do que fez Feynman, como descrito em LOPES & SILVEIRA, (1951, p. 302):

Feynman, recentemente, mostrou que a energia própria do neutrino⁵² em interação com núcleons se anula. Achamos de interesse investigar as

50 Embora exista diferença entre um campo vetorial e um campo espinorial, esse, também denominado de espinor, por vezes, generalizam-se os conceitos de campos vetoriais e tensoriais (que a mecânica quântica utiliza sem análogo clássico para descrever principalmente férmions e neutrinos), correspondendo a um tipo de campo físico, associado a determinada representação de grupo, álgebra de Lie, mais especificamente do grupo de Lorentz, caracterizando-se pela presença de observadores inerciais e grandezas físicas medidas por funções quadráticas, modalidade de campo essa já utilizada, nos idos de 1928, por Paul Dirac, registrados na literatura científica por “espiniores de Dirac” (DIRAC, 1928ab).

51 Em linguagem de EDQ, a polarização do vácuo é um processo quântico que decorre da presença de um campo eletromagnético que age sobre o elétron, produzindo pares de partículas virtuais, elétron-pósitron, tendo ainda como consequência dessa ação a alteração da distribuição da carga e da corrente elétrica que produziram o campo eletromagnético original (elétron nu). Essa polarização é também referida como a (presença da) auto energia do bóson de calibre na interação, o fóton (LOPES, 1981).

52 O neutrino é das partículas subatômicas a que interage pela força nuclear fraca. Pertencente ao grupo dos léptons, e por sê-lo desse grupo não interage pela força forte; o neutrino é, depois do fóton, tido como a partícula em maior quantidade no universo. Cada neutrino pode ter como fonte natural direta o sol, a Terra, as estrelas supernovas e a atmosfera; como fonte artificial (por decaimentos provocados) os reatores nucleares. O neutrino fora previsto em carta redigida por Pauli em 1930, ao estudar o espectro da radiação beta e detectado em laboratório no ano de 1953 (PAULI, 1930; FERMI, 1934; LEE & YANG, 1960b).

propriedades de uma partícula de massa nula, spin $\frac{1}{2}$ e carregada, em interação com fótons. Não existe nenhuma evidência experimental de férmions carregados com massa nula ou menor que a do elétron de modo que tal investigação é puramente formal. Mas como não compreendemos o papel da massa na teoria das partículas elementares como variável dinâmica, não é destituído de interesse investigar o que acontece na teoria quando pomos essa constante igual a zero.

Quanto aos resultados dessas pesquisas, no CBPF, já obtidos pelos autores, usando o fóton como partícula mediadora, inerentes às peculiaridades do efeito Compton⁵³ e radiação em Bremsstrahlung⁵⁴, eles assim relatam em igual página:

No nosso caso as equações quânticas de movimento são consistentes e conduzem a um valor nulo para a polarização do vácuo e a energia própria do férmion. A singularidade da teoria surge quando se calculam efeitos observáveis: a secção de choque do efeito Compton e a do Bremsstrahlung, por exemplo, são finitas quando indicam emissão de um fóton em uma dada direção. A integração sobre os ângulos, entretanto, dá uma secção de choque infinita.

É neste ano de 1951 que ocorre a 3ª Reunião Anual da SBPC, realizada em Belo Horizonte e da qual Feynman participou. A revista *Ciência e Cultura* é um dos representantes dessa sociedade e de significativo alcance social. Observam-se nesse artigo peculiaridades redacionais, como convite às investigações em TQC, divulgação das pesquisas no CBPF, e texto curto face a complexidade da temática. Os autores remetem ao formalismo clássico da TQC, fazendo um paralelo epistemológico entre esse formalismo e o atual, como que sugerindo ganho de aprendizagem para os pretendentes e iniciados em EDQ. Há ausência de formalismo matemático, diferentemente de outros artigos na área de ciências exatas dessa mesma edição da revista em que se presencia esse formalismo, somando-se a essas peculiaridades à instigação ao leitor para o inserir dessa temática como leitura possível de ser realizada periodicamente, num período em que a ciência no Brasil dá novos passos e colhe conquistas de visibilidade importantes.

53 Defini-se como o espalhamento de fótons provocado por partícula carregada, podendo ser um elétron, que faz com que o fóton se espalhe geralmente com menor quantidade de energia (aumento do comprimento de onda) em relação a sua condição antes de sofrer tal espalhamento. Esse efeito normalmente ocorre na região de limite espectral dos raios X ou raios gama (COMPTON, 1923).

54 Denomina-se de *Bremsstrahlung* a radiação que se origina da desaceleração de partículas carregadas.



Fig. 6 Reunião da SBPC

Fonte: SBPC

Ainda nesse período, outras pesquisas foram realizadas por Lopes, com o jovem físico Adel do CBPF. Sobre essa parceria, o então diretor científico dessa instituição, Leite Lopes, assim recorda-a em LOPES (2004, p. 25):

De volta ao Brasil em 1950, o meu programa foi impulsionar os trabalhos no CBPF em ligação com a Faculdade Nacional de Filosofia. Passei a oferecer cursos, hoje chamados de pós-graduação⁵⁵, que deram lugar a notas mimeografadas e posteriormente a livros sobre a teoria atômica da matéria, eletrodinâmica clássica, eletrodinâmica quântica, equações relativísticas e para cuja colaboração recebi preciosa ajuda de Adel da Silveira.

No ano de 1953, com o propósito de dinamizar ainda mais as pesquisas em EDQ no Brasil, Leite Lopes convida para uma estada no CBPF o renomado físico belga Léon Rosenfeld,

55 Já existindo em décadas anteriores no Brasil, em vários cursos oferecidos pela USP, ITA, CBPF e outras instituições, o início oficial da pós-graduação no Brasil corresponde a 3 de dezembro de 1965, quando pela Câmara de Ensino Superior (CES), do então Conselho Federal de Educação (CFE), foi aprovado o parecer nº 977.

Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbedu/v14n42/v14n42a10.pdf>>.

que fora orientando de Niels Bohr. Essa contribuição de Rosenfeld no CBPF é assim também descrita em LOPES (2004, p. 28):

Em 1953, além de Feynman, visitou-nos Léon Rosenfeld, diretor do Instituto Nórdico de Física Atômica Teórica (Nordita, Copenhagen), físico com importantes contribuições à teoria dos campos e adepto militante da interpretação da mecânica quântica, segundo a chamada Escola de Copenhagen⁵⁶.

A energia média utilizada para absorção de fótons pelo núcleo do átomo permeia os estudos de Leite Lopes, com o físico José Goldenberg, pelos próximos três anos, e em 1954 são tornadas públicas as análises e respectivas conclusões desses estudos pelo artigo “The harmonic mean energy for photon absorption by nuclei”, na revista *Nuovo Cimento* (1954), com fomento parcial do CBPF.

Por sua vez, pesquisa em raios cósmicos apresenta limitações pois não fornece meios de controlar as energias e natureza das partículas interagentes. Assim, Leite Lopes, objetivando minimizar esses óbices e aproveitando a experiência de membro da Comissão de Energia Atômica do CNPq, em 1955, propõe a construção no Rio de Janeiro de um acelerador de partículas para dinamizar as pesquisas tanto na UFRJ quanto no CBPF, intento que não foi conquistado, segundo ele por motivos vários, entre o quais a politicagem (LOPES, 2010, p. 131).

No período de 1955 a 1964, Leite Lopes exerce a função de Diretor da Divisão de Ciências Físicas do Conselho Nacional de Pesquisas, e nesse primeiro ano de atuação como diretor publica em conjunto com Feynman os resultados dos estudos sobre a teoria pseudo-escalar do dêuteron, conforme já abordado anteriormente.

Nessa década de 1950, é fato que Leite Lopes já é um físico conhecedor das pesquisas de pares de reputação, tais como Enrico Fermi, Hideki Yukawa e Oscar Klein respectivamente

56 A interpretação ortodoxa, denominada Interpretação de Copenhagen ou, também, Escola de Copenhagen, é a que adota em física quântica (mecânica quântica) a interpretação não causal, ou seja, de formalismo probabilístico, desenvolvida em 1927 por Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli e outros físicos para os fenômenos físicos descritos pela mecânica quântica. Valendo registrar que é a interpretação que teve A. Einstein como um dos seus opositores (EINSTEIN; PODOLSKY; ROSEN, 1935).

representados pelos artigos Fermi (1934), Yukawa (1935) e Klein (1939), além das pesquisas do físico Leslie. L. Foldy aqui representada pelo artigo Foldy (1952).

A exemplo de outros físicos, que almejavam em suas pesquisas, com o auxílio da TQC, obter uma teoria que unificasse as forças fundamentais da natureza, mais particularmente a união entre a força fraca e a eletromagnética, Leite Lopes, com a utilização de ideias norteadas pela EDQ, a exemplo da utilização da constante de interação eletromagnética e da função atribuída ao “bóson X” como partícula mediadora da interação fraca, referenciando-se assim na ação do fóton, tal como esse atua na EDQ, somada às influências dos artigos Foldy (1952) e Feynman & Gell-Mann (1958), Leite Lopes, publica em 1958 pela revista *Nuclear Physics* o artigo intitulado “A model of the universal Fermi interaction”, no qual se lê em LOPES (1958, p. 234):

Resulta da teoria de Feynman-Gell-Mann que a interação de Fermi pode ser considerada como devido a uma troca de mésons vetoriais carregados entre férmions. Um modelo alternativo é possível: os acoplamentos fracos entre os férmions podem ser devidos a uma troca de mésons vetoriais carregados e neutros. Uma condição extra de conservação da corrente que cria o campo neutro é imposta para proibir as reações não observadas. O modelo difere do de Feynman-Gell-Mann na medida em que conduz a uma interação intrínseca entre elétron e nêutron, sendo o potencial efetivo da ordem de 4 eV. Se o acoplamento deste méson vetorial hipotético, com férmions, tiver a mesma força que a carga elétrica, a partícula terá cerca de 60 massas de prótons e decairá muito rapidamente em pares de híperons⁵⁷.

Os bósons vetoriais, a que Leite Lopes se refere, neutros e carregados, são partículas hipotéticas, que atuam como que mediadoras entre as interações fraca e eletromagnética; e que em sua hipótese essa partícula neutra tem massa correspondente a 60 vezes a massa do próton. Portanto coube a Leite Lopes, calcular um valor mínimo (limite inferior) de massa para esses bósons na sua intenção de unificar as interações fraca e eletromagnética. Para chegar mais próximo do valor obtido posteriormente pelo modelo

57 Das análises de fotografias que geraram o artigo ROCHESTER & BUTLER (1947), os autores concluíram ser o híperon uma partícula que pertence ao conjunto de partículas que compõe a interação forte, resultante da interação entre píons e núcleons, sendo que o híperon decairia por interação fraca, daí ter sido entendida como partícula estranha. Essa partícula pode ser detectada naturalmente ou produzida artificialmente. Partindo da classificação de que os hádrons são formados pelos grupos dos mésons (esses compostos por píons e káons, partículas que têm número de spin inteiro) e dos bárions (partículas que têm número de spin fracionário), na década de 1960, o físico russo Lev Okun (1929-2015) classificou o híperon como um bárion (grupo composto por núcleons e híperons) (OKUN, 1965).

Glashow-Weinberg-Salam, ou talvez alcançá-lo, Leite Lopes necessitaria de outros resultados de pesquisa não encontrados ainda em 1958, tais como os presentes em Higgs (1964ab) e de outras pesquisas.

Portanto em 1958, com 40 anos de idade, a partir dessas hipóteses, Leite Lopes se diferencia das pesquisas anteriores dos seus pares ao atribuir massa para os bósons, sinaliza para a unificação entre as interações fraca e eletromagnética, mediante constante de acoplamento para essas interações de igual valor, com esses bósons atuando como mediadores entre tais interações, tal como o fóton é para a interação eletromagnética.

Dos anos de 1961 a 1964 o interesse pela unificação citada continua, várias foram as pesquisas e respectivas publicações. Entre essas, os artigos de A. Salam com J. Ward de 1961 e 1964 intitulados respectivamente “On a gauge theory of elementary interactions”, *Nuovo Cimento* (1961), e “Electromagnetic and weak interactions”, *Phys. Lett.* (1964), que estão entre as publicações que ditam o ritmo das pesquisas e registram a descoberta dos mecanismos que regem a unificação entre as interações eletromagnética e fraca, descoberta essa que, referenciando-se no formalismo conceitual da EDQ, se realizou mediante os trabalhos independentes dos físicos Abdus Salam, Sheldon Glashow e Steven Weinberg.

Nesses artigos, eles obtiveram um valor das massas para os bósons, que viriam a ser denominados W , com predições também das correntes neutras fracas, mediadas pela partícula Z . Ao conjunto de publicações, que inclui esses artigos, cujo formalismo conceitual físico-matemático descreve a interação eletrofraca e predições das correntes neutras fracas na natureza, a literatura de física quântica denominou de *Modelo Weinberg-Salam-Glashow*.

Essa descoberta é aqui mencionada por um dos artigos seminais, que é SALAM & WARD (1964, p. 198):

Um dos sonhos recorrentes na física das partículas elementares é a de uma possível síntese fundamental entre eletromagnetismo e interação fraca. A ideia tem sua origem nas seguintes características compartilhadas:

- 1) Ambas as forças afetam igualmente todas as formas de matéria, léptons bem como os hádrons;
- 2) Ambas são de caráter vetorial;

3) Ambas (individualmente) possuem forças de acoplamento universais. Uma vez que a universalidade e o caráter vetorial são características de uma teoria de calibre, essas características compartilhadas sugerem que forças fracas assim como as forças eletromagnéticas surjam de um princípio de calibre.

Observa-se, seis anos após LOPES (1958), que o artigo de Salam & Ward referencia-se também em formalismo já utilizado por Leite Lopes.

Sobre “A model of the universal fermi interaction” (1958), o físico Francisco Caruso, 48 anos depois de sua publicação, assim se manifesta, em CARUSO (2006, p. 13-14):

[...] destacamos seu importante artigo de 1958, na prestigiosa revista *Nuclear Physics*, no qual prediz a existência de bósons vetoriais neutros, juntamente com bósons carregados, como veículos da interação fraca, sugerindo a unificação das forças eletromagnéticas com as forças fracas e postulando a igualdade das constantes fundamentais das interações fraca e eletromagnética. A partir desta hipótese, Leite Lopes nos deu a primeira avaliação correta da massa dos bósons vetoriais.

Quanto ao período de 1956 a 1958, o físico brasileiro, em parceria com colegas, no ano de 1988, assim se recorda em LOPES, SIMÕES & SPHELER (1988, p. 156):

[Nesse artigo é feita] uma revisão da evolução da física de interação fraca [...] Contribuições de físicos brasileiros são especialmente mencionadas, bem como a primeira previsão da unificação eletrofraca [...]

Por seu turno, sete anos mais tarde, em 1995, proferindo palestra, Leite Lopes (2012) assim comenta o quanto seu artigo esteve próximo de desvendar o mecanismo que rege a unificação das forças fraca e eletromagnética:

Eu estava possuído pela idéia de que como o fóton é vetorial, e também o bóson, eles poderiam ser duas formas diferentes de uma mesma partícula. Então eu publiquei esse trabalho. No texto eu não enfatizei demais esta ideia porque há uma relação entre constantes, na qual aparece a massa do bóson vetorial. Essa massa do bóson vetorial fica ligada à constante de interação e M não é conhecida. Eu chamei o bóson vetorial de X ; ainda não se chamava de W . Esse trabalho é de 1958, quando só se conhecia um neutrino, então eu disse: “quem sabe?”, como o fóton e o bóson são vetoriais, eu vou fazer $f_x = e$ na qual e é a constante de interação eletromagnética que considerei igual à constante de interação do bóson X , com a corrente fraca, f_x . Assim sobra apenas a massa a ser determinada. Eu usei a relação acima e obtive a massa do bóson W , sendo igual a sessenta vezes a massa do próton, foi a primeira determinação da massa aproximada do W .

Quarenta e um anos depois, Leite Lopes se remete novamente ao périplo entre seu artigo de maior repercussão, sobre a sua tentativa de unificação das interações eletromagnética e fraca, e a conquista dessa unificação por Weinberg-Salam-Glashow, em LOPES (1999, p. 577):

Fiquei encantado em ler os trabalhos de Weinberg e então, em 1972, eu propus que a unificação de fótons e Z^0 entrassem no modelo de dominância vetorial, de modo que os bósons vetoriais p^{+-} também estariam relacionados aos bósons vetores intermediários W^{+-} como p^0 está relacionado a Y e Z^0 .

O modelo de Weinberg, Salam e Glashow deu os motivos teóricos das minhas induções intuitivas e, baseado no mecanismo de Higgs, é o primeiro exemplo da unificação das forças físicas.

No ano de 1959, cria-se a Escola Latino-Americana de Física (ELAF), sendo que a primeira, com o tema *Os Princípios de Invariância da Física Moderna*, fora realizada nesse ano na UNAM⁵⁸, México (20/07 a 30/08), e a segunda, em 1960, realizada no CBPF, seguindo-se de outras, porém a partir de 1964, devido ao Golpe Militar desse ano, tem-se as dificuldades para os docentes e pesquisadores brasileiros dela participarem. Merece destaque para os propósitos dessa TD o convite feito, com respectiva participação, ao físico chinês naturalizado americano Chen Ning Yang, especialista em física de partículas, com ênfase nos estudos sobre a descoberta de violação do princípio da conservação da paridade nas interações fracas, feito esse que no ano de 1957 lhe rendera o Prêmio Nobel de Física, dividindo-o com o também chinês Tsung-Dao Lee. Tais pesquisas foram alicerces importantes para a desejada teoria de unificação das forças eletromagnética e fraca (LOPES, 2004, p. 30).

Com ampla pauta de pesquisa no período citado, destaco o ano de 1960, em que concomitantemente ao exercício da função de diretor científico do CBPF, Leite Lopes se ocupa de realizar o Projeto de Criação de uma Escola de Física, que é apresentado, oficialmente, à Comissão do Fundo Especial das Nações Unidas nesse mesmo ano. No então documento, que entre outros fins visa recursos econômico-financeiros para a realização desse projeto em sua plenitude, o qual envolve várias áreas da física, Leite Lopes reserva espaço para a TQC, enfatizando o corpo de físicos especialistas já existentes nessas áreas, bem como o intercâmbio já realizado pelo CBPF, com físicos de reputação

58 Universidade Nacional Autónoma do México, instituição pública fundada em 1910, sediada na capital desse país.

internacional, a exemplo de Feynman, e a respectiva produtividade científica nessa instituição já registrada (LOPES,1995).

Daquele ano de 1953 (ano que registra as visitas de físicos ilustres como Feynman e Léon Rosenfeld) até 1964, período que antecede a instalação do Regime Militar no Brasil, Leite Lopes entre as disciplinas que ministra no CBPF e FNFi leciona também a disciplina *Introdução à Eletrodinâmica Quântica*, conforme já anteriormente citado, tendo como tópicos integrantes dessa disciplina, nesses anos, os seguintes conteúdos, conforme se lê em LOPES (1960):

Capítulo I - **Equação de Pauli**

Capítulo II- **A equação de Dirac**

- Equação de Klein-Gordon
- Equação de Dirac
- Álgebra das matrizes γ de Dirac
- Forma hamiltoniana da equação de Dirac
- Interpretação de α
- O spin do elétron

Capítulo III - **A aproximação não-relativista da equação de Dirac**

- Aproximação em 1ª ordem (termos em v/c). Equação de Pauli
- Aproximação em 2ª ordem (termos em v^2/c^2). Interação spin-órbita
- Forma quadri-dimensional da corrente
- Equação de Dirac adjunta
- Solução da equação de Dirac para partícula livre
- Normalização das funções de onda
- Póstrons

Capítulo IV- **Invariância relativista**

- Invariância Relativista
- Expressão de S [*scattering*]
- Operadores de Dirac
- Ordem de grandeza dos operadores de Dirac no limite não relativista
- Métodos de obtenção de alguns elementos da matriz
- Operadores de projeção. Soma de elementos de matriz sobre spin
- Traços de matrizes

Capítulo V - **A teoria do pósitron**

- Teoria não-relativista. Propagadores de Feynman
- Teoria das Perturbações. O pósitron segundo Feynman e Stuckelberg
- Teoria relativista
- Campo eletromagnético
- Amplitude de transição
- Representação de K_+ no espaço dos momenta
- Elementos de matriz no espaço dos momenta

Capítulo VI - **Aplicações do formalismo de Feynman**

- Probabilidade de transição por segundo
- Espalhamento de Rutherford

Capítulo VII - **O campo eletromagnético**

- Amplitude de emissão e absorção de um fóton
- O vetor de estado do campo de radiação
- Efeito Compton
- Aniquilação de um par com emissão de dois fótons
- Bremsstrahlung

Capítulo VIII - **Interação entre elétrons**

- Propagador de dois elétrons
- Interação entre cargas. Propagador de um fóton
- Representação de Fourier de δ_+ (s^2)
- Espalhamento elétron-elétron
- Equivalência da soma sobre as quatro polarizações, com ondas transversais, mais interação de Coulomb
- Interação de Breit

Capítulo IX - **O problema da renormalização**

- Self-energia do elétron
- Renormalização de massa
- Correções radiativas no espalhamento por um potencial externo
- Renormalização de função de onda
- Solução da catástrofe do infra-vermelho
- Diagramas fechados. Renormalização da carga. Polarização do vácuo.

APÊNDICE

- Funções de Green
- A função δ .

Esses conteúdos disciplinares que se transformaram em livro, registra ser *Introdução à eletrodinâmica quântica*, citado como LOPES (1960), o primeiro livro de EDQ de autor brasileiro, editado no Brasil e em língua portuguesa, aplicado nas universidades brasileiras, sendo, portanto, uma referência para a formação de muitos físicos que se especializaram nessa área. Sobre esse livro o físico José Bassalo, em entrevista para essa TD, assim se posiciona (BASSALO, 2017):

A importância desse livro (primeiro como Notas de Aulas do CBPF) decorre do fato de que ele abriu as portas para os físicos brasileiros (Marcelo Gomes, Henrique Fleming, certamente o saudoso Swieca, Luciano Videira e outros) estudarem a QED [EDQ]. Eu mesmo estudei esse livro (editado pela Trillas, 1977) para escrever as Notas de Aulas do Curso que dei na UFPA (hoje transformado em livro) sobre a Eletrodinâmica Quântica.

Esse livro fora seguidamente publicado em espanhol, com o título *Introducción a la Electrodinámica Quántica*, pela editora Trillas, México, 1977.

Talvez por influência de alguns desses cursos ser de engenharia ou terem alunos dessa, observo que o pragmatismo didático prevaleceu no professor Leite Lopes ao escolher iniciar

os cursos de introdução a EDQ pela EDQ em si, pois segundo ele importa, já, habilitar os estudantes dos cursos da FNFi, ITA e CBPF na construção dos diagramas de Feynman para processos elementares de radiação e espalhamento, uma vez que a ordem natural seria iniciar o curso com introdução a TQC para seguidamente lecionar EDQ, conforme introdução em LOPES (1960):

Uma vez aprendida a técnica, deverá o estudante demorar-se nos fundamentos da teoria quântica dos campos. Este será o objetivo de outro volume desta série.

Em 1964, Leite Lopes lançaria em parceria com seu aluno de mestrado Alberto Vidal Carrion o livro *Introdução à teoria quântica de campos*⁵⁹, pelo CBPF, o qual foi sua referência para lecionar esse conteúdo.

No ano seguinte, concluiu-se a orientação da dissertação de mestrado de A. V. Carrion, com respectiva defesa, a qual foi a segunda do CBPF, intitulada *Equações relativísticas para partículas com spin*.

Como um dos fundadores do CBPF, é óbvio que a relação de físicos que Leite Lopes contribuiu para a formação é significativa; sendo assim, para os fins desta tese, recordo a fala de Leite Lopes sobre a rápida passagem do físico Jorge André Swieca nessa instituição (LOPES, 2004, p. 27):

Formávamos uma equipe em harmonia e eu convidei [Guido Beck e Tiomno] para integrar o quadro de cátedra de Física Teórica da FNFi. [...] nesta faculdade e no CBPF, formavam-se jovens físicos brilhantes, tais como [...] o saudoso e inesquecível Jorge André Swieca e tantos outros.

Com a tomada do poder político no Brasil pelo Regime Militar mediante o golpe de 1964, várias instituições e respectivos profissionais tiveram seus projetos e propostas para C&T arquivados, adulterados ou plagiados, outros cientistas foram perseguidos, afastados das suas funções ou simplesmente ficaram indignados com a tomada de poder de forma arbitrária, estando entre esses Leite Lopes que, unindo a perseguição sofrida que atinge o ideal científico e à necessidade de continuar trabalhando, emigra nesse ano para a França, atuando na Universidade de Paris, *Faculté des Sciences d'Orsay*, como professor visitante nos anos de 1965 e 1966.

59 Presente no currículo de Leite Lopes como *Introduction to Quantum Field Theory*.

De volta ao Brasil, no ano de 1967, como diretor do Instituto de Física da UFRJ, Leite Lopes pensa ser esse um novo momento para desenvolvimento de suas pesquisas, que considera necessárias para o país, como pensa também ser esse o momento apropriado para se retomar projetos antigos, entre esses a instalação nessa universidade de acelerador de partículas, agora um sincrocíclotron de 400 MeV, intento mais uma vez não conquistado, segundo ele, pelos mesmos motivos antigos, entre os quais a politicagem, as disputas internas, as vaidades sobre quem é o pai do projeto, as disputas pelo direcionar de verbas entre as próprias universidades, em que umas querem uma dotação orçamentária maior que a da outra, mesmo que essa outra fique sem nada, entre outras mazelas. Essa realidade presente em várias instituições científicas do Brasil, no período em pauta, é assim narrada pelo físico em LOPES (2010, p. 131):

[...] eu originei o projeto, eu acho. Foi muito criticado [...] esse projeto do acelerador era para dar um novo dimensionamento. Toda vez que você faz uma coisa nova, importante, no Brasil, no setor da Física os outros físicos vão criticar porque querem para eles e você vai tirar dinheiro do bolo. [...]

Leite Lopes no CBPF retoma a docência, faz pesquisas e publica, estando entre as publicações o artigo “The role of the mass in the theory of fermions”, datado de 1969, publicado em parceria com o físico e seu orientando de mestrado Mario Novello, pela *Revista Mexicana de Física*. Nesse artigo é proposta uma abordagem alternativa à luz da Teoria de Grupos, segundo a abordagem de Poincaré para a equação de Dirac, datada de 1928, alternativa assim proposta em LOPES (1969, p. 426):

Investigamos a possibilidade de considerar a massa um operador na equação de Dirac para férmions livres.

A transformação de massa induzida por transformação geral de coordenadas, que deixa as equações de Dirac invariantes, é obtida e inclui a reversão de massa. A invariância sob o grupo de Poincaré impõe fortes restrições à transformação de massa, mas parece permitir a reversão dessa.

Ao final do artigo os autores apresentam a invariância obtida, com determinadas restrições, conforme proposta inicial em LOPES (1969, p. 435):

Assim, uma equação invariante sob inversão de massa

$$\gamma^\mu \left\{ i \frac{\partial}{\partial x^\mu} - m_0 a_\mu(x) \right\} \psi(x) = 0$$

é semelhante à equação de uma partícula carregada sem massa em interação com um campo eletromagnético.

Após o estabelecimento da EDQ, porque incorporada a renormalização em seus cálculos, a temática simetria ganha ainda maior destaque no cenário da física, já que a quebra espontânea de simetria está no âmbito da EDQ como mecanismo gerador de massa. Leite Lopes, seguindo a então tendência de docência e incentivo às pesquisas, ao longo das décadas que sucede 1948, profere várias palestras nessa temática e em 1969 publica-as no livro *Lectures on symmetries*.

Ainda em 1969, Leite Lopes tem os seus direitos políticos e de cidadão cancelados pelo governo do regime militar vigente no Brasil, sendo impedido, portanto, de exercer a docência e qualquer outra função, tanto no CBPF quanto em qualquer outra instituição brasileira. Diante dessa realidade, Leite Lopes então, por convite, vai lecionar na *Universidade Carnegie Mellon*, Pittsburgh, EUA, por 1 ano, de 1969 a 1970.

A postura política dos EUA favorável a instalação da ditadura militar no Brasil, a qual lhe gerava insatisfações, somada a indicação do seu nome pelo físico francês Michel Paty para compor o quadro de docentes e pesquisadores em Física Teórica de Altas Energias da *Universidade Louis Pasteur*, Strasbourg, França, com o consequente aceite dessa instituição, contribuem para que L. Lopes, ainda, em 1970, emigre para esse país e se vincule a essa universidade, permanecendo nela por dezoito anos:

Houve um acordo quase unânime e o dinâmico presidente da *Université Louis Pasteur*, o químico Guy Ourisson, aceitou imediatamente. Foi assim que Leite foi contratado nessa universidade, inicialmente como professor visitante, por dois anos e posteriormente titularizado de maneira definitiva por um decreto de exceção à regra então vigente (a nacionalidade francesa era necessária para ser professor titular), assinado pelo próprio Presidente da República de então, Valéry Giscard d'Estaing [...] (PATY, 2019, p. 29)

Dentre as atividades de ensino e pesquisa coordenadas por L. Lopes nessa instituição, destacam-se também os seminários sobre física de altas energias, realizados regularmente, o nível dos seus convidados e a publicação dos conteúdos neles apresentados, conforme assim descritos pelo diretor emérito de pesquisa do *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS):

Ele organizou de maneira mais sistemática os seminários regulares de Física Teórica de Altas Energias, que harmonizamos com os seminários

experimentais, e convidamos conferencistas do melhor nível, vindo tanto da França quanto do exterior [...] Foi por uma iniciativa dele também que fizemos a publicação dos cursos e dessas conferências, na forma de *preprints* editados pela *Division*, uma “*Série des Cours et Conférences sur la Physique des Hautes Énergies*” que fornecia aos estudantes e pesquisadores uma documentação preciosa. (PATY, 2019, p. 30)

Nesse ínterim, enquanto coordena o Grupo de Física Teórica de Altas Energias por ele fundado e dirigido, Leite Lopes, que se mantém sempre a par dos acontecimentos no Brasil, é informado sobre a decisão governamental de que a partir de 1976 o CBPF passará a fazer parte do CNPq.

Com o passar de duas décadas, registra-se que a pesquisa aplicada direcionada para a busca da unificação de duas das quatro forças fundamentais de interações da natureza, que são a força eletromagnética e a força nuclear fraca, realizada por Leite Lopes e presente em Lopes (1958), contribuiu significativamente, conforme análise de vários especialistas em TQC, para que se chegasse à descoberta do mecanismo que rege essas interações, que a literatura de física das partículas denominou interação eletrofraca e ao conjunto de artigos que o descreve nomeou de modelo Glashow-Weinberg-Salam, palavra composta pelos sobrenomes dos três físicos descobridores.

Importa aqui registrar, quanto a essa contribuição de Lopes (1958), que o físico S. Weinberg, em 8 de dezembro de 1979 quando do recebimento do seu prêmio Nobel compartilhado com os outros dois físicos pela descoberta da interação eletrofraca e predição das correntes neutras fracas, dá os devidos créditos de reconhecimento ao físico brasileiro, por também contribuir para essa descoberta, assim descrito em WEINBERG (1979, p. 550):

Houve especulações sobre possíveis correntes neutras, já em 1937 por Gamow e Teller, Kemmer e Wentzel; e novamente em 1958 por Bludman e Leite Lopes. As tentativas de se obter uma teoria fraca e eletromagnética unificadas tinham também sido feitas por Glashow, Salam e Ward, no início da década de 1960; essas tinham correntes neutras, com muitas das características que Salam e eu encontramos no desenvolvimento da teoria de 1967-1968.

Retomando a EDQ nas suas pesquisas na França, quando vinculado ao *CRN Centre de Recherches Nucleaires, Université Louis Pasteur – Strasbourg*, Leite Lopes escreve em

parceria com Dominique Spheler⁶⁰, sua aluna de mestrado e doutorado, publicado no ano de 1979, o artigo “The limit of massive electrodynamics and two-component photon field theory”.

Nesse artigo, como que em paralelo epistemológico, se assemelhando à forma de trabalho já exercida em Lopes & Silveira (1951) e Lopes & Novello (1969), Leite Lopes ainda neste ano de 1979 escolhe como linha de pesquisa novas abordagens alternativas, comparando-as agora com a teoria de Bargmann-Wigner⁶¹, para remeter-se a Weyl enquanto equação para o neutrino (interação fraca), e a equação para o elétron de Dirac (1928ab), avaliando assim o comportamento do campo eletromagnético e, portanto, propondo alternativas para a EDQ, conforme escrito em LOPES (1979, p. 101):

A transição de uma teoria massiva do campo de spin-1 para a correspondente de um campo sem massa foi investigada por muitos autores. Em todos os seus tratamentos anteriores, esse problema foi analisado diretamente do ponto de vista dos campos de Proca e Maxwell. O objetivo deste artigo é relatar uma análise elementar desta questão do ponto de vista da teoria de Bargmann-Wigner e mostrar que essa teoria nos leva de maneira natural a descrever o campo de fótons polarizados por uma teoria de dois componentes, que é uma generalização da equação de Weyl para o neutrino. Isto também pode ser considerado como resultado do postulado de que a equação seja invariante na substituição $\Psi \rightarrow (\gamma^5 \otimes \gamma^5) \Psi$. A quantidade fundamental neste caso é a combinação de campos $H - iE$ e ela é a relação de comutação para este campo que é estabelecida nesta teoria. Esta quantidade vai para o seu conjugado complexo sob reflexão. Esta operação transforma, portanto, a equação de Weyl na equação do campo de conjugação de carga. A teoria é invariante por reflexão como deve ser, uma vez que as equações de Maxwell são deduzidas da equação de Weyl. Como é bem conhecido, um campo de *spin* com massa m é descrito, segundo a teoria de Bargmann-Wigner, por um tensor de grau $2s$, simétrico em suas variáveis de spin, que obedece a um sistema de $2s$ equações de Dirac [...]

60 Dominique Spheler, física francesa que foi aluna de mestrado e doutorado de Leite Lopes e também sua esposa por dez anos, de 1974 a 1983.

61 Após a Equação de Dirac para o elétron, elaborada em 1928, que é uma equação de onda relativista e que contempla férmions de spin $\frac{1}{2}$, o próprio de Dirac propôs estendê-la para valores de spin maiores, mas não concluiu, cabendo posteriormente aos físicos V. Bargmann e E. P. Wigner, referenciando-se nas teorias de grupos de Lorentz e Poincaré, desenvolver tais estudos em formalismo apropriado para spins arbitrários (inteiros e semi-inteiros), particularmente de valor 2 (spin 2), multispinores, pelos quais obtém-se o campo quântico $\Psi(\mathbf{r})$ denominado de função onda de Bargmann-Wigner, conforme BARGMANN & WIGNER (1948).

Motivado também pela descoberta do tau (τ), a partir de colisões em alta energia, realizada no SLAC⁶² em 1975 pelo físico nova-iorquino Martin Lewis Perl (1927- 2014), e por uma das características dessa partícula leptônica pesada (que atua pela interação eletromagnética) ser a capacidade de decair transformando-se em hádron (que atua pela interação forte) (PERL, 1978), somando-se a continuidade das suas atividades de docência e pesquisa, o *Docteur d'État en Sciences Physiques*⁶³ do CRN, Leite Lopes, conforme já relatado, orienta alunos estrangeiros e brasileiros, em nível de mestrado e doutorado, estando entre esses a física brasileira Maria Leone Gay Ducati, com quem publica no ano de 1979, em parceria também com J. A. Martins Simões, o artigo “On new possible lepton interactions”, no *Lettere al Nuovo Cimento*, ratificando, assim, a proposta de continuidade das suas pesquisas em física de partículas referenciadas nas interações eletrofracas, forte e EDQ, conforme se lê no citado artigo, à p. 433:

A motivação para postular essas interações foi correlacionar léptons, com os mesons hadrônicos e com hipotéticos léptons mais pesados. Os argumentos dados anteriormente, que implicam em uma estrutura leptônica, podem agora ser generalizados de modo a incluir as partículas recentemente descobertas. Propomos uma estrutura para o elétron e o múon, com base em uma analogia entre as diferenças de massa para \mathbf{K}^* [káon] e \mathbf{p} [próton], por um lado, e o múon e o elétron, por outro [...]

O ano de 1980 se inicia, e enquanto conclui no CRN a orientação de doutorado de Jose A. Martins Simões intitulada *Sur la possibilite d'une structure pour les leptons et les quarks*⁶⁴, cuja defesa ocorreu em 22 de janeiro do ano seguinte, L. Lopes faz uma releitura de temas físicos e matemáticos que compõem e viabilizam as interações fundamentais da natureza até então estudadas, e acrescenta assuntos antigos que voltaram à tona pela TQC, tais como o estudo de sólton, mecanismo de não geração e geração de massa para partículas fundamentais da natureza; teorema de Goldstone e mecanismo de Higgs; hierarquia na quebra espontânea de simetrias em eletrodinâmica quântica que envolve lépton-quark e bósons; interações pelo espalhamento neutrino-lépton; as diversas aplicações em TQC da função lagrangiana e a proposta da grande unificação⁶⁵ das interações fundamentais, entre outros temas.

62 Stanford Linear Accelerator Center, localizado na Califórnia, EUA.

63 Doutor em Ciências Físicas.

64 Sobre a possibilidade de uma estrutura para léptons e quarks.

65 Proposta da grande unificação porque nela inclusa a força gravitacional.

Nessa releitura, Leite Lopes faz uma reflexão, em nível mundial sobre a então situação das pesquisas em TQC e a motivação existente nessas quando da busca pela unificação total das interações elementares da natureza, e conclui por afirmar que na década de 1970 houve um certo desestímulo por parte de alguns físicos quânticos na busca dessa unificação. Tal desestímulo, ainda segundo Lopes, foi devido ao grande número de partículas subatômicas que vinham sendo descobertas e pelas teorias vigentes para pesquisa em TQC que conduziam o pesquisador a associar cada campo a uma partícula, tornando à primeira vista a atividade de pesquisa exaustiva, sendo aparentemente difícil de se conquistar a grande unificação, o sonho de Einstein.

Mas, seguidamente L. Lopes contra-argumenta que a evolução das pesquisas é real, que o modelo de Weinberg-Salam é um grande motivador para a unificação total, que a Cromodinâmica Quântica restaurou o valor teórico completo da teoria de campo, e que se ainda não se conquistou a grande unificação é por entraves com a matemática.

Esse conteúdo, que engloba releituras e respectivas reflexões até 1980, e nesse ano concluído, escrito no idioma inglês, Leite Lopes coloca no livro *Gauge field theories: an introduction*, composto por dez capítulos e somente publicado em 1981, onde o autor procura ficar próximo, em nível de abordagem, tanto do especialista em TQC⁶⁶ quanto do leitor não iniciado nessa (LOPES, 1981, p. 1-2):

[...] Os esforços desenvolvidos por Einstein para encontrar uma teoria unificada para os campos gravitacional e eletromagnético pareciam sem sentido para os físicos quânticos e de partículas, uma vez que muitos outros campos teriam de ser levados em conta em tal teoria unificadora. Foi principalmente no domínio da física das interações fortes que a noção de campo parecia inútil. [...] o modelo Salam-Weinberg abriu um novo estilo e um novo objetivo, no espírito da grande unificação dos campos físicos sonhados por Einstein. [...] Agora, presume-se que as interações fortes sejam descritas por campos de calibre vetorial sem massa, associados aos graus de liberdade de cor dos quarks. Espera-se que esta teoria reproduza as interações fortes entre os hádrons, embora no momento as dificuldades matemáticas tenham impedido a conclusão antecipada do programa.

A pesquisa atual desenvolve ativamente esforços no sentido de uma “grande” unificação de todas as interações básicas da natureza, como o

66 O autor dessa TD considera sugestivo, para o leitor não iniciado nessa temática, entender em 1980 TQC como um conjunto de teorias quânticas, tal como já anteriormente definido, estando entre essas, além da EDQ, a CQD, o Modelo Padrão e a Teoria do Campo Conformal (TCC), essa também denominada de Teoria de Campos Conforme.

modelo Georgi-Glashow $SU(5)$ ⁶⁷, que tenta unificar as interações forte, fraca e eletromagnética.

Estamos em novembro de 1980, ano em que o Congresso Nacional do Brasil aprova a emenda já citada, que sinaliza para os retornos da democracia ao país e de outros direitos do cidadão brasileiro que foram suprimidos, mas Leite Lopes continuará ainda por mais alguns anos realizando suas pesquisas em TQC pelas trilhas da EDQ em Strasbourg, com estudantes brasileiros, estrangeiros e pares de diversos países.

Em 1987, quando em abordagem sobre as pesquisas teóricas em física de partículas elementares realizadas no Brasil, a contribuição de Leite Lopes é assim recordada pela Sociedade Brasileira de Física em REZENDE (1987, p. 64):

Leite Lopes, num trabalho pioneiro, previu em 1957 as correntes neutras nas interações fracas, opção mais tarde retomada por Glashow e os outros dois cientistas ligados à formulação do modelo “Standard”, Weinberg e Salam.

A atividade física de Leite Lopes, aqui em destaque a sua opção pelo estudo do elétron, que vai da abordagem clássica à posterior dedicação à EDQ renormalizada, essa também como caminho para encontrar o mecanismo que rege a interação eletrofraca, é assim descrita por CARUSO (2012):

Em sua vasta obra científica, Leite Lopes teve muitos interesses, dos quais destacam-se o estudo do elétron e suas interações (tema que lhe foi sugerido por Mario Schönberg no início de sua carreira) e a tentativa de unificar as interações fracas e eletromagnéticas.

Quanto a sua contribuição na França ele é, ainda, assim lembrado pelo o físico M. Paty:

Em Strasbourg, Leite Lopes desempenhou um papel muito importante no ensino da Física Teórica no nível de pós-graduação, sobretudo em Teoria Quântica dos Campos e das Partículas Elementares, [...] contribuiu, de forma excepcional, para a formação de jovens pesquisadores, acompanhando-os até a tese de doutoramento, com a sugestão de assuntos estimulantes e na fronteira das pesquisas atuais,

67 O $SU(5)$ é um grupo de calibre para descrever interações entre partículas elementares da natureza desenvolvido pelos físicos estadunidenses Howard Georgi e Sheldon Lee Glashow; trata-se de um modelo construído pela combinação dos grupos $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ que engloba léptons e quarks, com a proposta de ampliar o alcance do Modelo Padrão (GEORGI & GLASHOW, 1974).

sempre com uma abordagem criativa e fundamental. (PATY, 2019, p. 29)



Fig. 7: José Leite Lopes

Fonte: CNPq.F.0104_001

4.2 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NA USP: A CONTRIBUIÇÃO DE J. A. SWIECA

O nascimento da Universidade de São Paulo data de 25 de janeiro de 1934, com uma história ininterrupta de produção de pesquisa e formação de profissionais em diversas áreas do conhecimento. Dentre esses profissionais, enfoca-se aqui a pessoa do físico Jorge André Swieca, um polonês, nascido em 22 de dezembro de 1936 e posteriormente radicado no Brasil, com cidadania desse país, onde graduou-se em física na Universidade do Brasil (atual UFRJ) no ano de 1958, sendo que os dois últimos anos do curso foram realizados, também, no CBPF, onde fora aluno de H. Moyses Nussenzweig e Plínio Sussekind Rocha⁶⁸, que logo perceberam o talento em física do jovem aluno e o encaminharam para realizar a pós-graduação na USP. Com a acolhida e o incentivo inicial do físico Mario Schönberg, na Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Swieca inicia o doutorado em física teórica no ano de 1959, sob a orientação do físico alemão W. Güttinger, então professor visitante no IF, que o insere pela primeira vez no “universo” da Teoria Quântica de Campos.

Em 1961, Güttinger, com o aceite do seu orientando, opta pela realização do doutorado de Swieca no formato sanduíche⁶⁹ e encaminha-o para a cidade de Munique, Alemanha, onde lá trabalha, por um ano, sob a orientação de Werner Heisenberg no Max Planck Institute (MPI).

Somadas às atividades próprias desse estágio no MPI, têm-se por Swieca a continuidade também de temas já em andamento na USP, estando entre esses o estudo sobre a aplicação dessa teoria em distâncias intra-atômicas, que resulta no artigo “Quantum field theories at small distances”, feito em parceria com seu orientador, concluído em setembro e publicado em dezembro desse ano pelo periódico alemão *Zeitschrift für Naturforschung*, fomentado pelo German Federal Ministry for Atomic Energy, International Atomic Energy Agency e Brazilian National Research Council (CNPq).

68 Plínio Sussekind Rocha (1911-1972), contemporâneo de Leite Lopes e Swieca, foi um dos fundadores da Faculdade Nacional de Filosofia da Universidade do Brasil, onde lecionou Mecânica Racional, Analítica e Celeste e também Física-Matemática até a sua aposentadoria forçada pelo Ato Institucional 5 em 1968 (SWIECA & VIDEIRA, 1972).

69 Mestrado e/ou doutorado no formato sanduíche, designa-se à formação profissional compartilhada, com mais de uma instituição, em que o orientando de pós-graduação se afasta da sua instituição de origem a que está vinculado oficialmente para cursar determinado período dessa formação em outra instituição e retorna para concluí-la na instituição de origem.

Com dedicatória em homenagem ao 60º aniversário do Prof. Werner Heisenberg, nesse artigo é feita uma análise do comportamento de funções utilizadas em TQC para se avaliar a propagação de campos quando quantificados para pequenas distâncias e a sua relação com a renormalização, a partir de um esforço de se adequar a função hamiltoniana desses campos com a matriz espalhamento de partículas, considerando as nuvens virtuais dessas e a utilização dos diagramas de Feynman como recurso para a análise dos comportamentos das funções perturbativas, conforme escrevem em GÜTTINGER & SWIECA (1961, p. 1265):

Uma tentativa é feita para adaptar o formalismo convencional da hamiltoniana e da matriz S ao conceito de renormalização de tal forma que resulte em uma teoria finita de partículas físicas (vestidas) interagentes que, como um todo e em cada passo de aproximação, satisfaz os axiomas da teoria estrutural geral de campos quantizados, particularmente a causalidade e definição positiva. Se as partículas físicas de uma teoria de campo com interação pontual são objetos estendidos, devido à extensão da nuvem de quanta virtual nos estados físicos, então a teoria admite uma formulação finita com a extensão da nuvem introduzindo um corte natural embutido dependente do acoplamento. [...] Por outro lado, não pode haver interação se não houver extensão de nuvem e carga distribuída. A estrutura da nuvem e da carga vem através de fatores de forma causais relacionados às partes do vértice e fatores de forma eletromagnética, que, contudo, um esquema teórico de perturbação não pode levar em consideração.

Os autores concluem, mostrando-se otimistas com as soluções apresentadas, principalmente quando aplicadas aos sistemas de várias partículas fermiônicas (GÜTTINGER & SWIECA, 1961, p. 1287):

Está claro que o formalismo discutido nas seções anteriores também pode ser aplicado a sistemas mais complicados, como por exemplo para o problema do estado fantasma na teoria do *spinor* não-linear e para interações de quatro férmions. A conexão íntima dos resultados até agora relatados, com o operador de Feynman, o cálculo do tempo próprio, os métodos funcionais, as técnicas de Volterra e Lappo-Danilewsky para resolver equações como a da matriz S, sem recorrer às expansões de constante de acoplamento, estão à mão. A relação dessas teorias com as estruturas assintóticas, encontradas nas seções 2 e 3, é facilmente explicitada ao representar a função espectral (m, g^2) do propagador por uma integral de Stieltjes em relação ao acoplamento, [...] de modo que o propagador admite uma dupla representação [...] Essa representação parece ser essencial se se tentar explicar o fato de que não se pode, em geral, tratar problemas, referentes às forças de acoplamento e de interação, de forma totalmente independente da região espaço-temporal em que a interação ocorre.

Digno de registro, ainda em relação ao apoio a pesquisa, W. Güttinger agradece aos dois primeiros órgãos fomentadores citados pela bolsa concedida a Jorge A. Swieca.

Tem-se também nesse período, entre as atividades de pesquisa realizadas no MIP, o estudo de propagadores de campo, que Swieca desenvolve-o e conclui no mês de outubro.

Todavia o que inicialmente representava um novo amanhecer para Swieca, tornou-se uma frustração e, ainda nesse ano, ele se desvinculou do MPI, fato assim descrito por NUSSENZVEIG, 2007:

André ficou profundamente decepcionado com sua estada no Instituto de Heisenberg e, segundo me foi contado por Guido Beck⁷⁰, esteve para abandonar a física.

Personalidades e valores muito diferentes entre Heisenberg e Swieca, somados à inexperiência desse no cenário científico internacional, própria de início de carreira, mais a forma peculiar de liderar grupo de trabalho exercida por Heisenberg, um nobelista de 1932, e um dos criadores da mecânica quântica, se constituíram em indícios do impacto emocional sofrido por Swieca quando na companhia de W. Heisenberg (então com 59 anos de idade). Essa insatisfação do jovem físico da USP, lá no MPI, é assim analisada por SCHROER (2007, p.5):⁷¹

A carreira científica de Jorge André quase chegou ao fim antes de se desenvolver quando ele visitou o *Max-Planck Institut für Physik und Astrophysik (MPI)* em Munich, 1961. Lá ele teve o seu primeiro encontro com um TOE⁷² mais antigo [...]. Nesta época, o *MPI* era dominado por Heisenberg, que já tinha perdido aquela força inovadora dos anos 20 e 30. A superficialidade da sua “Weltformel”⁷³, na base de um Lagrangiano com um acoplamento quadrilinear de um campo espinorial, e a idolatria sem

70 Guido Beck (1903-1988) foi um físico de nacionalidade austro-húngara que imigrou para o Brasil em 1951, vindo a ser professor e pesquisador da USP e do CBPF.

71 Bert Schroer é um físico alemão e contemporâneo de Swieca, com quem trabalhou no Brasil, na USP, realizando vários estudos em TQC. Schroer tem também vínculo como professor e pesquisador na UFRJ.

72 Theory of Everything (TOE) significa Teoria de Tudo. Embora em linguagem acadêmica também possa significar Tutoria de Orientação Educacional, nessa citação, a ênfase é dada para o fato de o orientador de Swieca no MIP, Heisenberg, ser um dos cientistas que pretendeu desenvolver uma TOE para o universo.

73 *Weltformel* palavra alemã que significa uma fórmula (equação) para o mundo, ou seja, a Teoria de Tudo, que explique a formação e regência do universo, a qual compunha um dos estudos de interesse de Heisenberg.

crítica, chocaram André e, sem conhecer outros caminhos, teve vontade de terminar a sua carreira na física teórica.

Mas, Swieca contava com a experiência de Güttinger, que, percebendo a insatisfação do seu orientando, ainda em 1961, apresentou-o a Rudolf Haag, físico também alemão com vasta experiência e credibilidade em TQC.

De volta ao Brasil, em 1962 Swieca continua o doutorado e aquela atividade de pesquisa concluída em outubro do ano anterior, também fomentada pelo German Federal Ministry for Atomic Energy e International Atomic Energy Agency, é publicada nesse ano como artigo intitulado “Field propagators singular at zero coupling” pelo periódico *Nuclear Physics*. Nesse artigo, o autor, para a condição de acoplamento de fuga, avalia a equivalência assintótica, entre propagadores axiomáticos e fantasmas, bem como as implicações físicas dessa em duas situações: uma para a estrutura singular de uma teoria de campo e a outra quanto às propriedades de alta energia dos propagadores (SWIECA, 1962, p.686).

Para alcançar os objetivos, referenciando-se em Güttinger & Swieca (1961), o artigo é dividido em três seções, sendo uma que avalia a *Exigência assintótica*, outra que avalia o *Comportamento do Pólo Fantasma* e a que avalia as *Consequências físicas da equivalência assintótica*. Após essas avaliações, aqui sumarizadas pelo autor dessa TD, Swieca apresenta as seguintes conclusões (SWIECA, 1962, pp. 692- 693):

(a) [...] em particular, a relação entre partículas nuas e vestidas mostrou-se diferente da normalmente aceita.

(b) A possibilidade de obter relações finitas entre g e g_o ⁷⁴ apóia a esperança de que a teoria possa levar a valores numéricos definidos, como carga observada ou razão de carga em massa, se complementada com algumas condições adicionais.

(c) Se alguém assumir que, na eletrodinâmica quântica, o propagador exato possui um polo fantasma e coincide assintoticamente com um axiomático, então um dos resultados da análise de Gell-Mann & Low (1954) [...] pode ser uma constante finita diferente de zero, independente de g_o , [que] pode ser enfraquecido para sugerir que g tende assintoticamente a uma constante, já que g tende a zero, correspondendo ao caso de $r = 1$. [Guardando-se as devidas especificidades,] pode-se concluir que essa aproximação é suficiente para descrever as características qualitativas essenciais do propagador exato para g pequeno, mesmo na região de alta energia. [...]

74 Definem-se g e g_o como constantes de acoplamento renormalizada e não-renormalizada, respectivamente.

Nessa década, já é sabido que o êxito conceitual da EDQ e a precisão de resultado obtido nos seus cálculos foram responsáveis por determinados pares tentarem tomá-la como referencial conceitual para cálculo de outras interações fundamentais da natureza, tal como para a interação forte. Contudo, logo perceberam as limitações ao se optar por esse referencial, devido ao seu alicerce perturbativo, motivando então o interesse pelo desenvolvimento de métodos de aproximação não-perturbativos.

É nesse contexto que em 1962, Swieca continua e intensifica as pesquisas, com essa modalidade de método em TQC aplicada às interações mesônicas, objeto de seu doutorado na USP, que conclui no ano seguinte (1963), mediante defesa de tese intitulada *Método Tamm-Dancoff e sua aplicação a modelos solúveis da teoria dos campos*, afirmando proporcionar um método atualizado que, além da renormalizabilidade que já lhe é intrínseca, conduz com maior precisão (pelos cálculos em baixas ordens de aproximação) aos valores das massas dessas partículas interativas (SWIECA, 1963).

Após aquela apresentação inicial a R. Haag, Swieca retorna a Universidade de Illinois ainda nesse ano de 1963 para lá permanecer como Research Associate até 1966. A sua mudança de atitude para com as pesquisas físicas e a conclusão do doutorado são assim, também, descritas por SCHROER (2007, p.1-2):

Encontrei J. A. Swieca pela primeira vez em Champaign-Urbana, na Universidade de Illinois, por volta de 1960/61. Ele estava numa visita de apresentação ao Haag e seu grupo [...] Após aquela passagem de poucos dias em 60/61, ele defendeu a tese de doutorado na USP e retornou a Champaign-Urbana para trabalhar no nível de *Research Associate* [até o ano de 1966] dentro do grupo do Haag. Nesta época eu era professor assistente na Universidade de Pittsburgh. Numa das minhas visitas a Universidade de Illinois ele me convidou para vir para a USP depois da sua volta para o Brasil.

Swieca, coerente com a sua formação e a então orientação, proporcionada por Haag, dedicou-se, inicialmente, a tentar descrever as partículas, suas existências, propriedades e a completeza dos estados quânticos de multipartículas, pela Teoria Quântica de Campos, que era uma obstinação de Haag desde anos atrás. O título do projeto de pesquisa, parcialmente fomentado pelo National Science Foundation dos EUA, era *When does a quantum field theory describe particles?*⁷⁵, tendo como um dos resultados dessa pesquisa

75 *Quando uma teoria quântica de campos descreve partículas?*

a publicação, em conjunto com o seu líder de pesquisa, do artigo de igual nome ao da pesquisa e no qual sintetiza seu objetivo principal:

Fornecemos um critério que deve ser satisfeito em Teoria Quântica de Campos, a fim de permitir uma interpretação corpuscular completa da teoria. [...]

A noção de "estados essencialmente localizados" na Teoria Quântica de Campos é reexaminada. O objetivo deste artigo é sugerir um possível critério que possibilitaria distinguir, entre teorias de campo, as com interpretação de partículas e as sem essa interpretação. Este critério é uma generalização para teorias relativistas de campos quânticos do velho argumento da mecânica quântica: o número de estados quânticos de uma partícula em um volume espacial de fase finita Ω é finito [...] (HAAG & SWIECA, 1965, p.308)

A meta não foi plenamente atingida, mas esse trabalho representou contribuição significativa para as pesquisas posteriores que culminaram na nuclearidade do espaço de fase, conforme narra Bert Schroer, que fora também orientando de pesquisas de Haag:

Recentemente, as ideias de Haag-Swieca sobre a completeza dos estados de multipartículas (*asymptotic completeness*), [como] uma consequência do comportamento do espaço de fase⁷⁶, foram vindicadas (G. Lechner). A existência dos modelos fatorizáveis e suas propriedades de completeza assintótica seguem da modularidade nuclear (nuclear modularity) que é uma propriedade do espaço de fase um pouco mais restritiva que a compacidade de Haag-Swieca. A relação das propriedades locais, na forma da nuclearidade do espaço de fase, com a estrutura da TQC em termos de partículas foi parcialmente conseguida: são as consequências térmicas da localização (buracos negros, lei da área para entropia da localização...) e que estão intimamente relacionadas. (SCHROER, 2007, p. 5)

Da análise da produção científica de Swieca, pode-se afirmar que ele desenvolveu um domínio significativo sobre amplas áreas da física quântica e teoria da relatividade, tais como *localização dos estados em teorias quânticas relativistas, condições assintóticas em teoria de campos e álgebra de correntes de Gell-Mann*, temas esses que foram abordados na docência, em eventos científicos e em vários artigos que foram publicados por periódicos

76 Espaço de fase, em física quântica, idealizado inicialmente por Weyl (1928) e continuado por Wigner (1932), consiste em se adotar uma distribuição de quase probabilidade em que os estados quânticos de partículas deixam de ser representados por função de onda, vetor de estado ou matriz para ser representado por produto estrela, ou seja, o observável representado pelo operador $\hat{A}(x,p)$, com as variáveis x e p , representando respectivamente posição e momento, transforma-se para o espaço de fase em $A(x,p)$. Com tal adoção, tem-se uma mecânica quântica mais próxima do formalismo conceitual da mecânica hamiltoniana (GROENEWOLD, 1946).

científicos de renome internacional. Porém, para os propósitos dessa TD, deter-se-á nas atividades científicas que têm como conteúdo a TQC pelo formalismo conceitual da EDQ.

A passagem espontânea de um sistema simétrico para um estado não simétrico, ou seja, a quebra espontânea de simetria em TQC, estava já, em décadas anteriores a de 1960, na tônica de pesquisa internacional em TQC e extensiva a algumas teorias vinculadas às interações fundamentais da natureza, estando entre essas a EDQ.

Todavia os questionamentos de Swieca se sucedem e, ainda sob a influência de Haag, tem-se nas atividades do físico brasileiro a pesquisa por querer melhor demonstrar o teorema de Goldstone, presente em Goldstone (1961) e em Goldstone, Salam & Weinberg (1962), que afirma que a existência da quebra espontânea de simetria está associada à existência de partícula de massa zero⁷⁷.

Por sua vez, Y. Nambu e J. Goldstone afirmaram que se uma simetria contínua é espontaneamente quebrada, tal ação é responsável pelo aparecimento de campos sem massa, os denominados bósons de Nambu-Goldstone ou bósons de Goldstone⁷⁸, temática essa que despertou o interesse de vários estudiosos em TQC.

Swieca, sendo um desses estudiosos, juntamente com o físico japonês Hiroshi Ezawa, abraçou essa temática e já tendo, em parceria com o também físico Daniel Kastler, investigado anteriormente em Kastler & Swieca (1966), a quebra espontânea de simetrias e a conexão entre o automorfismo algébrico e sua implementação unitária em um espaço de Hilbert, conseguiu provar detalhadamente o teorema de Goldstone pelo artigo “Spontaneous breakdown of symmetries and zero-mass states” (1967), publicado pelo periódico acadêmico *Communications in Mathematical Physics*, com pesquisa também parcialmente fomentada pelo National Science Foundation. Essa prova é assim narrada em EZAWA & SWIECA (1967, p. 330):

77 Por outras palavras, se num sistema físico há ausência de alguma simetria pertencente às leis que o regem, então diz-se existir quebra espontânea de simetria nesse sistema, o que caracteriza “já existir” essa quebra “previamente”, porém não declarada (GOLDSTONE, 1961).

78 Em TQC, denomina-se bóson de Goldstone a uma partícula hipotética que pode surgir quando uma simetria contínua é espontaneamente quebrada no campo quântico, tal como ocorre para onda de rotação em um ferromagneto quântico (GOLDSTONE, 1961).

Em uma teoria do campo relativística, o teorema de Goldstone é demonstrado sem qualquer suposição sobre a existência de campos covariantes e também para valores esperados arbitrários.

E referenciando-se em Haag & Kastler⁷⁹ (1964), continuam esses autores (Ezawa & Swieca) a narrativa nas pp. 330 e 331:

[...] foi mostrado que os automorfismos conectados com correntes localmente conservadas são sempre unitariamente implementáveis em uma representação na qual o espectro energia-momento tem uma lacuna entre o vácuo e um hiperbolóide de menor massa. Portanto, uma quebra espontânea da simetria, que está associada à lei de conservação, só pode ocorrer se o espectro energia-momento não tiver tal lacuna.

Na presente nota, sob as mesmas suposições que em um resultado mais robusto, é obtido: os automorfismos são unitariamente implementáveis, a não ser que o espectro de massa tenha uma singularidade $\delta(\kappa^2)$ no cone de luz. Isso está mais próximo do que é geralmente entendido pelo Teorema de Goldstone (1961) e o resultado obtido em Kastler (1966).

[...] Na nossa demonstração, empregaremos uma técnica similar àquela originalmente usada em Goldstone, Salam, Weinberg (1962), com a diferença de que nenhum uso de operadores de campos covariantes será feito.

Esse trabalho de Swieca com Ezawa teve grande repercussão entre os pares, devido à atualização que a temática foi adquirindo, conforme se apresenta na narrativa de SCHROER (2007, p. 5):

J. A. Swieca escreveu 4 trabalhos sobre este assunto. O primeiro foi escrito em parceria com Daniel Kastler e Derek Robinson⁸⁰. O segundo foi feito com Ezawa⁸¹ e mostrou realmente que essas excitações têm que ser [entre] partículas que se ligam com a corrente conservada de uma maneira

79 Físico teórico francês, vinculado a universidade pública Aix-Marseille Université, Daniel Kastler (1926-2015) é um dos autores, juntamente, com Rudolf Haag, da teoria quântica de campos locais, que consiste num sistema de axiomas definidos algebricamente, representados por um conjunto aberto, mapeado entre eles, no espaço minkovskiano, constituindo-se portanto, tal teoria, numa aplicação local da física quântica (HAAG & KASTLER, 1964). Daniel Kastler é filho do também físico Alfred Kastler, que foi agraciado com o PNF do ano de 1966.

80 Derek Robinson (1941-2002), físico inglês especializado em fusão nuclear e respectivo confinamento de plasma. Sua vida profissional está fortemente associada a obtenção de potentes campos magnéticos toroidais, os tokamaks, para produção de plasma a partir de isótopos pesados de hidrogênio (deutério e trítio) (ROBINSON at al., 1969; < <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsbm.2011.0012> >).

81 Hiroshi Ezawa (1932-) é especialista em TQC, com vários trabalhos nessa área.

específica. No terceiro e quarto trabalho, André é o único autor. O terceiro adapta o conceito da simetria espontaneamente quebrada para a física do estado sólido e o quarto resume uma série de seminários proferidos na escola de verão em Cargèse que, mesmo depois de 40 anos, ainda apresenta o assunto das simetrias quebradas de uma maneira recomendável e ainda não ultrapassada.

O interesse pelo assunto no qual Swieca se especializou era grande, como se presencia na 14ª Conferência sobre Física realizada na Universidade de Bruxelas, Bélgica, no mês de outubro de 1967, que tem como tema *Problemas Fundamentais em Física de Partícula Elementar*, com ênfase para o *Teorema de Goldstone e possíveis aplicações em física de partícula elementar*.

Registram-se nas referências dos anais dessa conferência, além dos trabalhos de físicos já conceituados como Heisenberg, Goldstone, Salam, Weinberg e Peter Higgs, os artigos de J. A. Swieca e Theodor A. J. Maris.

Ainda nesse ano de 1967, Swieca realiza concurso para livre docência na USP, com a defesa da tese intitulada *Quebra espontânea de simetria em teorias quânticas*, temática da qual ele já desfruta de significativo conhecimento. No documento que apresenta a sua tese, SWIECA (1967), o autor se propõe a abordar o problema da quebra espontânea de simetrias em teorias relativísticas de campo, inerentes a sistemas de muitos corpos. Para tal, aborda e demonstra que para teorias relativísticas que não possuem estados discretos de massa zero, em que se estabelece o teorema de Goldstone, tem-se associado usualmente um operador unitário às simetrias contínuas, o qual deixa o vácuo invariante. Afirma-se também que quando as forças são de curto alcance, devido ao rápido decrescimento dos comutadores de dois operadores locais com separação espacial, é possível estender os métodos relativísticos à teoria dos muitos corpos, e que essa condição conduz ao entendimento de que a quebra espontânea de determinada simetria implica na existência de excitações, com pequenas quantidades de energias, e que essas quantidades acontecem aleatoriamente.

Para desenvolver e abordar o proposto, J. A. Swieca organiza a tese em cinco capítulos.

O professor começa sua defesa (Capítulo I), com uma breve retrospectiva histórica sobre simetria, e, inicialmente, detém-se na simetria (invariância) que é própria ao grupo de

simetria $SU(3)$, que é aproximada, e apresenta um esquema semi-fenomenológico, mediante o hamiltoniano H que corresponde à soma dos hamiltonianos H_0 , H_1 , H_2 e H_3 , em que um deles (H_3) viola a simetria (aproximada), formulando o físico então a seguinte questão, conforme se lê em SWIECA (1967, p. 3):

Através das hipóteses sobre os comportamentos de H_1 , H_2 e H_3 podemos obter informações sobre os desvios da teoria a partir da simetria exata, considerando a parte que viola a simetria como uma pequena perturbação.

De um ponto de vista estético, tal tratamento das simetrias aproximadas é bastante insatisfatório. Se a natureza demonstra predileção por certas simetrias, por que ao mesmo tempo conspira para violá-las?

Após abordar a indagação anterior e seguinte, seguindo-se de outras abordagens, o professor apresenta o Teorema de Goldstone e afirma que a sua adoção em TQC tem o custo de convivermos com partículas até então não observadas, tal como afirma:

Da maneira como foi originalmente formulado o teorema de Goldstone é eminentemente negativo pois o preço que pagamos por uma quebra de simetria espontânea dentro do esquema usual da teoria de campos é a predição de partículas de massa zero e spin zero jamais observadas. Uma argumentação que procura salvar a situação, conjecturando que essas partículas são acopladas muito fracamente à matéria, não nos parece convincente [...] (SWIECA, 1967, p. 6-7)

No capítulo II, intitulado *Quebra espontânea de simetrias em teorias relativísticas*, o autor formula o problema e se encarrega das devidas demonstrações. Já no capítulo III, *O teorema de Goldstone*, é feita uma abordagem detalhada desse teorema com o devido formalismo físico e algébrico.

No capítulo IV, *Quebra espontânea de simetrias em teorias de muitos corpos*, epílogo da defesa, prosseguindo com a metodologia adotada para os capítulos anteriores, é feita uma abordagem física ampla do tópico, com o pertinente formalismo algébrico que o conteúdo requer.

O professor inicia a parte final da sua defesa, com as conclusões a seguir, que compõem o capítulo V, aqui parcialmente apresentadas, conforme se lê à p. 42:

[Conclui-se para o capítulo II que] numa teoria relativística com “mass-gap” existem operadores unitários associados às simetrias contínuas da maneira usual;

[Por sua vez, conclui-se para o capítulo III que] numa teoria relativística sem “mass-gap” existem operadores unitários associados às simetrias contínuas da maneira usual, mas que não possuem estados discretos de

massa zero. Quando tais estados estão presentes podemos então ter uma quebra de simetria e não é possível provar de maneira geral a existência de operadores unitários que realizem a transformação de simetria.

Os resultados do capítulo II poderiam ser facilmente aplicados à **teoria de muitos corpos** quando existe um “gap de energia”, entre o estado fundamental e o primeiro estado excitado, e forças de curto alcance.

Contudo somente uma aplicação é possível, a que fizemos no capítulo IV, quando mostramos que, se as forças decrescem mais rapidamente que as Coulombianas, existem excitações de energia zero que podem ser interpretadas como “partículas de Goldstone” associadas à quebra espontânea da invariância de Galileu.

Para Swieca, ter apenas informações limitadas sobre o espectro energia-momentum em problemas de muitos corpos não é suficiente para o entendimento de se saber se determinada simetria nesses é espontaneamente quebrada ou não.

O docente prossegue, enfatizando que por um propósito de se evitar os bósons de Goldstone, alguns pesquisadores não deram a devida atenção à comutatividade local, bem como o devido entendimento para os observáveis que compõem uma TQC, tal como afirma o professor concluindo a sua defesa:

A natureza peculiar da interação de Goldstone como meio de inibir o aparecimento de “partículas de Goldstone” levou autores [24], [25] e [16]⁸² à procura de um mecanismo semelhante na teoria relativística, abandonando a comutatividade local na presença de campos de *gauge* [calibre].

Estas tentativas trazem a foco o ponto de que embora uma teoria deva ser idealmente formulada em termos de observáveis, cujas regras de comutação podem seguramente ser tomada como locais [12]⁸³, estes observáveis são precisamente as quantidades de *gauge* [de calibres] invariantes em termos das quais o problema da quebra de invariância de *gauge* [calibre] não pode ser posto.

Concluída a defesa da tese, Jorge A. Swieca é aprovado como Livre Docente na Cadeira de Mecânica Quântica e Mecânica Estatística da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da USP, passando a fazer parte do quadro docente da universidade como professor associado.

82 Em [24], [25] e [16] o autor se refere respectivamente aos artigos ENGLERT & BROUT (1964), HIGGS (1966) e J. A. SWIECA a ser publicado pela *Phys. Rev. Letters*.

83 Em [12] o autor se refere ao artigo HAAG & KASTLER (1964).

Ainda nesse ano de 1967, Swieca tem entre suas atividades a conclusão da orientação de doutorado, juntamente com Shiguelo Watanabe, do aluno Klaus Stefan Tausk, intitulada *A medida na mecânica quântica*.

Entre os anos de 1966 e 1968, Swieca orienta pela USP a dissertação de mestrado de Sueli Maria Marino intitulada *Comportamento assintótico de comutadores em teorias não relativísticas*, concluída ao final desse período.

É nesse contexto que no ano de 1969 Swieca publica pela editora da Pontifícia Universidade Católica (PUC) o livro *Quebra espontânea de simetria*, tendo ainda como atividade nesse ano e em parceria com Schönberg a orientação de doutorado, pela USP, de Henrique Fleming, intitulada *Partículas fundamentais e a estrutura do próton*.

Mantém o ritmo de trabalho, em meio a publicações, viagens, palestras e o exercício da docência, em 1970 Swieca conclui a orientação de mestrado de Josif Frenkel, intitulada *Limite de Bjorken e comutadores a tempos iguais*, pela USP.

Julian Schwinger, antes da década de 1970, já estudava a EDQ em duas dimensões (EDQ2) como uma forma de se obter maior “visibilidade” e portanto, melhor entendimento de fenômenos quânticos reais, somente até então analisados qualitativamente, e em dimensão maior que dois, mais especificamente o que trata do comportamento dos férmions de Dirac⁸⁴. Swieca em parceria com o físico John Lowenstein⁸⁵, com pesquisa parcialmente fomentada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDE), investiram nessa temática e publicaram no ano de 1971 os resultados de suas pesquisas no artigo “Quantum electrodynamics in two dimensions”, pelo periódico *Annals of Physics*, no qual apresentam uma solução exata em EDQ2 para esses férmions. Referenciando-se inicialmente ao modelo de Julian Schwinger, esse artigo é assim iniciado à p. 172:

As soluções de operador do modelo Schwinger são fornecidas em vários calibres. A interpretação correta para a solução covariante com métrica

84 Os férmions são partículas elementares de *spin* fracionário (semi-inteiro), que obedecem a estatística de Fermi-Dirac, representadas pelos quarks e léptons, sendo esses últimos compostos pelos elétrons, múons e taus. A expressão “férmions de Dirac” significa que tais partículas elementares obedecem a equação de Dirac.

85 John H. Lowenstein, físico vinculado ao Physics Department, New York University, EUA.

indefinida é discutida. É obtida uma classe de calibres não covariantes, particularmente bem adaptada à análise da álgebra invariante de calibração. Como resultado dessa análise, verifica-se que não existem excitações físicas de elétrons no modelo. Setores de carga podem ser introduzidos, mas com o custo de violar a condição do espectro. Mostra-se que a solução de calibre de Coulomb conduz a uma métrica indefinida muito patológica. É discutido, nas seções finais, a eletrodinâmica quântica como limite de uma teoria de méson vetorial [quando a massa do méson tende a zero, p. 190] e os aspectos de quebra de simetria.

Ainda, referenciando-se em afirmações da TQC, tal como a relação entre invariância de calibre e simetria na EDQ, após os devidos cálculos nesse artigo, os autores concluem à p. 193:

[...] vemos que a quebra ou não das simetrias de calibre e de γ^5 depende do calibre do número q empregado. No entanto, em nenhuma das soluções estudadas encontramos bósons de Goldstone. Em todos os casos de quebra espontânea de simetria, não existe um gerador conservado correspondente das transformações locais e, portanto, o teorema de Goldstone não é aplicável.

Surge a questão: qualquer significado observável⁸⁶ pode ser atribuído às simetrias quebradas da eletrodinâmica quântica bidimensional? A resposta parece ser sim: a ausência de quantização de carga (e pseudo-carga, ou seja, de setores de carga discreta) entre as representações irredutíveis da álgebra observável é uma expressão de quebra espontânea de simetria, invariante em termos de calibre. Esta quebra física de invariância de calibre e de γ^5 , uma consequência imediata da falta de espectro físico de elétrons na teoria, leva diretamente à quebra espontânea de simetria no sentido matemático usual na representação não-covariante [...]. Em outros calibres, a estrutura simples da álgebra dos observáveis, e junto com ela a quebra física da simetria, pode ser mascarada pela presença de excitações de calibre espúrias. Em tais calibres, se as simetrias são ou não quebradas no sentido usual, isso não tem importância física.

Esse resultado importante, enfatizando a sua raridade e atualidade, enquanto artigo que contempla uma solução operatorial precisa para EDQ2, é assim comentado pelo físico Eduardo Cantera Marino da UFRJ,⁸⁷ em MARINO (2015, p. 3602-3):

Uma outra vertente importante da obra de Swieca consiste no estudo de modelos bidimensionais em TQC, que se tornaram laboratórios teóricos extremamente úteis para o estudo de diversos fenômenos descritos pelo Modelo Padrão, tais como o confinamento e a quebra da simetria quiral. Essa linha foi iniciada com aquele que talvez seja o seu trabalho mais

⁸⁶ Entenda inicialmente que em MQ observável representa uma propriedade de estado do sistema quântico, cuja relação entre esse estado e o seu valor, para ser descrita, necessita da álgebra linear.

⁸⁷ Eduardo Cantera Marino, físico especializado em TQC e que fora na PUC orientando de mestrado e doutorado de Swieca, trabalha atualmente na UFRJ, onde é professor titular.

importante: a solução operatorial exata da Eletrodinâmica Quântica de Férmions de Dirac, sem massa, em duas dimensões (EDQ2) (modelo de Schwinger) [...] O trabalho foi um marco na física teórica, constituindo até hoje um dos poucos exemplos de solução operatorial exata de uma teoria com interação. [...]

E completa Marino, dando destaque à precisão dos cálculos e admiração pelo fato de tal conquista ocorrer no primeiro ano da década de 1970, assim narrando no mesmo documento em igual página:

Na solução exata da EDQ2 também os férmions de Dirac e os fótons, originalmente presentes na lagrangiana, desaparecem completamente do espectro de excitações físicas. De fato, Swieca e Lowenstein mostraram de forma exata que a única excitação física da teoria é um bóson escalar massivo neutro! Toda a carga e quiralidade estão condensadas no vácuo. [...] A estrutura de vácuos θ^{88} da QCD [cromodinâmica quântica] é exatamente igual ao da EDQ2, como revelava a solução de Swieca e Lowenstein já em 1971!

Enquanto recebe as críticas dos seus trabalhos mais recentes, Swieca orienta pela USP a dissertação de mestrado do físico Gil da Costa Marques, intitulada, conforme Currículo Lattes, *Teoria de campos com métrica indefinida* (porém registrada como *Contribuição à teoria quântica de campos com massas complexas*, conforme título em documento da USP), concluída no ano de 1972.

Em 1975 Swieca trabalhou um período de 6 meses nos EUA como professor visitante na New York University, dando continuidade às suas pesquisas, e lá ele desenvolveu um teorema contido no artigo intitulado "Charge screening and mass spectrum", publicado no ano seguinte, que é também conhecido entre os pares por *Teorema de Swieca*, onde o autor faz conexões entre setores de carga e espectro de massa para TQC abeliana de calibre, no qual se lê, à p. 312:

Uma conexão geral entre a existência de setores de carga e o espectro de massa é estabelecida em teorias de calibre abeliana em um espaço-tempo de dimensão maior que dois. O papel excepcional do espaço-tempo bidimensional está relacionado ao "sóliton quântico" de Coleman.

Três anos após a publicação desse artigo, o físico alemão Detlev Buchholz, da "escola" de Haag, especializado em TQC, assim o analisou, em BUCHHOLZ (1979, p. 226):

88 Lê-se como vácuo teta (θ), em TQC é a função degrau, e caracteriza um espaço não vazio e portador de energia.

[...] fazemos uma demonstração rigorosa, confirmando um enunciado de Swieca sobre uma conexão entre a carga e o espectro de massa nas teorias de calibre abelianas. Nosso argumento é baseado em uma análise detalhada do comportamento do espaço de momentum de fatores de forma na ausência de campos de transporte de carga local. [...]

Em um artigo inspirado [1]⁸⁹, Swieca argumentou que uma corrente conservada identicamente $j_\mu = \partial^\nu F_{\mu\nu}$ leva a carga [ao valor] zero se houver apenas partículas massivas na teoria. Este é um resultado bastante interessante porque fornece uma explicação muito geral do efeito de blindagem da carga no modelo de Higgs [2]⁹⁰ e da existência de fótons na eletrodinâmica quântica.

Da leitura e análise desse artigo, após as devidas considerações, registra-se que Swieca nele relaciona o estado assintótico do espectro da partícula para carga com o espectro da massa, e mostra a consequência direta dessa relação quando aplicada à EDQ, fatos assim descritos por MARINO (2015, p. 5):

[Ele] revela uma relação profunda entre a existência de setores com carga não nula no espectro de estados assintóticos de uma TQC e o espectro de massa da mesma. Mais especificamente, mostra que a existência de estados carregados ocorre se e somente se a teoria possuir partículas de massa zero mediando a interação. O teorema foi demonstrado somente para o caso abeliano e vale para um espaço-tempo de dimensão maior do que dois. Aplicado à eletrodinâmica [quântica], por exemplo, o teorema mostra que o fato dos fótons não possuírem massa é, em última análise, o responsável pela existência de estados com carga na natureza! Em contrapartida, se devido a qualquer mecanismo, como, por exemplo, o de Anderson-Higgs⁹¹, os mediadores da interação adquirirem massa o sistema deixará de possuir estados com carga, mecanismo conhecido como “blindagem” da carga.

Esse resultado de Swieca, também denominado na literatura entre pares de *Teorema de Swieca para blindagem da carga*, tem seu alcance e respectivas implicações assim interpretados por SCHROER (2007, p. 7):

J. A. provou, em 1975 [publicado em 1976], um teorema (*Swieca's screening theorem*) que afirma que isto acontece [referindo-se à blindagem da carga] precisamente quando o “fóton” torna-se um méson vetorial massivo. Um modelo em que isto acontece na formulação perturbativa é o modelo de Higgs⁹², que desempenha um papel importantíssimo na formulação do Modelo

89 Referindo-se a SWIECA (1976).

90 Referindo-se a HIGGS (1964).

91 O mecanismo de Anderson-Higgs estuda como é gerada a massa de bósons (HIGGS, 1964).

92 Modelo de Higgs, teoria que estuda geração de massa de bósons de calibre (gauge), e por consequência da matéria, a partir de interações com o campo de Higgs e quebra espontânea de simetria (vide HIGGS, 1964) e que faz parte do Modelo Padrão.

Padrão. Na versão mais simples é eletrodinâmica quântica com um campo escalar que gera a blindagem da própria carga e faz o fóton massivo.

A supercondutividade é uma propriedade de determinados materiais, caracterizada pela capacidade de conduzir corrente elétrica sem perdas, ou minimizadas ao máximo, à temperatura muitíssimo baixa. Sua primeira ocorrência foi registrada em abril de 1911 pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), quando em experimento ele proporcionou condições para a corrente elétrica atravessar uma amostra de mercúrio à temperatura de 4,2 kelvin ($4,2\text{K} \approx -268,95 \text{ }^\circ\text{C}$), verificando seguidamente que não existiu alteração entre o seu valor medido antes e o de depois da travessia (ONNES, 1911).

A partir desse experimento as pesquisas sobre supercondutividade despertaram ainda mais o interesse dos físicos e se estenderam por décadas em várias instituições⁹³, até aos nossos dias, gozando de diferenciada relevância em C&T, pois é a partir dela que se produz condutores elétricos, com o mínimo de “perda de carga”, os denominados *supercondutores*. Também cresce a sua relevância pelas aplicações tecnológicas, a exemplo do seu uso nos trens de alta velocidade. Sobre tal propriedade desses materiais, em abordagem quântica, o *Teorema de Swieca para blindagem da carga*, quando aplicado para os devidos estudos, mostra existir uma correspondência imediata, conforme ainda descreve MARINO (2015), em igual página à anterior:

Um belíssimo exemplo de aplicação do Teorema de Swieca é no fenômeno da supercondutividade. Em um supercondutor, o fóton efetivamente adquire uma massa não nula. Tal fato se manifesta experimentalmente através do efeito Meissner-Ochsenfeld⁹⁴ e foi descrito pela primeira vez pela teoria fenomenológica de London. A inexistência de estados carregados no espectro, exigida pelo teorema, aparece então através da própria natureza do estado supercondutor: toda a carga (pares de

93 Destacam-se a descoberta do efeito Meissner-Ochsenfeld (MEISSNER; OCHSENFELD, 1933), a descrição da supercondutividade em 1935 pelos irmãos F. e H. London, o trabalho de GINZBURG & LANDAU (1950), o artigo de COOPER (1956), o artigo BARDEEN *et al.* (1957a,b) e o artigo de BOGOLIUBOV (1958).

94 O efeito Meissner-Ochsenfeld, que ratifica propriedades da supercondutividade, foi descoberto pelos físicos alemães Walther Meissner e Robert Ochsenfeld, em 1933, consiste em cessar a ação de um campo magnético externo em um condutor elétrico mediante resfriamento, quando em temperatura abaixo do valor crítico. O experimento pelo qual o efeito em pauta se manifesta cresceu em importância por ser ponto de partida para se definir propriedades do estado de supercondutividade e por consequência contribuir para caracterizar, qualitativa e quantitativamente, os vários materiais supercondutores (MEISSNER; OCHSENFELD, 1933).

Cooper⁹⁵) está condensada" no estado fundamental (vácuo) e não existem excitações carregadas. [...]

Retomando a década dos anos de 1960, em 1969, já era significativo o reconhecimento das pesquisas físicas realizadas por Swieca, tanto no campo científico quanto no político. Essas conquistas, em ambos os campos, são assim descritas por SCHROER (2007, p. 6):

Quando eu visitei a USP pela segunda vez, em 1969, o talento impressionante de J. A. Swieca já tinha sido reconhecido pela maioria da física brasileira. Neste ano ele recebeu o Prêmio Moinho Santista por aqueles trabalhos. Naqueles anos de repressão da ditadura, aparentemente, o governo militar ofereceu a André uma posição diplomática como adido científico em Israel, que ele recusou. Conhecendo a sua opinião política, acho que ele decidiu que formar jovens cientistas e fazer pesquisa no Brasil era um trabalho mais satisfatório do que representar a ditadura em Israel.

Vemos assim a credibilidade já conquistada por Swieca aos 33 anos, em 1969, por algumas das suas contribuições para a TQC pelo formalismo conceitual da EDQ.

Apesar do progresso nas pesquisas, há em Jorge A. Swieca insatisfações internas e externas em relação ao seu ambiente de trabalho, que o faz criar vínculos com outra instituição, fato que será ulteriormente analisado na seção 4.4 do presente capítulo.



No sentido de leitura: Swieca, J. Gianbiagi e L. C. Gomes.

Fig. 8 Swieca e físicos: Jose Juan Giambiagi e Luiz Carlos Gomes
Fonte: Nussenzveig (2007).

95 Par de elétrons, em estado ligado de energia, caracterizado pela interação elétron-fônon e que fundamenta a supercondutividade COOPER, 1956.

4.3 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NA UFRGS: A CONTRIBUIÇÃO DE THEODOR MARIS

Em 1934 foi fundada por decreto a Universidade de Porto Alegre, para atuar como universidade estadual, existindo nessa um grupo de professores que se dedicava a formar professores de física para o ensino de segundo grau (ensino médio) e que tinha também o propósito de realizar pesquisas físicas. Embora no período de 1942 a 1953 existissem apenas poucos físicos na instituição, ainda assim foram tomadas algumas decisões para tal desiderato.

Entre as primeiras decisões, ainda em 1953 e com carência de físicos, cria-se o Centro de Pesquisas Físicas da UFRGS (CPF - UFRGS) e recorre-se à experiência do professor holandês, bem relacionado com o CBPF e ex-vinculado a esse centro desde 1951, o engenheiro eletrônico Gerard Hepp, provindo da empresa Phillips sediada na Holanda, que se transfere em 1954 para o então CPF e inicia o convite a professores estrangeiros para trabalharem nesse centro. Dentre esses convidados, no ano de 1957, tem-se a presença do físico argentino Jorge Staricco, que ministrou seminários sobre Mecânica Quântica (SANTOS, 2017).

Nesse final de década, em que o país é presidido (1956 – 1961) por Juscelino Kubitschek, já se constitui em verdade para o Governo do Brasil de que o país necessita de centros de pesquisas científicas para se desenvolver. Os eventos científicos se sucedem, o Brasil compõe a pauta da 1ª Escola Latino-Americana de Física, a SBPC tem agenda ativa; e é dessa mobilização nacional, que vem nascendo os órgãos de pesquisa no país, com destaque aqui nessa TD para o dia 9 de março de 1959 em que é decretada a criação do Instituto de Física da UFRGS.

Como resultado dos esforços para formação do IF da UFRGS, toma conhecimento os professores desse instituto da existência do físico holandês Theodor August Johannes Maris que tem interesse de trabalhar na América do Sul. Ele, é convidado, aquiesce ao convite e ainda nesse ano vincula-se a essa universidade, passando nessa a ser também conhecido por Theo Maris.

Theodor Maris que nasceu em Weert, Holanda, no dia 3 de janeiro de 1920, emigra para a Alemanha, após cursar o ensino médio em seu país, residindo em Munique onde inicia e concluiu o curso de doutorado em 1954 na Universidade de Munique, com a tese *Über die Statistische Auffassung der Entropie in Nicht-Stationären Prozessen* (Sobre a interpretação estatística da entropia em processos não-estacionários), orientada por F. Bopp (vide seção 1.1 dessa TD). Após essa formação, Maris emigra para a Suécia, no Instituto Nobel, em Estocolmo, no ano de 1954, e depois, nesse mesmo país, para o Instituto Gustaf Werner de Química Nuclear, em Uppsala, no ano de 1956. Em 1958 ele segue para a Dinamarca, vinculando-se ao Instituto de Física Niels Bohr, em Copenhague, onde trabalhou com a reação nuclear do tipo *quase-livre*, na qual uma partícula em alta energia (próton ou elétron) incide sobre o núcleo, “retirando” um núcleon de uma camada nuclear, ou seja, removendo “parte do núcleo do átomo” para outra camada, sem que ocorra interações entre as partículas consideradas “violentas”. Esse périplo de Maris é assim descrito por DILLENBURG & GERHARD (1994):

Em 1958 ele foi para o Instituto de Física Niels Bohr, em Copenhague. Em Uppsala, Maris propôs a investigação da chamada reação quase-livre próton-próton, na qual um próton incidente arranca um próton nuclear que se comporta como se fosse quase-livre; essas reações ($p, 2p$) são especialmente adequadas para investigar a estrutura de camadas dos núcleos, em particular as camadas internas. Além de propor os processos quase-livres, de interpretar e analisar teoricamente os resultados, Maris participou também ativamente das experiências propriamente ditas, adquirindo assim valiosa experiência para sua atividade subsequente no Brasil.

No ano seguinte, 1959, Maris está como pesquisador associado da Universidade da Flórida, nos EUA, e chega ao conhecimento do IF-URGS, com mais detalhes, que Maris manifestava o desejo de trabalhar com Teoria Quântica de Campos, mais especificamente em Eletrodinâmica Quântica. Essa notícia é suficiente para os representantes do IF persuadirem o reitor da URGS a convidar Maris para esse instituto. Negociações realizadas, ainda em 1959, Maris, então com 39 anos de idade, chega ao Instituto de Física e inicia uma trajetória de trabalho, com profícuas pesquisas. A chegada ao Brasil de Maris é assim recordada em JACOB (2010, p. 19):

[...] em outubro de 59 chegou o Theodor Maris a Porto Alegre. Ele chegou com a senhora e duas filhas. Era a nossa esperança de começar a formar um instituto de física aqui [...] Ele é o responsável pelo início da pesquisa em física aqui, nessa universidade, tanto na parte teórica quanto na experimental.

A expectativa dos físicos de então da URGS, com a chegada de Maris, era a de se iniciar a construção de laboratórios para também se fazer pesquisa em física nuclear experimental nessa universidade. Mas, existiam divergências entre os físicos do IF, e de duas formas: o grupo que considerava que primeiro o físico deveria ir para o exterior estagiar num laboratório e “voltar pronto” para o Brasil; e o grupo que defendia que o físico deveria ser formado no próprio laboratório da URGS e posteriormente, se necessário, ir para o exterior. Para reflexionar sobre esse impasse foi organizado no ano de 1960 um simpósio no IF-URGS, com físicos experientes, assim narrado em JACOB (2010, p. 21):

Fizemos um pequeno simpósio que até hoje [1977] é falado pelas pessoas que compareceram: o Lattes, o Goldemberg, o Luis Carlos Gomes, o Hervásio de Carvalho, pessoas com ideias completamente diferentes. O pessoal achava que devia se formar as pessoas fora para depois voltarem e virem trabalhar aqui. Já o Maris não, ele lutou muito para que se começasse aqui. Dizia: “Está bem, acho que uma pessoa deve ir para fora para trazer experiência, mas deve-se começar aqui simultaneamente, também, aqui.” E isso é o que foi feito.

A trajetória de Maris se inicia e se estende por várias atividades no IF-URGS, desde as administrativas as de pesquisas. Para os propósitos dessa tese, dá-se destaque a sua atuação como professor, pesquisador e orientador de alunos em EDQ. Nessa área foram orientados pelo professor Maris vários alunos de graduação, mestrado e doutorado, com respectivas publicações científicas em TQC pelo formalismo conceitual da EDQ, estando entre esses alunos os físicos Gerhard Jacob, Bernardo Liberman, a física Victoria E. Herscovitz e o também físico Darcy Dillenburg, que não foi seu aluno, mas se iniciou em EDQ também com Maris.

Essa trajetória inicial de Maris é parcialmente recordada nas palavras de DILLENBURG & JACOB (2009):

Quando Theo chegou, ele já estava se preparando para entrar em uma nova área de pesquisa, Teoria Quântica de Campos. [...] sua principal ideia era investigar simetrias espontaneamente quebradas em Eletrodinâmica Quântica e especificamente formular a teoria, atribuindo massas de origem puramente eletromagnética ao elétron e ao múon e, portanto, iniciando com massas nuas nulas para essas partículas. A consequência óbvia dessa abordagem é que não existe escala de massa (ou comprimento) em tal formulação da eletrodinâmica quântica e só faz sentido calcular razões de massa para partículas com interação puramente eletromagnética. O problema da razão de massa elétron-múon permanece em aberto até hoje.

As pesquisas no IF-URGS foram então iniciadas, com os físicos citados e outros que continuaram manifestando o desejo de ir para o exterior estagiar em algum laboratório e seguidamente voltar para o Brasil, fatos assim narrados por JACOB (2010, p. 22-23):

Pessoalmente, continuei trabalhando com o Maris até 1961. [...] Então o Maris conseguiu que eu fosse trabalhar no Niels Bohr Institute em Copenhagen [...] voltei para cá em 63 [...]. De lá para a frente, eu acho que é a vida normal de qualquer físico: a gente vai a congresso, vai fazendo Física e burocracia, vai trabalhando, publica de vez em quando, dentro das dificuldades do Brasil. Eu continuei trabalhando com o Maris em reações quase livres e também em Eletrodinâmica Quântica. Nós íamos publicando um trabalho ou outro baseado nas ideias que o Maris tinha, principalmente. Bom, aí a vida segue normal.

Com uma dinâmica de trabalho própria do seu líder Theodor Maris, as pesquisas no IF-URGS prosseguiram e proporcionaram a esse instituto, nos dez primeiros anos, atingir a marca de 50 artigos científicos, em que metade tinha a sua participação.

Por sua vez, é oportuno mencionar que o conteúdo invariância dilatacional é de significativa relevância em EDQ e se registra que após os artigos DIRAC (1936a,b), no decorrer dos anos, novas pesquisas e respectivas publicações se sucederam sobre a invariância em assunto.

Vinte anos após esses artigos, o físico J. A. McLennan, no artigo “Conformal invariance and conservation laws for relativistic wave equations for zero rest mass”, publicado pelo periódico *Il Nuovo Cimento* em 1956, prova de forma detalhada a presença de Invariância Conforme⁹⁶ em algumas equações de ondas relativísticas, tais como equações homogêneas de Lorentz, estando presente nessas a equação para o campo de neutrino (McLENNAN, 1956). Essa prova promoveu entre os pares um otimismo de que essas conclusões poderiam ser estendidas para outras equações de campos relativísticas, que trabalhassem com massa de repouso zero para diferentes ou iguais partículas.

96 A Teoria do Campo Conforme (TCC), que é subconjunto da TQC, como já apresentada em nota de rodapé anterior, se caracteriza por suas transformações (simetrias de espaço-tempo, denominadas simetria conforme porque provenientes de invariância conforme) se manterem invariantes ao se mudar a escala de comprimento devido a preservação de ângulo entre vetores, não importando, pois, as distâncias entre esses. A TCC tem se tornada ainda mais relevante pelas suas contribuições para a teoria das cordas e física da matéria condensada (POLYAKOV, 1974; DIXON, 1989, pp. 3,9).

No ano seguinte, 1957, o físico Sidney A. Bludman, dando continuidade às pesquisas na temática invariância de escala de comprimento para partículas de massa de repouso zero, mediante o artigo “Some theoretical consequences of a particle having mass zero”, publicado pela *Physical Review*, apresenta algumas conclusões quanto aos comportamentos do operador de campo γ_5 ⁹⁷, da representação do grupo não-homogêneo de Lorentz e da redução do número de componentes do campo eletromagnético livre, tais como descritos à p. 1163:

Quando a massa é zero, o operador γ_5 comuta com o Hamiltoniano de um campo de espinor não-interativo. Isto leva à possibilidade de um neutrino de dois componentes que tenha sido empregado em conexão com reações de neutrinos que não conservem paridade. Cada representação do grupo completo não-homogêneo de Lorentz, descrevendo uma partícula livre de *spin* arbitrário não-nulo, pode ser dividida da mesma maneira quando a massa é nula. Em particular, uma redução do campo eletromagnético livre de seis componentes para três é exibida de um modo exatamente análogo à redução de espinores sem massa de quatro componentes para dois componentes.

Para o autor, essa situação retrata que a ausência de simetria por paridade não pode ser entendida como consequência de propriedade específica devido a existência de campo livre, mas devido às interações próprias e naturais que ocorrem no mundo físico. O físico em sua abordagem se propõe ainda a avaliar, nas condições da invariância em pauta, as consequências de ausência de campo escalar, com massa nula, e o comportamento da partícula de Dirac, tal como se lê em igual página:

Discute-se a possibilidade de relacionar a degenerescência de γ_5 do campo de *spin* semi-inteiro sem massa à sua invariância sob transformações de coordenadas conformes. A partícula de Dirac livre de dois componentes é invariante sob as transformações de ponto conforme e, também, sob as transformações de raio recíproco. [...]

Certamente, resultados de pesquisas sobre invariância conforme, tais como os apresentados, motivaram Maris a realizar pesquisas em EDQ na URGS, referenciadas nessa temática.

Para melhores entendimentos ulteriores, é oportuno enfatizar que a EDQ não é invariante de escala, ou seja, não é invariante dilatacionalmente; que em TQC relativística, escala de massa, do ponto de vista físico, equivale a escala de comprimento; a presença de campo

⁹⁷ γ_5 é uma matriz ($\gamma_5 = i \gamma_0 \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3$).

escalar, com termos de massa, em TQC relativística, implica em torná-la uma teoria massiva e portanto não invariante de escala (ou dilatacionalmente não invariante).

Por seu turno, em EDQ físicos como Y. Nambu, J. Lasinio e J. Goldstone colocam a relação entre a massa do elétron e a do múon como tema relevante de pesquisa, sendo-o também analisado de forma diferenciada por outros físicos como em Baker & Glashow (1962).

Em maio de 1963, Maris passa um período nos EUA, vinculado ao Departamento de Física da Universidade de Illinois, em Urbana, e tem a invariância de escala em EDQ como tema da sua pauta de pesquisa.

Neste ano, com fomento parcial para pesquisa concedido pela National Science Foundation, Maris publica no mês de outubro, pelo periódico científico italiano *Il Nuovo Cimento*, o artigo “An electrodynamic approach to the electron-muon mass ratio”, no qual o físico propõe, ao analisar a relação de massa entre o elétron e o múon, uma alternativa em EDQ de como esses dois léptons podem ter interações quase idênticas, porém com massas significativamente diferentes. Propõe ainda que pela via da teoria da perturbação fundamentada em uma invariância não dilatacional, resultante de interações de campos com carga elétrica, é possível determinar a massa de um deles.

Referenciando-se na fundamentação da supercondutividade, essas alternativas e as premissas adotadas são propostas pelo físico também como uma sugestão de mudança para as equações que ditam os rumos da EDQ, tais como as que envolvem a renormalização. Essa proposta é assim inicialmente descrita em MARIS (1963, p. 378):

Por um mecanismo bem conhecido a partir da teoria da supercondutividade, as partículas de um campo de férmion sem massa carregado eletricamente podem obter uma massa de repouso não-nula. Se a renormalização de massa na eletrodinâmica quântica usual é infinita, então parece provável que uma reformulação adequada das equações básicas da eletrodinâmica quântica, que elimina a constante infinita δm , resultará numa teoria dilatacionalmente invariante [invariante de escala] correspondente ao modelo acima. A invariância dilatacional da teoria básica não é motivo de objeção e abre pelo contrário uma possibilidade natural de entender como dois léptons podem ter interações quase idênticas, mas massas muito diferentes. A massa de um lépton⁹⁸ é então

98 Lépton é uma partícula elementar (fundamental) de spin $\frac{1}{2}$, que pertence ao grupo dos férmions (elétron, tau, múon e suas respectivas antipartículas), que não interage fortemente, e é considerada

determinada pela perturbação não-dilatacionalmente invariante causada pelos outros campos carregados presentes na natureza.

Embora revelando não dispor inicialmente de qualquer dado conclusivo, numérico ou conceitual, quanto à razão entre os valores de massa do elétron e do múon para a defesa dessa proposta – porque objetiva fazê-la em nível qualitativo, já que reserva a abordagem quantitativa para os próximos artigos –, o físico do IF-URGS, nesse artigo, propõe entender essas partículas fermiônicas como tendo massas nuas iguais a zero e “portadoras” de dois campos diferentes, devendo-os ser entendidos como que campos criados por “neutrinos” de 4 componentes. Em convite aberto para diálogo com os pares, Maris apresenta sua indagação inicial e entende que isentar as equações da EDQ dos termos de massa dá margem, inicialmente, para possíveis objeções à abordagem proposta, tal como se lê à página 379:

A questão básica é assim: "O que ocorre se um campo de neutrinos de 4 componentes recebe uma carga elétrica?" [...] O principal objetivo desta apresentação é abrir uma discussão sobre o que parece ser uma maneira natural de tentar entender os léptons a partir de uma perspectiva unificada. A ausência do termo de massa nas equações da eletrodinâmica quântica tem consequências de longo alcance e pode até parecer ser imediatamente passível de objeção pelas seguintes razões:

- 1) A eletrodinâmica quântica sem o termo de massa não contém nenhuma unidade de comprimento. Como poderia uma massa diferente de zero para uma partícula aparecer na teoria, já que não existe nenhuma unidade [de medida] para expressá-la?
- 2) A teoria é dilatacionalmente invariante. Mesmo que apareça um valor de massa para um único estado de partícula, a continuidade da transformação de dilatação [de escala] garante que, nesse caso, todos os valores de massa para um único estado de partícula sejam possíveis. O espectro de massa discreto, observado experimentalmente parece, portanto, incompatível com a invariância dilatacional.
- 3) A teoria é invariante sob transformações [com operador de campo] γ_5 . Mesmo se um espectro discreto pudesse ser obtido, a invariância γ_5 implicaria uma degeneração dupla adicional para estados de partícula única.

Quanto à possível objeção (1), Maris propõe usar a teoria de invariância dilatacional para tratar da dinâmica *interna* do lépton, ao passo que a sua escala de comprimento surgiria da

uma partícula leve em comparação aos hádrons (a formulação do conceito de hádron começa com os físicos Murray Gell-Mann & Kazuhiko em 1961). A classificação das partículas pelo Modelo Padrão, formulado em 1972/1973, define o hádron como uma partícula composta formada por quarks confinados em estado ligado, sendo o hádron classificado em dois tipos: bárion e méson, mantendo-se a afirmação do início da EDQ de que os léptons interagem entre si pela força eletromagnética (NEDDERMEYER & ANDERSON, 1937; THOMSON, 1897; DIRAC, 1928ab).

perturbação que o campo leptônico sofre a partir da interação com outros campos carregados (MARIS, 1963, p. 381).

As respostas para as objeções (2) e (3) o físico do IF da URGs desenvolve-as em duas análises, que correspondem às seções 2 e 3, respectivamente, baseadas nas hipóteses de um campo de “neutrino” de 4 componentes carregados e da influência de uma perturbação γ -invariante não dilatacional.

Na seção 2, devido às limitações das equações de campo da EDQ, o físico propõe adotar nos cálculos para as partículas uma massa nua nula, ao invés de infinita, lembrando que esses são os únicos dois valores que são invariantes de escala. De acordo com MARIS (1963, p. 383):

Como as equações de campo são mal definidas, pode-se argumentar que, exceto talvez por considerações estéticas, a escolha de tomar a massa nua infinita ou nula não tem, no momento, grande importância. Essa escolha pode presumivelmente ser compensada por outra interpretação do termo de interação. A hipótese de uma massa nua que desaparece, no entanto, mostra explicitamente a invariância de dilatação da teoria e esse é o ponto essencial. Sugere, e pretende implicar, que qualquer definição da interação não deve ser feita com a ajuda de uma unidade de comprimento fixo, mas de uma maneira dilatacionalmente invariante. Em suma, o modelo do “neutrino” carregado parece conduzir à eletrodinâmica quântica renormalizada usual.

Na seção 3, após recordar a causa que conduz à violação da invariância de escala na teoria e sua respectiva consequência, o autor enfatiza a vantagem da sua proposta para expressar a massa de lépton, conforme descreve em MARIS (1963, p. 384):

Por causa desta perturbação, o lépton “vê” uma escala de comprimento, e sua massa não será mais arbitrária. Este é talvez o ponto mais interessante da presente abordagem. [...]
Este problema de encontrar o valor de massa estável selecionado por uma pequena perturbação tem muita similaridade com uma classe de problemas bem conhecidos, como por exemplo o da [...] mecânica quântica para calcular uma função de onda perturbada em caso de degenerescência. A solução do problema, no nosso caso, daria a massa do lépton expressa nas massas e outras grandezas de dimensões de comprimento dos campos perturbadores.

Ainda com fomento parcial para pesquisa concedido pela National Science Foundation, em junho de 1963, Maris, juntamente com Haag, submetem à *Physical Review* para aprovação

o artigo “Dilatationally invariant quantum electrodynamics of electrons and muons”, que é publicado em dezembro desse ano. Pela credibilidade do periódico e do parceiro de pesquisa, pode-se dizer que foi um importante passo dado pelo IF da URGs em sua entrada na comunidade internacional de físicos que estuda a TQC pelo formalismo conceitual da EDQ.

Nesse artigo os autores se propõem a estudar a EDQ dilatacionalmente invariante, ou seja, a simetria por invariância de escala, e tal como prometido por Maris no artigo anterior, tem-se nesse artigo uma considerável parcela de conteúdo dedicada a abordagem quantitativa. Para alcançar os objetivos propostos, os autores desenvolvem-no em duas seções que tratam, respectivamente, da equação do propagador para um lépton (seção II), na qual analisam a condição de “ausência de perturbação” para essa partícula, e da influência mútua das partículas carregadas (seção III), na qual a perturbação é analisada enquanto uma alteração do propagador de fótons.

Seguem-se as avaliações de possibilidade de cálculo eletrodinâmico para a relação entre as massas de elétrons e múons. Mais à frente, eles propõem que não deve existir parâmetro algum que tenha dimensão nas equações básicas dessa EDQ. Os físicos fazem seguidamente uma análise na qual consideram existir duas formas de abordagem em EDQ, que denominam de realista e idealista respectivamente, assim descritas em HAAG & MARIS (1963, p. 2325):

A eletrodinâmica quântica, na medida em que lida apenas com léptons e fótons, é considerada como uma teoria dilatacionalmente invariante. Em outras palavras, as equações básicas não devem conter nenhum parâmetro que tenha uma dimensão. A partir da formulação habitual da eletrodinâmica quântica, isso pode ser alcançado de uma entre duas maneiras. A primeira maneira (realista) é colocar as massas nuas do elétron e do múon iguais a zero. Seria então necessário supor que as integrais de auto-energia são de fato convergentes, o que poderia ser verdade se as funções de vértice $\Gamma G(p,q)$ diminuíssem de maneira suficientemente forte para razões grandes dos momentos p e q . De acordo com este retrato [interpretação], as massas do elétron e do múon seriam de origem puramente eletromagnética, mas de tal forma que a escala da geometria e, portanto, também a escala de massa permanece indeterminada pela teoria. A segunda interpretação (idealista) não supõe que as integrais de auto-energia são finitas, mas que não têm significado físico. Se for esse o caso, então as equações básicas da eletrodinâmica quântica devem ser ligeiramente restringidas pela omissão da relação que expressa a renormalização da massa δm^{99} como a integral de auto-energia. Isso pode ser feito facilmente sem afetar qualquer parte da teoria.

99 Lê-se: delta m.

Após esta abordagem, os autores mostram a opção escolhida, em igual página a da citação anterior:

Nossos cálculos indicam, no entanto, que, sem uma interpretação "realista" [ou seja a que toma massas nuas para o elétron e o múon iguais a zero], há pouca esperança de determinar os índices de massa.

Duas semanas antecedendo o deflagrar do golpe militar no Brasil, ocorrido em 31 de março de 1964, Maris e sua equipe, composta pela física Victoria E. Herscovitz e pelo físico G. Jacob, publicam, como fruto de suas pesquisas em EDQ realizadas nesse instituto, o artigo intitulado "Quantum electrodynamics with zero bare fermion mass" pela *Physical Review Letters*, o qual assim se inicia em MARIS et al. (1964a, p. 313):

É objetivo deste artigo mostrar que a divergência logarítmica da auto-massa do férmion, na teoria de perturbação da ordem mais baixa da eletrodinâmica quântica, desaparece se a aproximação for suficientemente melhorada e se supormos que a massa de férmion nua tenha valor zero. Começamos a partir da equação de Dyson para o férmion sem o termo de massa nua; tal como na teoria da perturbação da ordem mais baixa, desprezamos as correções no propagador de fóton e no vértice, e colocamos [a constante de renormalização] $Z_2 = 1$.

Do até então visto, prosseguem os autores nesse artigo com a abordagem realista e após os devidos cálculos, já se manifestam as citadas divergências, sendo-as absorvidas pela renormalização, sinalizando adiante os autores para uma postura otimista quanto a extensão dessa abordagem para interações mais fortes (de maiores valores de energia), conforme afirmam à página 315:

[...] Em particular, o primeiro termo reproduz a bem conhecida divergência logarítmica da teoria da perturbação da ordem mais baixa.

Para compensar essa divergência, é usual introduzir ou uma massa de férmion nu infinita ou um corte [*cutoff*] na teoria. Como vimos, a suposição de uma massa de férmion nula resulta na eletrodinâmica quântica renormalizada usual. A presente abordagem possui várias características atraentes. As equações básicas da teoria são melhor definidas do que no caso de uma massa nua infinita, a renormalização de massa é finita sem o uso de um ponto de corte, e aparece uma conexão entre os léptons carregados massivos e aqueles neutros sem massa. Além disso, a invariância dilatacional da teoria é atraente do ponto de vista geral e poderia justificar alguma esperança para um cálculo da razão de massa elétron-múon e da razão entre a escala de massa do sistema leptônico e a do grupo de partículas que interagem fortemente.

Do entendimento de calibre, conforme já abordado na seção 1.2, tem-se que vários são seus tipos, tais como o calibre de Fermi, o calibre de Landau e o calibre de Feynman, daí se usar em TQC e EDQ a expressão fixar o calibre da Lagrangiana.

É nessa temática que Maris em parceria com V. E. Herscovitz e G. Jacob desenvolvem pesquisa em EDQ, parcialmente fomentada pelo *Research Corporation for Science Advance* (dos EUA) e CNPq, que resulta no artigo “A Generalization of the Landau Gauge” publicado em setembro desse ano pelo periódico *Il Nuovo Cimento*. Nesse artigo, considerando uma parcela da auto-energia do elétron, em condições próprias, é calculado um calibre, verificando-se ainda que os propagadores arbitrários de fótons e elétrons desaparecem, sendo que para o caso especial do propagador de fótons livres, o calibre de diagonalização é o calibre de Landau. Para tal intento, os físicos se utilizam, principalmente, das equações desenvolvidas por F. Dyson para propagador de férmion com massa nua zero e obtém resultados satisfatórios:

Uma maneira de investigar a eletrodinâmica quântica de partículas de massa zero é através das equações de Dyson para os propagadores. A complexidade da discussão dessas equações depende fortemente do calibre escolhido e neste artigo iremos derivar um calibre que parece minimizar essa complexidade [...] [p. 1634] já que a equação de Dyson, correspondente para o propagador de férmion, se reduz a uma equação integral de apenas uma função escalar e a constante de renormalização Z_2 se torna finita. (MARIS et al. 1964b, p. 1633-1634)

Realizadas as etapas de cálculo, cientes das devidas particularidades e limitações para a solução obtida, os autores concluem o artigo, registrando êxito, tal como afirmam:

Para [condição específica do propagador de fóton livre] a eq. (9) [desenvolvida pelos autores] foi resolvida exatamente (coerente com MARIS et al., 1964a). Como neste caso a teoria não contém nenhuma constante com a dimensão de comprimento, [a massa renormalizada da partícula] pode ser escolhida arbitrariamente. Isso não é necessariamente mais verdadeiro se presentes polarizações de vácuo devido a outros campos carregados. (MARIS et al. 1964b, p. 1638)

Por seu turno, como resultado de pesquisa que fora fomentada pelo CNPq e pelo *Professorship Program of the Pan American Union*, em novembro de 1964, o IF da URGs publica com a mesma equipe de físicos o artigo intitulado “Broken symmetries and the electron-muon problem”, pela revista *Il Nuovo Cimento* (MARIS et al., 1964c).

Referenciando-se na proposta de conservação de corrente vetorial axial em interações fracas de Nambu (1960), na teoria BCS da supercondutividade descrita em Bardeen et al. (1957a) e na parceria presente em Haag & Maris (1963), essa que resultou na proposta de uma EDQ dilatacionalmente invariante para elétrons e múons, Maris e seu grupo de pesquisa fazem uma análise sobre o comportamento de propagadores fermiônicos na EDQ, com alusão ao seu comportamento em relação ao vácuo, dando ênfase para a sua não singularidade e a presença de classes de equivalência.

Na abordagem dos autores, apesar de a EDQ dispor de algumas propriedades de simetria, essas não devem ser aplicadas para a situação de vácuo, tal como descrevem:

São investigados os propagadores na eletrodinâmica quântica dos campos combinados de elétrons e múons com massas nuas iguais a zero. A teoria de base possui várias propriedades de simetria que não estão presentes no vácuo. Isso resulta em uma não-unicidade das descrições matemáticas, sendo definidas as classes de equivalência para os propagadores fermiônicos. Na aproximação utilizada, mostrou-se que uma significativa correlação de vácuo dos dois campos leptônicos é incompatível com um vácuo invariante de paridade exata. (MARIS et al., 1964c, p. 946)

O artigo apresenta dois tipos de análise: a primeira para a *EDQ de dois campos fermiônicos sem massa de quatro componentes*, e a segunda para o *propagador de férmion*.

Os autores sublinham que tanto as equações de campo provenientes da EDQ convencional, que são obtidas para elétrons e múons sem incluir os termos de massa nua e nomeadas nesse artigo por equações (1), bem como as regras de comutação são invariantes sob determinadas transformações. Para os fins dessa análise, eles organizam essas transformações em dois grupos, conforme se lê em MARIS et al. (1964c, p. 949):

O primeiro grupo consiste em:

- a) as transformações próprias de Lorentz;
- b) as transformações de paridade, conjugação de carga e inversão de tempo;
- c) a bem conhecida transformação de calibre do segundo tipo, tendo como caso especial a multiplicação de ψ [espinores] por um fator de fase constante;
- d) a transformação de dilatação [...].

Já o segundo “grupo” (nomeado como classe de transformações) é representado pelas formas exponenciais $\psi'(x)$ provenientes dos espinores ψ (op. cit., p. 949).

Por sua vez para realizar a segunda análise, relativo ao propagador férmion, os autores se referenciam nos formalismos conceituais desenvolvidos para a matriz espalhamento na EDQ por Dyson (1949b) e no das funções de Green para campos quantizados por Schwinger (1951a).

Pode-se afirmar que entre os resultados obtidos em Maris et al. (1964c), mais particularmente quanto a solução e respectivos desdobramentos do conjunto de equações denominado eqs. (10), que assumir a conservação de paridade implica em inexistência de relações relevantes entre dois campos fermiônicos no vácuo, na possibilidade de diagonalizar a matriz espalhamento entre esses campos e em duas possibilidades específicas de acoplamento entre propagadores, tais como relatam:

Isso mostra que, assumindo a conservação da paridade, não há, na presente ordem do cálculo, correlações significativas entre os dois campos de férmion presentes no vácuo. Esta conclusão também se segue diretamente do fato de que é possível diagonalizar S [a matriz espalhamento] nas duas coordenadas dos campos de lépton, como mostra a eq. (14).

Caso o vácuo seja invariante por paridade, [as] eqs. (16) mostram que os dois propagadores de férmion só podem ser acoplados pela polarização do vácuo e pelas correções de vértices. A razão de massa elétron-múon seria então determinada por esses acoplamentos. (op. cit., p. 953)

Os autores concluem o artigo, sinalizando como relevante considerar esses resultados teóricos ao se avaliar resultados experimentais nessa temática disponibilizados ou futuros.

Ainda no ano de 1964, Maris concluiu a orientação de doutorado em física do seu aluno e parceiro de pesquisas Gerhard Jacob, intitulada *Espalhamento quase-livre e estrutura nuclear* pela URGs.

Com artigos em submissão para avaliação de periódicos, assim se inicia o ano de 1965 no IF da URGs. Tal como nos anteriores, paralelamente a outras atividades, mantêm-se as pesquisas em EDQ, sendo que em julho desse ano, com fomentos parciais realizados pelo U. S. Army Research Office e CNPq, esse instituto é contemplado com a publicação de mais um artigo nessa temática, realizado por T. Maris, V. Herscovitz e G. Jacob, intitulado “Length scale in quantum electrodynamics without a bare mass”, novamente pelo *Il Nuovo Cimento* (MARIS et al., 1965a).

Nesse artigo que tem, também, como referências o comportamento de campos de partículas leptônicas como o “neutrino” e outras carregadas, propõe-se à página 783 uma escala de comprimento para a EDQ:

Uma escala de comprimento definida na eletrodinâmica quântica sem massa nua só pode ser induzida por um acoplamento com outro sistema. Este problema é estudado em um modelo que consiste num campo de “neutrino” carregado e campos carregados de partículas que interagem fortemente. [...] A aproximação utilizada permite apenas a conclusão de que a relação entre a massa de lépton e as massas das partículas que interagem fortemente não é de ordem zero na constante de acoplamento eletromagnético renormalizada.

Registra-se assim, nesse artigo, a continuidade da proposta inicial de Maris de busca de uma proximidade da EDQ com a invariância de escala e a extensão do formalismo conceitual dessa EDQ, como era tendência em algumas pesquisas em física de partículas desses anos, para o estudo de outras partículas que interagem, também, pela força fraca, tal como o neutrino.

Após Maris et al. (1964c), doravante denominado I, em novembro desse ano de 1965, como resultado de pesquisa que fora fomentada pelo CNPq, pela *U.S. Army Research Office* e pelo *Professorship Program of the Pan American Union*, Maris e seu grupo retomam a temática da quebra de simetria e do comportamento fermiônico do par elétron-múon, mediante a publicação, pela *Il Nuovo Cimento*, do artigo “Broken symmetries and the electron-muon problem – II” (MARIS et al., 1965b).

Nesse artigo, que faz referência ao artigo anterior (I) e a Haag (1962), somando-se às contribuições de outros trabalhos, Maris, enquanto líder de pesquisa, continua com a abordagem da EDQ de um e de dois campos de férmions sem massas nuas, detalhando agora, com mais ênfase, a incompatibilidade da correlação significativa de vácuo para dois campos leptônicos, com um vácuo invariante de paridade exata.

Para alcançar esse propósito são feitas três análises: a primeira para *bósons sem massa e os problemas relacionados*, a segunda para a *invariância de paridade e o propagador de um único férmion*, e a terceira para o caso de *dois campos de férmions*.

Para a primeira análise sobre *bósons sem massa e os problemas relacionados*, os autores asseveram que existe uma não aceitação, em nível geral, da literatura da época, quanto à abordagem de elétrons e múons como “neutrinos” carregados; e que essa rejeição está alicerçada na conjectura denominada Teorema de Goldstone, que afirma que para cada simetria contínua espontaneamente quebrada um bóson sem massa deve ocorrer na teoria. Sobre essa postura dos pares, MARIS et al. (1965b, p. 217) assim se posicionam:

[...] Estes bósons são essencialmente pares de férmions ligados, tendo os números quânticos do componente de tempo da corrente conservada correspondendo à simetria quebrada. Com base nessa ideia, deve-se esperar, na presente teoria dos elétrons e múons, que surjam vários bósons correspondentes aos campos quebrados $\gamma_5, \tau, \gamma_5 \tau$ e às invariâncias dilatacionais. Como estes bósons não são observados, parece que a teoria **não** é nem mesmo aproximadamente capaz de representar a situação experimental.

Acreditamos que a conjectura anteriormente mencionada em sua forma geral não está correta.

Pela singularidade da invariância dilatacional, em que **não** existe uma corrente conservada que corresponda à operação de simetria, os autores propõem então os pontos (as hipóteses) **a)** e **b)**, com as respectivas análises, às páginas 217-218:

Se em **a)** o teorema de Goldstone (assumindo uma corrente conservada) fosse correto e em **b)** os estados previstos do bóson fossem físicos, então todas as teorias baseadas na quebra espontânea de simetria exata, com uma corrente conservada, estariam condenadas porque nenhum bóson escalar sem massa é observado na natureza. [...]

Com relação ao ponto **a)** [...] As provas usuais do teorema possuem a fraqueza geral de que no limite tendendo a um volume infinito (momento zero), que é essencial para estabelecer um polo de massa nulo, elas não são feitas com o devido cuidado. Apenas para uma simetria espontânea esse limite está longe de ser trivial. [...]

O ponto **b)** parece ainda não ter sido investigado em uma teoria relativística. Mesmo se uma singularidade de massa zero estiver presente, isso não significa necessariamente que um bóson físico ocorra. O campo de fótons escalares em EDQ, que é até explicitamente acoplado à carga elétrica e mesmo assim não dá origem a uma partícula física, é um exemplo que pode servir de aviso contra um julgamento superficial em tal caso.

Para Maris e seu grupo, utilizar o Teorema de Goldstone para rejeitar abordagens atraentes em TQC que usam simetrias espontaneamente quebradas não parece ser um forte argumento, pois esse teorema e suas implicações físicas necessitam de esclarecimentos mais robustos. Expostas essas limitações e ainda, referindo-se à possibilidade de uma

correlação de vácuo elétron-múon em ordem mais alta (a qual não existe na ordem mais baixa, conforme já fora abordada em I), os autores propõem em II, às páginas 218-219:

Tal correlação, no entanto, pode ser permitida se ordens superiores forem incluídas no cálculo e, no caso, provavelmente seriam possíveis apenas para determinados valores da razão massa elétron-múon [...] pode valer a pena investigar os efeitos de ordem superior nas funções de correlação, na esperança de encontrar uma equação de autovalor para o valor da massa.

Por sua vez, para a segunda análise sobre a *invariância de paridade e o propagador de um único férmion*, os autores adotam uma representação de quase-partículas, em que a massa finita de um “neutrino” de quatro componentes é causada por uma correlação de vácuo entre pares de neutrinos de helicidade oposta. Mostram, então, em ordem mais baixa, que a dinâmica do sistema compele o propagador de férmion a ter uma forma invariante por paridade (MARIS et al., 1965b, p. 219).

Por fim, para a terceira análise sobre *o caso de campos de dois férmions*, os autores demonstram, tal como proposto introdutoriamente no artigo, a conservação da invariância por paridade pelo propagador (op. cit., p. 224).

Em 1966, o IF-URGS mantém, como uma das prioridades de estudo e abordagem em TQC, a quebra de simetria que ocorre espontaneamente, e que a EDQ classifica em duas modalidades: (a) quando a quebra espontânea ocorre em simetrias globais, tem-se o surgimento de bósons de Goldstone; (b) quando a quebra espontânea ocorre em simetrias locais, tem-se a geração de campos de calibres massivos.

Neste contexto, Maris & Jacob publicam o artigo “Spontaneously broken symmetries and current conservation” no *Physical Review Letters* em dezembro de 1966, no qual se lê à página 1300:

Muitas vezes, argumenta-se que as teorias com simetrias espontaneamente quebradas não podem explicar as simetrias aproximadas da física de hádron e de lépton de alta energia porque as correntes conservadas esperadas (e seus bósons de Goldstone ou interações de longo alcance) não são observadas.

Os autores continuam no intento de mostrar que esse argumento provavelmente está incorreto, ou seja, a corrente de simetria espontaneamente quebrada geralmente não se mantém:

Consideramos a eletrodinâmica quântica de "elétrons" e "múons" sem massas nuas. Em uma notação de dois componentes para o campo elétron-múon, esta teoria é invariante sob o grupo $SU(2) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ ¹⁰⁰ [...] No calibre de Landau, a equação de Dyson-Schwinger de menor ordem, para o propagador de férmion, tem soluções finitas e para essas quase todo o grupo, exceto a simetria T_3 , tem simetria espontaneamente quebrada (de acordo com a situação experimental) e para o qual as renormalizações de massa são finitas. [...] (MARIS & JACOB, 1966, p. 1300)

Após os devidos cálculos, os autores pontuam dois aspectos singulares, quanto à representação matricial dos elementos de partícula única da corrente a ela vinculada, e quanto aos valores de divergência assumidos por campos de léptons livres:

Pode-se observar que, se as relações de massa forem as de uma certa simetria não quebrada [sem descontinuidade], os elementos de matriz de partícula única da corrente associada são conservados, e vice-versa. Exceto por um fator de renormalização, as divergências calculadas são iguais às correntes correspondentes de campos de léptons livres, porém massivos. [...] (op. cit., p. 1302)

Os físicos ainda constatam que o mecanismo que conduz à não-conservação de corrente tem alguma semelhança com o que poderia ser considerado como uma ramificação do modelo de quebra espontânea de simetria (QES) do ferromagneto de Heisenberg.

Como que verificando a classificação já relativamente estabelecida em TQC para a quebra espontânea de simetrias, Maris e equipe estendem a abordagem dessa quebra sob a ótica da teoria dos supercondutores. Em 1967 os resultados dessas pesquisas são publicados no periódico *Il Nuovo Cimento*, por Maris, Jacob & Liberman, no artigo "Two ways of spontaneous symmetry breaking":

Uma distinção entre dois tipos de quebras de simetria espontânea é feita: quebra "assintótica" e quebra "local". O primeiro é caracterizado por uma corrente de simetria conservada e pela presença de bósons de Goldstone (ou interações de longo alcance) e ocorre na teoria BCS [Bardeen-Cooper-Schrieffer para a supercondutividade], bem como nas teorias clássicas. Para as quebras locais, a prova usual de conservação de corrente fracassa, como resultado da singularidade de um produto de operadores de campo em um ponto, que ocorrem em correntes e suas divergências. Este caso ocorre em certas teorias locais de campos quânticos, por exemplo em eletrodinâmica quântica com massa nua igual a zero. As

¹⁰⁰ $SU(2)$ é o grupo unitário especial ou unimodular de dimensão 2. $U(1)$ é o grupo unitário de dimensão 1 e o símbolo \otimes representa a combinação entre grupos de simetria.

quebras locais, em oposição às assintóticas, podem ser úteis em uma teoria de campo de partículas elementares. (MARIS et al., 1967, p. 116)

Tomando como pontos de partida a pesquisa de Julian Schwinger (1959) e os artigos de Dürr (1959) e Heisenberg & Haag (1962), o grupo de Maris continua enfatizando a importância de produto de operadores localizados (p. 116):

Seguindo as ideias anteriores, foi recentemente mostrado dentro da eletrodinâmica quântica com massa de férmion nu igual a zero, "(EDQ)0", que a prova usual de conservação de corrente não é geralmente válida para o caso de uma quebra espontânea de simetria. Isso é causado pela singularidade de um produto de operadores de campos quânticos em um ponto, que ocorre na corrente e em sua divergência, resultando, na ordem mais baixa, em uma divergência diferente de zero para a corrente de simetria, se a simetria for espontaneamente quebrada.

Os autores continuam caracterizando detalhadamente as quebras espontâneas de simetrias analisadas, seus respectivos resultados e as vantagens em se trabalhar com massa nua de valor zero ou que tende para esse, "(EDQ)0", traçando analogias também com o fenômeno da supercondutividade (MARIS et al., 1967, p. 117):

O ponto principal que tentaremos colocar é que se deve distinguir entre dois tipos de teorias de QES (Quebra Espontânea de Simetria), que em vários aspectos apresentam propriedades qualitativamente diferentes. Com este objetivo em mente, faremos a seguir várias afirmações sobre as teorias de QES sem apresentar demonstrações, pois estas podem ser encontradas na literatura.

O primeiro tipo de QES, que pode ser chamado de assintoticamente quebrada, tem como principais características uma corrente de QES conservada e conseqüentemente a presença de bósons de Goldstone ou interações de longo alcance. Este tipo de QES é o que ocorre na teoria da supercondutividade e em quase todos os modelos clássicos de QES.

No segundo tipo, a quebra espontânea de simetria ocorre localmente; não há conservação de corrente e conseqüentemente os bósons de Goldstone ou interações de longo alcance não são necessários. Esta é a facilidade no exemplo mencionado de (EDQ)0 e em outras teorias de campos quânticos com interações pontuais.

Ao final desse artigo, referente à proposta temática, após os devidos cálculos, os físicos do IF da URGs tecem seus comentários, enfatizando ainda o caráter realista dessa teoria quando aplicada aos léptons carregados, conforme escrito na página 120:

Em oposição às teorias de quebra espontânea de simetria (QES) consideradas assintoticamente, com as suas correntes conservadas e os bósons de Goldstone (ou interações de longo alcance), não se sabe se as

quebradas localmente possuem qualquer propriedade que *a priori* as façam inadequadas para uma descrição de partículas elementares. Pode-se notar que as singularidades de momento alto em produtos de operadores de campo não estão em contradição com uma saturação de comutadores de corrente por estados baixos, como é visto no caso de um grupo de simetria não-quebrada.

Concluindo, listamos algumas outras características atraentes de teorias com QES locais. Este tipo de quebra de simetria ocorre mais naturalmente nas teorias de campos quânticos relativistas locais porque propagadores e interações singulares parecem quase inevitáveis nessas teorias. Espera-se que as quebras locais ocorram, como em (EDQ)₀ [eletrodinâmica quântica com massa de férmion nu igual a zero], em simetrias aproximadas com correntes não conservadas, e, em princípio, pode ser possível entender quantitativamente os desvios de simetria, ao invés de postulá-los. Finalmente, a única teoria de campo realista fundamental, a saber, a eletrodinâmica quântica dos léptons carregados, exemplifica como as invariâncias algébricas exatas de uma teoria básica ($U(2) \otimes U(2)$) podem conduzir mais naturalmente às mesmas simetrias aproximadas observadas com correntes não conservadas.

É digno de registro, nesse artigo, o agradecimento ao físico Jorge André Swieca feito pela equipe de físicos do IF-URGS, liderada por Maris, tendo como motivo o debate científico estimulante entre eles, realizado sobre a temática título do artigo.

Em 1968, o grupo de físicos para pesquisas em EDQ, liderado por Maris, inicia esse ano com o propósito de desenvolver novas abordagens para função densidade lagrangiana que rege e norteia essa teoria quântica. Nesse mister, em fevereiro, esses físicos propõem uma alternativa de equação lagrangiana apresentada no artigo “On the Lagrangian of Quantum Electrodynamics” publicado pela *Il Nuovo Cimento*.

Já de início, admitindo as limitações da sua proposta, os autores registram como necessidade para a EDQ, a partir de uma definição para corrente invariante de calibre que é construída mediante procedimentos de limites a ela impostos, se construir uma lagrangiana da qual se obtenha equações de campo formalmente.

Essa necessidade, segundo os autores, é também constatada, a partir de tentativas sem o devido êxito, tais como as realizadas em Boulware (1966) e Brandt (1967), sendo uma delas assim por eles descrita:

Uma tentativa interessante nessa direção foi recentemente feita por [Boulware (1966)], considerando um Lagrangiano não-local que continha uma função de espalhamento espacial. O resultado, no entanto, foi um formalismo não muito transparente e uma perda de invariância de Lorentz

que não poderia ser recuperada no limite local simples. (MARIS et al., 1968a, p. 824)

Ainda para o objetivo proposto, o grupo de pesquisa considera ser necessário, como procedimentos de limites para os operadores de férmions, diferenciar e definir a interação. Seguidamente após adotar massas nuas para essas partículas e impor a devida restrição para o potencial vetorial, com $\mathcal{L}_0(A)$ correspondendo à densidade usual para o campo livre de Maxwell, eles descrevem a composição da lagrangiana proposta, tal como apresentam-na, ainda em igual página a anterior:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}(\psi, A) + \mathcal{L}_0(A)$$

Após apresentada a sua composição, são avaliadas as contribuições de simetria devido à conjugação de carga, a parcela limite atribuída para $\mathcal{L}(\psi, A)$ e a efetiva contribuição do valor de expectativa de vácuo, seguindo-se dos devidos cálculos para obtenção da equação de $\mathcal{L}(\psi, A)$ e, por fim, se obter a lagrangiana \mathcal{L} da EDQ que, segundo os autores, atendem a proposta inicial.

Uma vez apresentada a equação alternativa para a função densidade lagrangiana da EDQ em Maris et al. (1968a), o grupo de pesquisa em EDQ da URGs se empenha no mister de continuar tal proposta em nível de abordagem mais ampla, e fazem, mediante a publicação pela *Il Nuovo Cimento* no mês de junho ainda desse ano, do artigo intitulado “On a New Formulation of Quantum Electrodynamics”, o qual consiste em novos entendimentos conceituais (novos formalismos) para a EDQ.

Essa proposta fora motivada devido a constatação de que ao se adotar valor zero para a massa nua de férmion e os devidos procedimentos limites presentes em Maris et al. (1968a) se obteve (por essa via proposta) a lagrangiana usual da EDQ; constatação essa observada após as análises das divergências quadráticas que surgiram nos cálculos quando em desenvolvimentos perturbacionais devido às substituições de campos quânticos por campos clássicos. Alguns resultados dessa pesquisa são assim descritos:

Se uma teoria quântica se torna invariante por Lorentz e invariante de calibre, por uma substituição dos campos quânticos por campos clássicos

(como na presente formulação), então esses invariantes tendem a se perder apenas em expressões divergentes, como é o caso usual para a auto-energia de fótons.

A invariância de Lorentz e invariância de calibre ou a não-variância de uma teoria quântica de campo, com um análogo clássico invariante, é, portanto, dinamicamente determinada. Quanto a isto, ainda não encontramos uma dificuldade na presente abordagem que, como mostrado anteriormente, não sofre, por exemplo, do efeito usual da polarização do vácuo. (MARIS et al., 1968b, p. 594)

Os físicos prosseguem, informando que continuam investigando as características gerais dessa nova abordagem perturbativa no propósito de que ela possa futuramente proporcionar uma melhoria das propriedades de renormalização da EDQ.

Por sua vez, verifica-se também que ao final da década de 1960, têm-se pares da EDQ que apresentam, compondo determinadas teorias quânticas de campos relativistas, a constante de renormalização infinita Z^1 . Por sua vez, com pesquisa fomentada pela U. S. Army Research Office, CNPq e Conselho de Pesquisas da UFRGS¹⁰¹ é produzido o artigo “Infinite Renormalizations in Quantum Field Theories”, publicado pela *Lettere al Nuovo Cimento*, em maio de 1969, no qual seu autor T. Maris, a partir de $O(x, \varepsilon)$ que é um operador de produto em um ponto x do espaço-tempo e ε o vetor que separa os operadores de campos locais multiplicados em O , procura interpretar o significado básico dessa constante, começando pela interpretação, já adotada pelos citados pares, para procedimento de limite que é imposto a $O(x, \varepsilon^\mu)$ quando ε^μ ¹⁰² tende para o valor zero.

E com esse objetivo, o autor inicia o artigo, abordando a significância de solução apresentada por essas teorias para esse procedimento, tal como descreve:

Está claro que, *a priori*, é duvidoso se a teoria admite uma solução para a qual o limite (1) [referente a equação 1] é significativo; e mostraremos que a hipótese de que existe um limite como esse no Lagrangiano, quando na realidade não existe, resulta no surgimento de uma constante de renormalização infinita. (MARIS, 1969, p. 775)

101 Agora passando a ser denominada de UFRGS, pois a reforma universitária de 1968 ocorrida no Brasil federalizou a URGS e outras universidades do país.

102 μ é um número adimensional que corresponde à escala escolhida, por sua vez desconsiderar a escala equivale a adotar o valor 1 para μ .

Para sustentar seus argumentos, Maris propõe a função $Z(\varepsilon^2)$, considerando a sua vizinhança, auto consistência e independência; seus resultados para determinados valores de ε^2 e avalia a sua condição específica para $\varepsilon^2 = 0$, ou seja, para $Z(0)$. Parcialmente aqui descritas nessa TD, essas considerações são assim apresentadas à página 776:

1) A função $Z(\varepsilon^2)$ é, na vizinhança de $\varepsilon = 0$ e, até um fator constante, determinada pelo operador $O(x, \varepsilon)$ [...] $Z(\varepsilon^2)$ parece ser auto consistentemente determinada pela teoria e, por causa da invariância de Lorentz, pode e deve ser tomada independente de x .

2) Numa teoria de campo livre, $Z(\varepsilon^2)$ pode evidentemente ser escolhido como uma constante diferente de zero e o limite generalizado reduzir-se essencialmente ao usual. Em EDQ, [tem-se] em geral $Z(0) = 0$, mas $Z(\varepsilon^2)$ é quase constante para ε^2 não muito pequeno. [...]

3) No caso de $Z(0) = 0$, o limite usual faz pouco sentido. [...]

Ainda na defesa dos seus argumentos sobre a reinterpretação proposta para a constante de renormalização Z^{-1} , o físico realiza uma discussão simplificada sobre o propagador férmionico em EDQ.

Após avaliadas as simetrias P, C e T, bem como a identidade de Ward¹⁰³, referindo-se a equação (7), Maris registra como dados relevantes da pesquisa, entre outros, os valores iguais obtidos para diferentes $Z(\varepsilon^2)$ e que são também iguais a $Z(0)$:

O ponto essencial é que a equação (7) admite uma solução finita com $Z(0) = 0$. [...]

Normalmente, o procedimento de limite nas relações Lagrangianas e, consequentemente, também os de comutação são fixados desde o início; agora [com essa proposta de renormalização de infinitos] ambos são auto consistentemente determinados pela teoria.

A única função de renormalização auto consistente $Z(\varepsilon^2)$ poderia, possivelmente, remover todas as divergências da EDQ. (MARIS, 1969, p. 778)

103 A identidade de Ward – Takahashi, porque descoberta pelos físicos John Clive Ward (1924 - 2000) e Yasushi Takahashi (1924 - 2013), britânico e japonês respectivamente, é uma relação que surge numa TQC cada vez que ela possui invariância, por simetria de calibre, e conduz à função de Green, possibilitando assegurar a renormalizabilidade da teoria, daí a sua presença na EDQ (TAKASHI, 1957).

Essa, portanto, é uma das primeiras propostas para renormalização de infinitos em TQC direcionada para a EDQ, segundo o formalismo conceitual alternativo que vem sendo desenvolvido pelo líder do grupo de pesquisa do IF da UFRGS para essa teoria.

Passadas mais de cinco décadas, após essas pesquisas em EDQ no IF da UFRGS, em entrevista, o autor desta Tese de Doutorado indagou a um dos orientandos e parceiros de pesquisa de Maris, com vários artigos publicados, o físico Gerhard Jacob, sobre quais as hipóteses conceituais motivadoras existentes, naqueles anos de 1960 e 1970, para que aquelas pesquisas e respectivos artigos em EDQ se originassem naquele instituto. Após as devidas reflexões, remetendo-se àquele período, o físico assim responde em JACOB (2017):

Partindo da hipótese de que as massas do elétron e do múon são de origem puramente eletromagnética, essas partículas têm massa nula na ausência de interação eletromagnética; “ligando” a interação eletromagnética, deverá ser possível calcular a relação de massas entre elétron e múon (não existe unidade de massa). Esse foi o problema que Maris colocou, e que deu origem aos trabalhos na área. O problema em si está aberto até hoje, assim como não é claro se a hipótese inicial é correta (mas é muito plausível).

Enquanto se desenvolvem essas pesquisas, Maris orientou a dissertação de mestrado do aluno Cláudio Scherer, intitulada *Radiação gama e testes de simetria*, concluída em 1968. Tendo entre seus alunos de doutorado alguns que já foram seus parceiros em publicações científicas, em 1969 Maris conclui a sua primeira orientação de doutorado no IF-UFRGS, cuja aluna foi a física Victória E. Herscovitz, com a tese em física nuclear intitulada *Estados-furo de vida curta em espalhamento nuclear quase-livre*.

Pelo aniversário de 60 anos do professor F. Bopp, Maris homenageia-o, nesse ano, com uma abordagem sobre quebra espontânea de simetria, temática já por eles já vivenciada, apresentando-a aos pares, em alemão, pelo artigo “Bemerkungen zu spontan gebrochenen Symmetrien” publicado pelo periódico *Zeitschrift für Physik*, sendo fomentados pesquisa e respectivo artigo pelo U.S. Army Research Office, Banco Nacional de Desenvolvimento e CNPq.

Ainda em 1969, continuando as pesquisas em EDQ, o periódico italiano *Lettere al Nuovo Cimento* publica no mês de dezembro, como resultado de pesquisas em EDQ também realizada por Maris, o artigo “Spontaneous breakdown of current conservation in massless

quantum electrodynamics”. Nesse artigo, referenciando-se em Haag (1962) e Heisenberg (1967), entre outros, é feita uma avaliação das contribuições de teoremas importantes da física quântica, tais como a contribuição do teorema de Goldstone para a física de partículas e a contribuição do teorema de Noether para a TQC, com a possibilidade de não eficácia desse. Essa avaliação é assim apresentada:

Como é bem conhecido, a aplicabilidade do teorema de Goldstone desqualificaria quase todas as teorias de quebra espontânea de simetria (QES) na física das partículas elementares. Todavia, tornou-se cada vez mais evidente que a demonstração direta do teorema de Noether pode falhar em TQC, devido às propriedades singulares dos operadores de campo que são formalmente multiplicados em um ponto para definir a corrente de simetria, e que conseqüentemente as correntes de simetria quebradas podem não ser conservadas. (MARIS, 1969, p. 821)

Seguidamente, ainda em igual página, referenciando-se em Maris et al. (1964b) e Arnowitt & Deser (1965), quanto aos conteúdos QES em EDQ com massa nula, analisada à luz ou não da conservação de corrente, e o papel desempenhado pela função densidade de lagrangiana, Maris assim se posiciona:

Como o teorema de Goldstone é construído com base na conservação de corrente, ele não constitui um obstáculo para as teorias que adotam a QES com correntes não conservadas.

Na literatura, a presença de bósons de Goldstone ou interações de longo alcance em teorias de QES é, no entanto, ainda frequentemente assumida automaticamente; para evitar partículas sem massa não observadas, a simetria do lagrangiano básico é então quebrada externamente, um procedimento que é contrário ao espírito original da abordagem. Portanto, novamente retomamos este problema nesse artigo; mostraremos que a não conservação de uma corrente de QES não é apenas possível, mas geralmente deve ser esperada.

O autor prossegue, aborda a relação e condições entre a QES e manutenção de corrente, sendo posteriormente apresentada a possibilidade de determinadas abordagens sobre simetrias serem extensivas tanto para a interação forte (composta por hádrons) quanto para a interação fraca (composta por léptons), tal como se lê:

Acontece que quando a simetria é quebrada espontaneamente, também o será, em geral, a conservação de corrente. Para que a conservação de corrente sobreviva à quebra espontânea da simetria, é necessária uma condição muito especial, que é expressa pelo teorema de Goldstone.

Parece, portanto, que as simetrias aproximadas observadas da física hadrônica poderiam refletir simetrias exatas da teoria básica, assim como a simetria aproximada elétron-múon, para altas energias, pode ser entendida a partir de um lagrangiano exatamente simétrico dos léptons carregados.

Ulteriormente, Maris conclui o artigo, em que analisa sob a ótica da eletrodinâmica quântica de massa nula (EDQ0) a QES em correntes conservadas, abordando dois aspectos, (a) e (b), tal como se lê em MARIS (1969, p. 825). Quanto ao aspecto (a), Maris alerta que correntes não conservadas são construções artificiais da EDQ0, provavelmente contribuidoras de simetrias passivas, não fazendo sentido, portanto, a busca de transformações de calibre de primeiro e segundo tipos como mecanismo gerador de simetrias:

a) A conservação de uma corrente de simetria é usualmente considerada necessária de um ponto de vista intuitivo. Deve-se notar, no entanto, que correntes não conservadas em EDQ sem massa, e em certas outras teorias, são construções artificiais.

Elas estão sujeitas apenas à condição de que seus componentes nulos devem, possivelmente em algum sentido limitante, ser densidades geradoras das simetrias passivas, que são definidas de maneira bastante independente por transformações algébricas dos operadores de campos locais.

As correntes não conservadas não ocorrem nas interações de EDQ sem massa e parece, portanto, também não haver razão para insistir em sua invariância sob transformações de calibre do segundo (ou mesmo primeiro) tipo.

Quanto ao aspecto (b), no que concerne aos fundamentos das teorias de simetrias espontâneas, Maris enfatiza que a ausência de bósons de massa nula na natureza não significa empobrecê-las:

b) Considere a identidade generalizada de Ward-Takahashi [...] A dinâmica da teoria decide o que realmente acontece e, a priori, não esperaríamos encontrar um desses casos singulares. De qualquer forma, assumindo que nossas extrapolações do modelo de EDQ sem massa são permitidas, a ausência observada na natureza de bósons sem massa ou interações de longo alcance, exceto para a força de Coulomb e a gravitação, indicam apenas que, como regra, as diferenças entre simetria de vácuo e divergência de corrente não ocorrem na física das partículas elementares e não constituem um argumento válido contra as teorias de quebra espontânea de simetria.

Em maio de 1970, dois artigos são publicados pelo grupo de Maris no vol. 18 do periódico *Nuclear Physics B*. O primeiro correspondente às páginas 366 a 389, Maris, Dillenburger & Jacob intitulam-no “Renormalization and gauge invariance in quantum electrodynamics”. Ao tratar da questão da renormalização, os autores enfatizam uma abordagem dilatacionalmente invariante, assim descrita:

A conexão entre a teoria de campo e a expansão da perturbação da eletrodinâmica quântica é estudada. Como ponto de partida, toma-se o lagrangiano usual da EDQ, mas com a massa do elétron nu e a constante de renormalização Z_3 definida como zero. Essa teoria é essencialmente equivalente a usual; no entanto, ela não contém qualquer constante da natureza, é dilatacionalmente invariante e invariante de calibre, sendo que ambas são invariâncias quebradas espontaneamente. (MARIS et al., 1970a, p. 365)

Considera-se oportuno recordar brevemente que a TQC ao analisar um fenômeno físico vinculado a uma partícula, associa cada uma delas a um campo, o qual corresponde a um operador hermitiano que depende do espaço e do tempo, ou seja, a TQC tem entre suas características definir todos os observáveis físicos como operadores hermitianos.

Por sua vez, pela necessidade de se calcular as amplitudes de probabilidade dessa partícula quanto ao “ir” e/ou “vir” de um ponto para outro do espaço no tempo, se utiliza a TQC de função matemática que a denomina propagador, cujo objetivo é registrar para cada ponto do espaço-tempo a informação transportada pela partícula carregada.

O segundo, correspondente às páginas 390 a 402, Maris & Dillenburger intitulam-no “The fermion propagator of quantum electrodynamics in an arbitrary gauge” no qual os autores, como continuidade das abordagens de artigos anteriores, considerando condições pré-requisitos, tais como calibre arbitrário, presença da identidade Ward-Takahashi e as devidas omissões de cálculos (essas, segundo os físicos, sem maiores perdas conceituais e dos resultados finais), desenvolvem solução para equação de propagador de campo gerado por férmion¹⁰⁴ em EDQ, tal como descrevem:

104 É oportuno recordar que próton é férmion de spin $\frac{1}{2}$ constituído por dois *quarks up* e um *quark down* coesos pela interação forte.

A equação propagadora de férmions derivada no artigo precedente foi resolvida, usando as seguintes aproximações:

- (i) o propagador de prótons livres em um calibre arbitrário é usado;
- (ii) para o vértice é tomado um funcional do propagador de férmions que obedece aproximadamente a identidade Ward-Takahashi;
- (iii) na equação resultante, um pequeno termo é negligenciado. (MARIS; DILLENBURG, 1970b, p. 390)

Ainda sobre a equação em pauta, os físicos afirmam que para essas condições de calibre arbitrário é obtida a renormalização, ao tempo em que enfatizam que a transformação de calibre requerida pelo tempo, que dá significação precisa ao propagador existente no desenvolvimento dos cálculos, está coerente com a dependência de calibre presente no propagador fermiônico e que o reencontro nesses cálculos com o valor de Z_1 como $Z_1 = Z_2$ ($= Z(0)$) só fortalece a ideia de sê-lo um número finito, diferente de zero, em um calibre especial. Seguidamente os autores conjecturam quanto a natureza do calibre, as especificidades dos propagadores e afirmam que a evolução de resultados, como os registrados nesse artigo, sinalizam para um melhor entendimento da polarização do vácuo, tais como ainda descrevem em página de igual número ao da anterior:

De uma discussão sobre a transformação de calibre do operador, parece provável que este calibre finito não é físico e que em todos os calibres físicos o propagador de campo gerado por elétrons é mais apropriado que o livre¹⁰⁵ e que $Z(0) = 0$. Em contradição com a situação usual, este resultado não causa dificuldade no formalismo conceitual atual e pode ser essencial para a finitude da polarização do vácuo.

Os físicos seguem abordando que nessa pesquisa foram encontradas duas modalidades de solução, o que sugere entender o calibre de Landau como fronteira para classificação de um propagador, e que só se manifesta para valor de ordem de α (alfa) igual a zero pela aproximação estabelecida em Johnson et al. (1964); ao tempo em que, se referenciando em Lehmann (1954) e em aproximação por eles adotada, constatam os físicos que existe incerteza para valor alto de momento de propagador de fóton transversal, tal como narram:

Portanto, das condições estabelecidas [...] em nossa aproximação, conduz-se a uma solução não física. [...] isto é, o calibre possivelmente

105 Em linguagem técnica e completa se escreve como *propagador de campo gerado por férmion de spin zero*, pois nessa condição se tem uma partícula não interagente; já em linguagem simplificada se escreve como *propagador de campo escalar livre ou propagador de Klein-Gordon*.

finito [referindo-se a Johnson & Zumino (1959)] novamente divide os calibres possíveis em duas classes: a física na qual o propagador de férmion é mais singular que o livre e uma não física na qual é menos singular. Essa conclusão é uma proposta sugestiva para se admitir que essa divisão é a mesma que a mencionada anteriormente, isto é, que o calibre proibido de Landau é exatamente o calibre "finito" em que o propagador de férmion passa de um comportamento que é mais singular que o propagador livre para um que é menos singular.

A conjectura mencionada acima, que é fortemente sugerida pela invariância de calibre, é exatamente correta em nossa aproximação [como a apresentada na equação eq. (28) que corresponde a solução da proposta temática do artigo, na aproximação da referência Johnson et al. (1964)] e só é verdade até a ordem zero em α .

[..] Evidentemente, existe de qualquer modo a incerteza de comportamento para momento de valor alto do propagador de fóton transversal que foi assumido [em Lehmann (1954)] e em nossa aproximação. (MARIS; DILLENBURG, 1970b, p. 401)

Por fim, conjecturam os autores sobre a validade de hipótese adotada para constante de renormalização em determinados calibres, sobre a condição de se tê-la com valor nulo e avaliam sua influência na teoria de perturbação; seguidamente, como que renovando convite para discussão com pares, discorrem os físicos sobre a condição que pode se constituir em facilitador tanto para entendimento da constante de acoplamento da EDQ quanto da razão de massa eletromagnética elétron-múon, razão essa que tem sido móvel de pesquisas em EDQ do IF da UFRGS, tal como descrevem em igual página a da citação anterior:

Se nossa hipótese estiver correta e em todos os calibres permitidos $Z(0)$ desaparecer, então na formulação convencional da EDQ a constante de renormalização $Z_2 (= Z_l)$ deve sempre ser tomada como zero; não existiria nenhum indicador em que a abordagem usual seria consistente com a teoria de campo local.

O fato de que a teoria usual da perturbação funciona é, do ponto de vista atual, devido ao fato de que alguém elimina as constantes de renormalização das séries perturbativas.

Para discutir a região de momento ultra-alto, que pode ser essencial para uma compreensão da constante de acoplamento e da razão massa elétron-múon da teoria básica, poderia muito bem ser mais prático fazer uso direto da função de renormalização. Isso parece ser quase inevitável para uma discussão sobre a consistência interna da EDQ como uma teoria de campo e para generalizações para outras teorias de campo.

Em agosto de 1971, Maris conclui a orientação da tese de doutorado de Bernardo Liberman, intitulada "*Quebra espontânea de simetrias em eletrodinâmica quântica*", data em que

professor e aluno já têm, em parceria, artigos publicados nessa temática título. Essa tese é dividida em seis capítulos, conforme apresentados em LIBERMAN (1971):

I Introdução; **II** Quebra espontânea de simetrias; **III** Teoria de dois neutrinos carregados; **IV** Estudo do desenvolvimento perturbativo; **V** Considerações sobre a lagrangiana; **VI** Conclusões e observações.

O autor inicia a tese informando que nessa serão analisados dois aspectos (**a** e **b**) da Eletrodinâmica Quântica: “**a**) sua identificação como uma teoria com quebra espontânea de simetrias; **b**) consequências para o desenvolvimento perturbativo de uma formulação invariante frente à transformação de calibre.”

Afirma Liberman (1971) existirem na EDQ dificuldades conceituais teóricas, embora as previsões obtidas, através do desenvolvimento perturbativo (das funções de Green) renormalizado, satisfaçam os resultados experimentais, que confirmam a precisão da teoria. Todavia, o desenvolvimento perturbativo seria o responsável por tais dificuldades. Esses problemas conceituais são as quantidades não definidas apresentadas nos cálculos da EDQ, as integrais divergentes, os infinitos, que exigem processos de regularização e renormalização, que resultam em limitações para o entendimento conceitual da TQC. Para Liberman (1971, p. 2), o tratamento desses problemas seria altamente benéfico:

[...] Devemos ressaltar a importância do conhecimento do comportamento da Teoria Quântica de Campos pois, atualmente, ela se constitui na teoria disponível para uma descrição dinâmica das demais partículas elementares. Estas considerações, mostram-nos os motivos da escolha do estudo da Eletrodinâmica Quântica, ou seja, a necessidade de construção de uma teoria [que seja suficiente quanto] a possibilidade de entendermos, da maneira que julgamos ser mais natural, o comportamento da Teoria Quântica de Campos. [...]

Adiante, nas páginas 2 e 3, o autor mostra a relevância dessa temática na pauta de pesquisa do IF da UFRGS, nos anos que antecedem essa tese, e o porquê da escolha do tema da tese, bem como as dificuldades encontradas no seu desenvolvimento:

[...] As questões relacionadas com o estudo da Eletrodinâmica Quântica como uma Teoria Quântica de Campos têm se constituído num dos principais assuntos de pesquisa do grupo de física teórica do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Como resultado foi sugerida uma nova formulação para a Eletrodinâmica Quântica desenvolvida através do formalismo Lagrangiano. Uma das finalidades desta tese é estudar algumas consequências desta nova formulação. [...]

Após o desenvolvimento da tese, com os devidos cálculos, o autor apresenta o capítulo “VI Conclusões e observações”, em que lemos nas páginas 131-133:

Neste sentido, constatamos a existência de dois aspectos diferentes, porém relacionados entre si, que são de importância geral:

1) As definições para o produto de operadores de campo num ponto e a diferenciação desses [que] exigem as ocorrências de processos de limite. Estes dois processos são combinados num só de maneira invariante frente à transformação de calibre. Podemos encarar a combinação da expressão $\partial_x^\mu + ie A^\mu(x)$ ¹⁰⁶ da Eletrodinâmica Quântica como simbolizando essa unificação invariante dos limites mencionados. [...]

Verificamos que com estas proposições obtemos as equações para as funções de Green renormalizadas, bem como resolvemos os problemas das divergências quadrática e logarítmica. Estes aspectos da formulação, indicam-nos que o processo usual de renormalização e as equações convencionais para as funções de Green devem ser considerados como uma maneira simbólica de escrever os limites mencionados. [...]

A invariância frente à transformação de calibre fornece de maneira natural as identidades generalizadas de Ward.

2) [...] Neste sentido, a renormalização pode quebrar espontaneamente várias simetrias. Constatamos que na Eletrodinâmica Quântica de elétrons, com massas despidas nulas, há a ocorrência da quebra espontânea local das invariâncias dilatacionais frente à transformação γ_5 . As correntes correspondentes não são conservadas e, portanto, o teorema de Goldstone não é aplicável. Também, verifica-se a quebra espontânea de simetria frente à transformação de calibre de segunda classe. Na eletrodinâmica quântica de elétrons e múons temos, em adição, a quebra espontânea da simetria local para um grupo $SU(2) \otimes SU(2)$.

Concluindo mencionaremos os seguintes problemas que permanecem em aberto:

1) As propriedades exatas da função “smearing” $f_n(\epsilon)$ no processo de limite, que são necessárias para a eliminação explícita de certos gráficos não desejados [...] da auto-energia própria do elétron.

2) A verificação explícita da não ocorrência da divergência logarítmica para o tensor $\pi^{\mu\nu}(K)$. Este ponto é importante, pois poderá possibilitar a autodeterminação da constante de acoplamento α dentro do contexto da eletrodinâmica quântica.

3) A possibilidade de existência de um critério de estabilidade que permita a determinação da razão entre as massas do múon e do elétron na Eletrodinâmica Quântica.

106 O exemplar dessa tese disponibilizado pelo IF da UFRGS, antes de sua digitalização, está em cópia mimeografada.

4) A inclusão das interações na teoria de seis neutrinos (três “quarks leptônicos”), conforme apresentada no terceiro capítulo.

Concluída a primeira TD em EDQ na UFRGS, Maris e seu grupo mantêm o ritmo de pesquisa, somando-se às orientações e publicações.

Em 1972¹⁰⁷ o IF da UFRGS tem publicado pelo periódico *Nuclear Physics* o artigo “Degrees of symmetry in quantum field theories” de autoria dos físicos T. Maris, D. Dillenburg, G. Jacob e B. Liberman, com pesquisa que fora fomentada pelo BNDE, U. S. Army Research Office, OSA e Conselho de Pesquisas da UFRGS.

Em sendo um fato a existência de simetria aproximada, também se constitui em verdade a parte em que essa não se manifesta, a assimetria, ou seja, a existência de desvio presente em uma invariância exata. Esse é um problema presente em TQC carente de resposta, também, após o estabelecimento da EDQ e que na década de 1960 tentou ser entendido pela ideia de assimetrias produzidas pela dinâmica ínsita da teoria, sendo respondido heurísticamente pelas matrizes S, essas que com esse propósito foram objetos de pesquisas registradas inicialmente¹⁰⁸ em Heisenberg (1957) e posteriormente em Y. Nambu & Jona-Lasinio (1961a), Haag (1962) e outros pesquisadores, constituindo-se assim num *bootstrap*¹⁰⁹ para entendimento de QES em EDQ.

Para os autores, afirmação como a presente no teorema de Noether, que exige para a existência de teoria simétrica a presença de correntes conservadas, e a do teorema de

107 1972 é o ano que é concedido o prêmio Nobel de Física aos pesquisadores J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer pelas descobertas em supercondutividade, cuja teoria ficou conhecida como BCS.

108 Registra-se aqui que John A. Wheeler desenvolveu pesquisas com a matriz espalhamento, tal como em Wheeler (1937), mas em TQC e coerente com a temática introdutória do artigo em pauta o suporte teórico se inicia em Heisenberg (1957).

109 *Bootstrap*, referido ao período que vai (com maior ênfase) dos anos de 1950 até meados/final dos anos de 1970, deve ser entendido como uma técnica para se resolver problemas de partículas elementares em TQC, mediante o uso da matriz S, distanciando-se assim, por tal recurso, do uso da teoria de perturbação. Técnica essa que não vingou nas décadas seguintes, cujos motivos e em abordagem mais detalhada não pertencem ao escopo dessa TD.

Goldstone, que afirma que a QES se efetiva mediante a geração de partículas não massivas (os bósons de Goldstone), se constituem em dificultadores para obtenção da procurada resposta, já que em simetrias aproximadas as correntes mensuráveis não são conservadas. No entanto, avaliando essas situações, Maris e seu grupo de pesquisa sinalizam para a condição de invariância dilatacional como aquela que proporciona QES sem conservação dessas correntes, ao tempo em que afirmam ser a EDQ, de elétrons e múons sem massa, capaz de mostrar que a invariância dilatacional pode ser portadora de QES em TQC, com as devidas peculiaridades, tal como descrevem:

Felizmente, existem alguns argumentos que sugerem que deve haver um ponto fraco na cadeia de raciocínio que leva de uma teoria de campo simétrica a correntes conservadas e bósons de Goldstone. Considere, por exemplo, a invariância dilatacional. Não é difícil de ver [...] que a arbitrariedade na escolha da unidade de comprimento implica que uma teoria completa da física, se existir, poderia ser formulada como aquela em que a invariância dilatacional é espontaneamente quebrada [vide Maris (1963) e Haag & Maris (1963)]. No entanto, na natureza a corrente dilatacional não se conserva e também não ocorre o bóson de Goldstone correspondente. Agora, é claro, é bem possível que a natureza não seja descrita por uma teoria de campo, mas a eletrodinâmica quântica (EDQ) de elétrons e múons sem massa mostra que, de fato, a invariância dilatacional pode ser quebrada espontaneamente em uma teoria de campo, apenas da maneira observada. (MARIS et al., 1972, p. 445)

Seguidamente os autores enfatizam para essa EDQ a ocorrência de grupo de simetria $U_2 \otimes U_2$ portador de QES, com correntes de simetria não conservadas, abordando ainda uma possível contra argumentação dos pares, de que tais situações existem devido ao fato de ser a invariância calculada com grau alto de aproximação, pois se os cálculos fossem exatos, com significativa probabilidade, certamente se teria corrente de simetria conservada. Em prosseguimento, observam Maris e equipe inexistirem incompatibilidade com as realidades dos teoremas de Noether e Goldstone (MARIS et al., 1972).

Para alcançar os propósitos desse artigo são feitas seguidamente duas análises: a primeira sobre *hierarquia de simetrias em TQC* (seção 2.) e a segunda sobre *quebra de simetria local* nessa teoria (seção 3.).

Os físicos, já se dando por concluída a tarefa a que se propuseram, avaliar os graus de simetrias em TQC (de apenas matemática até a simetria fidedignamente física, isto é, que

pode ser entendida como eficiente) e construir um modelo para invariância passiva, reservam-se ao direito de construir o que poderia ser também entendido como um diálogo entre o leitor e eles, respectivamente, formulando uma pergunta que tem como resposta outra pergunta:

- Qual pode ser o significado (a importância para a física) de uma simetria matemática se ela não for fisicamente realizável?

- A questão parece estar intimamente relacionada com [uma pergunta] mais ampla: em que base se deve esperar, ou simplesmente esperar, que uma teoria básica seja matematicamente simples, já que os fenômenos físicos são evidentemente complexos? (MARIS et al., 1970, p. 458)

E complementando a resposta, os autores sugerem como leitura Wigner (1967) e afirmam que se o desenvolvimento da temática, simetrias aproximadas e suas correspondentes invariâncias passivas, tal como realizaram-no no artigo, se se constituir numa verdade, essas invariâncias desfrutarão de credibilidade, tais como a invariância de Lorentz e outras boas simetrias, pelo fato de estabelecer limites de construção para teorias básicas e permitirem uma ordem sequencial lógica para quebras de simetria em física de partículas.

Em torno de 1974, consolida-se o Modelo Padrão como teoria física estabelecida, sendo que a Teoria do Campo Conforme (TCC) colocou em pauta a alternativa de se ter uma EDQ portadora de invariância dilatacional *passiva*. Entende-se por isso a dilatação descrita por “uma teoria que permite um conjunto contínuo de soluções dadas como representações irreduzíveis dos operadores de campo em um espaço de Hilbert, que são relacionadas umas às outras por dilatações, as quais são definidas pelas transformações algébricas dos operadores de campo; e para que tal situação ocorra é necessário e suficiente que nos princípios básicos da teoria todas as constantes de dimensão de massa devem desaparecer” (MARIS; DILLENBURG, 1975, p. 337).

É nesse contexto que, no ano de 1975, Maris em parceria com Dillenburg avaliaram para essa EDQ um critério de estabilidade, em menor ordem de perturbação, e obtiveram uma expressão para a razão entre a massa do elétron e a do múon, baseada na interação $e^+ - e^-$ (pósitron-elétron), a partir da situação de um feixe formado por antipartícula e partícula que colidem. Essa avaliação foi apresentada no artigo “On the electron-muon mass ratio”, publicado pelo periódico *Nuclear Physics B*, norteados pela ideia de se trabalhar com uma

EDQ de elétrons perturbados pelo acoplamento de múons e hádrons através da polarização do vácuo, ignorando a possibilidade de que outras modalidades de interações, tais como a fraca e gravitacional possam ser relevantes. Com pesquisa que fora fomentada pelo BNDE, CNPq, Regional Program of Scientific and Technological Development of the OAS e FAPERGS, os autores desenvolvem o conteúdo do artigo em 6 seções.

Na seção 1, definem a invariância dilatacional passiva, e consideram uma teoria em que ela é quebrada, ao se introduzir uma perturbação mediante algum dos componentes (campo, corrente etc) da teoria. Essa quebra é constatada pela ocorrência de uma quantidade numérica, com dimensão de massa, que corresponde à massa não-extinta, ou seja, à massa que permanece após essa quebra de simetria. Faz-se então necessário introduzir nessa teoria, para resgatar a invariância dilatacional passiva, uma escala de massa absoluta no sistema, além da necessidade de se avaliar o surgimento de duas novas possibilidades: (a) a introdução da perturbação torna a teoria incompleta; (b) ela não altera a propriedade da teoria de ser completa. Neste último caso surge a questão: qual é a representação escolhida pela perturbação, e qual o critério que governa esta escolha? (MARIS; DILLENBURG, 1975, p. 338).

Na busca pelo critério de estabilidade, na seção 2 os físicos adotam certa simetria para a massa do elétron, assegurando-se assim a eficiência para o critério buscado, tanto para a condição de existência de perturbação simétrica quanto para a de ausência dessa. O critério consiste em se obter, independente do calibre, tal como deve ser para qualquer critério de estabilidade, uma equação para a massa do elétron, considerando a massa do múon e a polarização do vácuo pelo hádron, essa a ser introduzida na abordagem (MARIS; DILLENBURG, 1975, p. 340).

Na seção 3, estudam a contribuição do múon, analisando a perturbação em ordem mais baixa, calculando o propagador de fótons originado na polarização do vácuo, enfatizando o papel desempenhado pelas funções de Green como sinalizadoras do comportamento dos propagadores.

Os autores, na seção 4, avaliam as contribuições de outras partículas, e na seção 5 deduzem a equação para a massa do elétron. Em seguida, avaliam os resultados obtidos,

comparando-os com os dos experimentos, e construindo o gráfico da interação (MARIS; DILLENBURG, 1975, p. 346).

Nas conclusões, seção 6, em diálogo inicial com Weinberg (1972), afirmam estar em aberto às contribuições de outras interações elementares, que não sejam a eletromagnética, para a construção do critério de estabilidade. Tais resultados de pesquisa são assim apresentados:

(i) Somente interações eletromagnéticas foram levadas em consideração. Não está claro que a introdução das interações fraca, gravitacional, ou outras, seja necessária para o problema atual [...];

(ii) Assumimos que o valor da massa de elétrons, em princípio, não precisa ser dado como um ingrediente extra para a teoria, mas é determinado pela existência de uma solução estável. Tomamos a condição (2) como critério de estabilidade, que é baseada em uma analogia e ainda não foi derivada de um princípio geral. [Essa equação] dá o resultado correto para uma perturbação invariante dilatacional e é invariante de calibre. (MARIS; DILLENBURG, 1975, p. 347)

Ainda em igual página, os autores, dialogando com as fontes Nambu & Jona-Lasinio (1961ab), Baker & Glashow (1962) e Cabibbo (1963), prosseguem afirmando que em TQC relativística, com respeito ao critério geral de estabilidade para o comportamento de partículas, o conteúdo da quebra espontânea de simetria ainda carece de respostas mais esclarecedoras. Os físicos também avaliam, para as partículas em pauta, a relação de dependência do propagador de fóton com momento e massa dessas, tal como se lê a seguir:

(iii) Assumimos que, para momentos ultra altos, o propagador de fótons, em uma boa aproximação, depende apenas do momento ao quadrado e da massa da partícula pontual mais leve, se esta for muito leve quando comparada com todas as outras partículas carregadas. Esta última condição é de fato preenchida pelo elétron, mas não pelo múon. A discussão análoga para o múon, na qual o elétron e o múon são intercalados conforme comparados com o tratamento atual, não é válida, mesmo se a teoria básica for simétrica em relação ao elétron e ao múon.

Mais de duas décadas, após as insatisfações de P. A. M. Dirac para com a renormalização, registra-se que essas ainda reverberam nos anos de 1970 entre os pares da EDQ. Com quebra ou não de simetrias, estamos em anos em que regularizar as divergências da EDQ e renormalizá-las, procurando ampliar o seu entendimento para além de técnicas aplicadas

em funções de correlação para se obter resultados finitos dando algum significado físico, ainda ocupam a pauta de pesquisas em TQC, tais como em Wilson (1971, 1975).

Denominado em TQC de Grupo de Renormalização ao conjunto dessas pesquisas, em 1976, Maris volta-se para esse conteúdo disciplinar, vindo a publicar individualmente pela *Revista Brasileira de Física*, em inglês, o artigo intitulado “The renormalization group of relativistic quantum field theory as a set of generalized, spontaneously broken, symmetry transformations”. Nesse artigo, que retoma uma temática já há mais de uma década também vivenciada por ele e seu grupo de pesquisa, o físico destaca a relação entre quebra espontânea de simetria e renormalização em TQC relativista, tal como descreve:

A teoria do grupo de renormalização encontra seu lugar natural no quadro geral de simetrias nas teorias quânticas de campo. Visto desta forma, um grupo de renormalização é um subconjunto de parâmetro único do produto direto dos grupos de dilatação e renormalização. Esse subconjunto de transformações de simetrias espontaneamente quebradas liga as soluções não equivalentes, geradas por um procedimento de regularização dependente de parâmetro, como ocorre em teoria de perturbação renormalizada. Considerando as transformações globais, ao invés das infinitesimais, obtém-se diretamente uma expressão para vértices gerais, que é a solução formal das equações exatas do grupo de renormalização. MARIS (1976, p. 31)

No currículo de Maris, tem-se especificamente em EDQ outras relevantes pesquisas e respectivos artigos publicados em periódicos científicos de credibilidade internacional, com significativos destaques para as temáticas grupo de renormalização e quebra espontânea de simetria.

Conforme se vê no ANEXO II dessa tese, Maris realizou um total de 11 orientações, sendo cinco de mestrado e seis de doutorado, com percentual bem maior de orientação para as que possuem temática em física nuclear. No ano de 1986, Maris foi escolhido como membro titular da Academia Brasileira de Ciências e também passa a usufruir legalmente de direitos civis e políticos, já que nesse mesmo ano é contemplado no Brasil com a cidadania honorária, tornando-se, portanto, cidadão brasileiro.

A *Folha de São Paulo*, em sua edição de 11 de setembro de 1999, publicou uma relação dos físicos, atuantes no Brasil, mais citados em periódicos científicos internacionais arbitrados, com os respectivos números de citações e com parâmetro de impacto no

período de 1961 a 1999. Dentre os 205 físicos brasileiros, com publicações avaliadas conforme esses parâmetros, Theodor Maris ocupa a 21ª posição no *ranking*, com o IF da UFRGS ocupando a 4ª posição em citações:

	FÍSICA	PESQUISADORES
Nº de citações	Pesquisador	Instituição
20º - 1.130	Herch Moyses Nussenzveig	Instituto de Física - UFRJ
21º - 1.125	Theodor August Johannes Maris	Instituto de Física - UFRGS

Quanto à liderança e talento de Theodor Maris em TQC, pelo formalismo conceitual da EDQ, a Sociedade Brasileira de Física, em relatório já anteriormente citado, datado de 1987, que avalia os desenvolvimentos das pesquisas em física de partículas no Brasil, assim se reporta a uma das contribuições do físico:

Em 1960 foram reconhecidos mundialmente os trabalhos desenvolvidos pelo grupo de Porto Alegre, liderado por Theodor Maris. Eles estudaram o grupo de renormalização e a simetria quiral na eletrodinâmica quântica. (REZENDE, 1987, p. 64)



Fig. 9 Theodor Maris e colegas de profissão¹¹⁰
Fonte: Arquivo da UFRGS

¹¹⁰ Essa figura registra em 22 de outubro de 1966 a chegada, no aeroporto salgado Filho em Porto Alegre - RS, do físico alemão Rudolf Mössbauer (1929-2011), ao centro, então com 37 anos de idade, para visitar a UFRGS; a sua esquerda está G. Jacob e a direita T. Maris. Mössbauer foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física de 1961, por suas pesquisas referentes à ressonância de absorção de radiação gama e pela descoberta do efeito Mössbauer. Esse efeito consiste na emissão ressonante sem recuo e absorção de fótons de radiação gama por átomos ligados em uma estrutura sólida. A descoberta desse efeito é o alicerce da espectroscopia de igual nome.

4.4 TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NA PUC: A CONTRIBUIÇÃO DE J. A. SWIECA

De origem católica e privada, a PUC (Pontifícia Universidade Católica, RJ) foi fundada em 1940, iniciando seu curso de mestrado a partir de 1965 e doutorado a partir de 1968. Essa história de créditos foi construída ao longo dos anos pelos seus vários cursos e diversos profissionais, que se especializaram tanto na própria PUC como também em outras universidades e centros de pesquisa. Dentre esses profissionais dedicados ao ensino e à pesquisa, destaco o físico Jorge André Swieca, que trabalhou nessa instituição como docente e pesquisador em física quântica na área de TQC, com enfoque para as pesquisas em EDQ, de 1971 a 1978. Proveniente da USP, a migração do físico para a PUC é assim descrita por NUSSENZVEIG (2007):

Em 1971, após a saída forçada de Tiomno da USP, André também se transfere¹¹¹ dela para a PUC-RJ, onde permanece até 1978. É dessa época um trabalho seu sobre confinamento [refere-se a um artigo que será abordado posteriormente nessa tese de doutorado] [...]

Na PUC-RJ os dois primeiros anos são ocupados com docência, atividades de pesquisa e pendências de orientações por concluir da instituição que trabalhara anteriormente. Mas a partir de 1973 começam a surgir as publicações na PUC a exemplo de *Remarks on conformal invariance* (1973).

Com a experiência já adquirida em Transformações Conforme, mantendo ainda no período de 1973-1975 como atividades correntes as orientações de curso *stricto sensu*, Swieca conclui ao final desse período a orientação de mestrado do físico Valério Kurak, intitulada *Transformações conforme na teoria quântica de campos*, fomentada pela CAPES.

Em 1976, realizou-se em Caracas, Venezuela, no período de 12 a 30 de julho, o *XVI Latin American School of Physics*, com a presença de físicos brasileiros e abordagens de conteúdos de diversas áreas, entre essas TQC e EDQ. É sabido ser propósito desses encontros de cientistas apresentar resultados de suas pesquisas, objetivando gerar debates e reflexões para a partir desses serem desenvolvidas novas teorias, quiçá novas descobertas científicas e respectivos progressos em C&T.

111 Transferência já também mencionada ao final da seção 4.2.

Nesta Escola Latino-Americana de Física, Swieca refere-se aos sólitons, monopolos e *kinks*¹¹² como “partículas estendidas”. Tais entes físicos postulados eram explorados como soluções para problemas em TQC, mais particularmente em EDQ2 e CDQ4. Um outro tema que vinha ocupando espaço significativo em pesquisa de EDQ2 nessas décadas é o confinamento, este que é uma propriedade específica da CDQ e a ele é, entre outras, atribuída a capacidade que têm os quarks de estarem sempre aos pares ou trincas no interior dos hádrons, e portanto não serem observados isoladamente (COLEMAN et al., 1975, p. 267, 270; AURILIA, 1979, p. 203, 205). Swieca ocupou-se, na citada escola, com os conteúdos dos sólitons e do confinamento, produzindo o artigo “Solitons and confinement”, publicado, no ano seguinte (1977), pelo periódico *Fortschritte der Physik*.

Nesse artigo, Swieca discute os modelos bidimensionais propostos por Thirring (1959) e Schwinger (1962b), tanto os sem massa quanto os massivos, que considera como sendo “protótipos [ou seja, em primeira abordagem de teste] de teorias com números quânticos topológicos e confinamento, respectivamente” (SWIECA, 1977, p. 303). Para tal mister, Swieca vale-se da técnica de bosonização para os campos de férmions, realizando um tratamento unificado de vários modelos; avalia a relação entre periodicidade de potencial e existência de um número quântico aditivo, a partir dos setores de carga então bosonizados; verifica quais características de (1+1) dimensões podem ser mantidas em (2+1), ou seja, explora a extrapolação do modelo bidimensional para 3 dimensões, embora ainda aquém em 1 dimensão do espaço-tempo real, que é quadridimensional. Atividades assim descritas:

O espaço-tempo bidimensional, apesar de todas as suas peculiaridades, provou muitas vezes ser um laboratório teórico frutífero, onde se pode testar uma série de ideias em modelos solúveis e muitas vezes buscar inspiração para teorias mais realistas.

Desnecessário dizer que deve ser tomado muito cuidado para separar as características que são únicas em duas dimensões daquelas que têm a chance de sobreviverem a um aumento dimensional. Surpreendentemente, nos últimos anos, muitos aspectos de modelos bidimensionais, antes vistos como patologias dimensionais, encontraram analogias próximas no espaço-tempo de quatro dimensões. (SWIECA, 1977, p. 304)

112 *Kink* é uma modalidade de função de onda que não dissipa energia, tendo como consequência a manutenção da sua forma durante toda a propagação, portanto não dissipando energia alguma. Entre os *kinks*, uma das funções de onda costumeiramente utilizada é a $\lambda\phi^4$ com campo escalar bidimensional. Em Goldstone & Jackiw (1975), o *kink* aparece na equação 2.8 da página 1488.

E seguindo essa trilha conceitual, para alcançar os objetivos do artigo, são feitas mais três análises: a primeira para o *modelo de Thirring*, a segunda para o *modelo de Schwinger*, e a terceira destinada às *observações sobre os setores de carga*.

A primeira análise (seção 2) é dividida em três partes: a) férmions analisados como bósons; b) equivalência de Coleman; c) spin e estatística em duas dimensões¹¹³.

A segunda análise (seção 3) foi precedida pela publicação de Lowenstein & Swieca (1971), já abordado na seção 4.2, e amplia essa análise para as alternativas de Schwinger (1962b), o caso massivo e o não massivo.

Com ênfase na função desempenhada pela teoria de calibre na EDQ2, nas quebras espontâneas de simetria e nas especificidades de atuação da função de Green, destaca-se aqui um trecho dessa análise, referente à relação existente entre Schwinger (1962b) e Thirring (1959), em que Swieca identifica situações de equivalência entre esses modelos, conforme descritas à página 317:

Tem-se, portanto, uma quebra espontânea de ambas as simetrias sem qualquer bóson de Goldstone, que aqui, entretanto, é intrínseco, dispensando o uso de qualquer campo de Higgs. As fases introduzidas no lado direito da equação (3.4) caracterizam os diferentes vácuos correspondentes a esta quebra espontânea. Embora o desaparecimento dos números quânticos seja uma característica comum de qualquer teoria com uma quebra espontânea de simetria, a peculiaridade da eletrodinâmica quântica bidimensional [EDQ2] é o desaparecimento simultâneo das partículas que transportariam esses números quânticos. Isso acontece porque a invariância de calibre do segundo tipo restringe fortemente a classe de “observáveis” e estados físicos permitidos pela teoria: os férmions originais da solução de Schwinger [1962b] simplesmente desaparecem com o calibre.

Para ser mais específico, em uma teoria que não seja de calibre, com uma contínua quebra espontânea de simetria, o operador de carga Q não pode ser definido [...]. Pode-se, contudo, ainda reconhecer nos estados de entrada e de saída a estrutura de múltiplo¹¹⁴ da teoria (não mais degenerada). Este não é mais o caso em uma teoria de calibre com quebra de simetria espontânea, como o modelo de Schwinger claramente ilustra.

Embora ausentes do espaço físico, os férmions originais reaparecem, se for considerado o comportamento de curta distância do modelo de Schwinger. As principais singularidades da função de Green de operadores

113 Abordagem referenciada em artigo de Swieca em conjunto com Bert Schroer, ainda por publicar quando do envio de Swieca (1977).

114 Múltiplo é uma denominação atribuída em física de partículas para agrupamento de partículas subatômicas (fundamentais), daí, por exemplo, se usar os termos dubleto, tripleto e quadripleto respectivamente para o nêutron, píon e delta.

invariantes de calibre, como as correntes e as densidades escalar e pseudo-escalar. [...] podem ser obtidas deixando a massa do campo Z tender a zero. Isso nos traz de volta à situação discutida na seção 2 [análise do modelo de Thirring] e, portanto, a assíntota de curta distância da eletrodinâmica quântica de duas dimensões não é mais do que o modelo de Thirring, com $\beta = \sqrt{4\pi}$, que é uma teoria livre de férmions, sem massa, carregados.

Na terceira análise (seção 4), Swieca busca realizar uma abordagem que contemple uma certa unificação dos modelos bidimensionais de Thirring e de Schwinger, do ponto de vista dos setores de carga.

Na seção 5, apresenta três olhares: um quanto à utilização dos modelos em (1+1) dimensões para resolver problemas do espaço-tempo (3+1); outro quanto à adoção de monopolo magnético como analogia para se avaliar o comportamento de partículas; e, por último, um quanto à continuidade da eficácia da Teoria de Calibre em TQC; assim decritos:

O resultado líquido é que as linhas de fluxo elétricas serão confinadas a um tubo fino, com o potencial de “Coulomb” entre o par crescendo linearmente como no caso bidimensional.

Um confinamento similar de linhas de fluxo surge naturalmente se considerarmos monopolos magnéticos em uma versão relativística de um supercondutor devido à condição de quantização de fluxo do último¹¹⁵.

A investigação de teorias de calibre em uma rede por Wilson, Kought e Susskind¹¹⁶ também mostra que existe um mecanismo natural de quantização de fluxo que surge lá.

Uma vez que uma redução efetiva do problema tridimensional tenha sido alcançada, espera-se que o modelo de Schwinger forneça uma descrição pelo menos qualitativamente sólida para o confinamento. (SWIECA, 1977, p. 324-325)

Nas últimas linhas de “Soliton and confinement”, embora sabendo que muitos problemas permanecem ainda sem solução também devido às limitações presentes nos modelos bidimensionais proporcionados pela TQC para um melhor entendimento da realidade física do espaço-tempo quadridimensional, Swieca se mostra otimista em um momento e com dúvidas em outro, quanto à real contribuição da TQC para a descrição da natureza, tal como relata em Swieca, 1977, p. 325:

Se alguma dessas novas ideias será relevante para nossa compreensão da física de alta energia, ainda é um problema em aberto. Eles nos

115 Referenciando-se em Nambu (1974) e Nielsen & Olesen (1973).

116 Referindo-se respectivamente aos artigos Wilson (1974), Kogut & Susskind (1974) e Kogut & Susskind (1975).

ensinam, de todo modo, que uma teoria de campo não-linear tem uma estrutura muito mais rica do que se poderia suspeitar, [comparativamente ao que faria] a teoria de perturbação tradicional [padronizada].

Depois de quase meio século de existência, a principal questão sobre a teoria quântica de campos parece ainda ser: o que ela realmente descreve? e ainda: fornece [ela] uma boa descrição da natureza? (SWIECA, 1977, p. 325)

No ano de 1978, trabalhando em uma temática já significativamente vivenciada que são os modelos bidimensionais em EDQ2, Swieca concluiu a orientação de mestrado do aluno Luiz Victorio Belvedere, intitulada *Um estudo sobre a eletrodinâmica quântica em duas dimensões*; e também concluiu a orientação de mestrado de Eduardo Cantera Marino, intitulada *Carga topológica fracionária e infinitude da ação*.

Ao final desse ano, por motivos de ordem pessoal e profissional, em meio às pesquisas, orientações e artigos em desenvolvimento, Swieca começa a se vincular a outra instituição de ensino e pesquisa, efetivando o novo vínculo empregatício no próximo ano, conforme aborda-se seguidamente.

4.5. TQC PELAS TRILHAS DA EDQ NA UFSCar: A BREVE CONTRIBUIÇÃO DE J. A. SWIECA

Nascida pelo Decreto n.º 62.758, de 22 de maio de 1968 como Fundação Universidade Federal de São Carlos, com sede e foro na cidade de São Carlos, SP, em 1971 foi criado o Instituto de Física e Química de São Carlos (IFQSC)¹¹⁷, como departamento dessa universidade, doravante UFSCar. No ano de 1979, J. A. Swieca se muda para essa cidade e passa a compor o quadro de docentes dessa instituição, registrando-se que na UFSCar não existia um programa oficial de pós-graduação em Física.

Em uma instituição que já desfrutava na década de 1970 de significativo conceito e tradição em física do estado sólido, a sua ida para a UFSCar foi motivada, também, pelo propósito de contribuir para se criar oficialmente nessa universidade a pós-graduação em física, estando entre as áreas de pesquisa obviamente a TQC, o que oficialmente não aconteceu¹¹⁸ por dificuldades várias, tais como não ser a TQC área prioritária para a alocação de recursos e outras razões de natureza pessoal, essas que escapam aos interesses dessa TD.

Nesse ano de 1979 ele continua com suas orientações e produção científica iniciadas na PUC- RJ. Entre essas atividades, tem-se:

- A orientação da tese de doutorado do físico Valério Kurak, sobre a utilização das matrizes de espalhamento exatas para explicar determinados modelos em TQC, intitulada *Matrizes-S exatas de alguns modelos da teoria quântica de campos*, concluída em 1979.

- A orientação da tese de doutorado do físico Eduardo Cantera Marino, intitulada *Formulação integral funcional para teorias de campo com estatística generalizada*, concluída em 1980.

117 Somente em 1994 foi criado oficialmente o Instituto de Física da UFSCar (IFSC), pois foi quando se efetuou o seu desmembramento do anterior IFQSC, tendo, portanto, esse IF o seu primeiro gestor, uma diretora (SAVIGNANO, 2014).

118 A pós-graduação em física na UFSCar somente foi oficializada em 1988 (UFSCar, 2018).

Ainda em 1979, compondo o quadro de docentes do IF dessa instituição e com menos pendências de orientação por concluir, Swieca começa na UFSCar a agregar físicos para a formação de quadro de pesquisadores em TQC, e entre os convidados está o físico Eduardo C. Marino, seu ex-aluno e parceiro de pesquisa, que nessa universidade permanece de 1979 a 1985, tendo como linhas de pesquisa *Generalização da eletrodinâmica quântica com setores topológicos não triviais*, *Excitações topológicas em teoria quântica de campos* e *Modelos bidimensionais em teoria quântica de campos*.

Somadas às atividades de docência, pesquisa e publicações, ainda nesse ano de 1979, Swieca participa na França da *Escola de Verão de Física de Partículas e Campos*, fato assim recordado, em entrevista para essa TD, pelo físico Carlos Aragão:

Em 1979, quando já fazia o doutorado em física na Princeton University, com a tese intitulada *Instantons and fermion densities*, sob a orientação de Curtis G. Callan Jr., fui à Escola de Verão em Cargèse. Lá estive pela última vez com Swieca. Na Escola, o conceituado físico Jürg Fröhlich, em sua palestra, citou-o como um dos precursores do Mecanismo de Higgs, fruto do amplo conhecimento que Swieca adquirira sobre quebra espontânea de simetrias, entre outros tópicos. (DE CARVALHO, 2018)

Estamos no ano de 1980, limite temporal final dessa TD, que é o ano em que se sinaliza para o Brasil o seu reencontro com a democracia, tendo entre as metas do Congresso Nacional a de aprovar o retorno ao país das eleições diretas. Nos primeiros dias do ano, Swieca participou como membro do comitê organizador do evento *The Sixth Brazilian Symposium on Theoretical Physics*, que aconteceu no Rio de Janeiro, de 7 a 18 de janeiro desse ano.

Da sua ida para a UFSCar, que foi também motivada pelo propósito já citado e não alcançado na proporção planejada, até esse ano, registra-se, também como consequências dessas não realizações somadas aos óbices de natureza pessoal, uma produção científica de Swieca quantitativamente menor. No entanto, destacam-se para os fins dessa TD algumas contribuições de Swieca, no período da UFSCar, que iremos abordá-las.

Alicerçada na sua experiência como líder de pesquisa, registra-se como contribuição a sua habilidade de atrair pares de outros países e unir os físicos especializados em TQC empregados na cidade de São Carlos, que integravam as duas universidades locais, USP Campus de São Carlos e UFSCar, feito assim descrito em VIDEIRA (1985, p. 25):

[...] Lá iniciaria nova vida, ajudando a estabelecer, rapidamente, entre a USP de São Carlos e a Universidade Federal a nucleação, à sua volta, do mais importante grupo de Física de Campos do Brasil.

A aposta nos modelos fatorizáveis (controláveis) de baixa dimensão (matrizes-S exatas bidimensionais) como laboratórios teóricos para verificar hipóteses em TQC exemplifica esse período, representado nessa TD pelas pesquisas e respectivos artigos feitos com o físico Roland Köberle, professor e pesquisador da USP São Carlos, intitulados “Factorizable Z(N) Models” publicado pelo periódico *Physics Letters* e “Scattering Theory And 1/N Expansion In The Chiral Gross-Neveu Model” pelo *Physical Review*, esse também em parceria com o físico Valério Kurak, sendo ambos de 1979.

Uma outra atividade desse período da UFSCar, que será abordada posteriormente, é o artigo publicado em junho de 1980, escrito por Swieca em parceria com o físico Klaus Rothe, do Instituto de Física Teórica da *Freie Universität Berlin*, Alemanha.

É oportuno recordar que, na década de 1950, adotar a Teoria de Grupo em TQC já compunha a base de pesquisa de vários físicos especialistas em EDQ. Entre esses, destaca-se a pesquisa realizada por Schwinger (1957). Somando-se a essa assertiva, tem-se a ideia de buscar em prol da TQC as contribuições da topologia, sendo essa a parte da matemática que se ocupa de analisar, para objetos sob a ação de deformações contínuas, quais das propriedades do espaço se mantêm preservadas. A topologia descreve o número de enrolamento (*winding number*), ou seja, o total de vezes que uma curva se desloca em torno de um ponto. Essa propriedade é usada pela física quântica para estudar partículas e campo, com o objetivo de explicar quantidades discretas, tal como a carga, via número de enrolamento (também denominado de número quântico topológico), seguindo-se ainda da vinculação desse à transformação de calibre e por extensão à busca da presença de simetrias ou não (HORTAÇSU et al., 1979; CALLAN JR et al., 1976; CALLAN JR et al., 1978).

Referenciado inicialmente em Schwinger (1962b, 1963), Glashow (1968, p. 83) e Glashow et al. (1969, p. 1919), tal como já abordado anteriormente (ver seção 4.2), o artigo Lowenstein & Swieca (1971) afirma que na EDQ2 a estrutura de vácuo que nessa se apresenta goza de estreita analogia com a da CQD, afirmativa que evoluiu para o entendimento de ter a EDQ2 representada pelo seu grupo de simetria U(1), a mesma

estrutura de classe¹¹⁹ da CQD4 (Cromodinâmica Quântica em 4 dimensões) (CALLAN JR. et al., 1978; KORCYL; KOREN, 2012, p. 3).

Por sua vez, o físico estadunidense David Gross e o francês Andre Neveu, em 1974, após estudarem campos fermiônicos sem massa com interações quárticas, analisaram o modelo bidimensional, assintoticamente livre, expandindo-os em potências da forma $1/N$, sendo N a quantidade de componentes do campo fermiônico. Chegam esses físicos, mediante utilização de um campo composto, tipo $\bar{\psi}\psi$, a um valor esperado de vácuo não instável, gerando massa quando da quebra de simetria contínua. Tal modelo bidimensional apresenta as seguintes vantagens: aplicação que independe do valor da constante de acoplamento, torna-se massivo para N igual a 1 e é renormalizável para a interação de 4 dimensões da CQD (GROSS & NEVEU, 1974).

Em 1975, S. Weinberg, após analisar a corrente vetorial axial conservada $U(1)$ nos modelos de quarks e glúons, atualiza a interpretação do decaimento *eta* (η) em relação ao operador dessa corrente $U(1)$. Esse problema então designado por *Problema $U(1)$* continuou a ser, nos anos seguintes, em TQC, um dos de significativa relevância em CQD, continuando a gerar uma série de pesquisas para seu melhor entendimento (WEINBERG, 1975).

Já o ano de 1976, a física de dimensões (1+1) é contemplada pelos físicos R. Jackiw e Rebbi, com o artigo “Solitons with fermion number $\frac{1}{2}$ ”, pelo qual é analisado um férmion com número quântico fracionário.

Observa-se assim, que nas décadas de 1960 e 1970, já são conhecidos pelos pares que compõem a comunidade científica especializada em TQC, direcionada para a EDQ e CQD, as propostas de modelos bidimensionais para EDQ, os *winding numbers*, e a análise de interação pela inserção da expansão $1/N$ nessas teorias, tendo-se assim vários artigos publicados, com esses conteúdos como suportes, e estando entre seus autores J. A. Swieca.

119 Em linguagem topológica (simplificada), significa ter o espaço unidimensional interno da EDQ2 (representada pelo seu grupo de simetria $U(1)$) a mesma classe de homotopia da CQD4, ou seja, há uma equivalência entre funções contínuas bijetivas que atuam no espaço topológico, que se traduz em equivalência quanto às deformações por elas produzidas nesse espaço (em pauta o espaço da CQD4) (ARAÚJO, 2011, p. 55-56).

No ano de 1977, além das técnicas de instanton¹²⁰ aplicadas em TQC, já são também conhecidos os resultados de pesquisa do físico australiano R. J. Crewther¹²¹, quanto ao entendimento do *Problema U(1)*, publicados em Crewther (1977).

Portanto, é sensato afirmar que em 1980 o conjunto dessas e outras pesquisas, artigos e respectivas publicações, somados à experiência já conquistada com a prática em EDQ, juntamente com ideias próprias de Swieca e Rothe, constituíram-se em pilares para que esses dois físicos, também, apresentassem uma proposta para melhor entendimento do referido problema; o que aconteceu, mediante a publicação, no mês de junho desse ano, do artigo “Fractional winding numbers and the U(1) problem” pela revista *Nuclear Physics B*. O objetivo principal desse artigo, quanto às configurações responsáveis pela quebra simultânea da simetria quiral U(1) e a geração de massa férmica dinâmica, é o de obter algumas informações sobre a natureza topológica dessas configurações. Para alcançar tal objetivo, os autores, entre outras alternativas, se utilizam de simulações, conforme se lê em ROTHE & SWIECA (1980, p. 454):

Simulamos a descrição lagrangiana efetiva de teorias de calibre, com geração de massa espontânea, considerando o modelo quiral de Gross-Neveu (GN) inserido em uma teoria bidimensional de calibre U(1). Mostra-se que neste modelo híbrido [de GN] o valor esperado não-nulo de $\bar{\psi}\psi$ é devido à contribuição de configurações instantons com enrolamento fracional.

Ainda na busca desse objetivo, os autores fazem duas análises: a primeira utilizando *enrolamento fracional em uma abordagem por integral de caminho* e a segunda que consiste em uma *abordagem convencional utilizando integral de caminho*. Feitas essas análises, os autores apresentam os seguintes resultados em ROTHE & SWIECA (1980, p. 463-464):

120 Instanton consiste numa técnica para se resolver problemas em TQC e outras disciplinas, tal como mecânica quântica, cujos problemas estejam representados por equações de movimento, com ação finita não nula.

121 Rodney James Crewther (1945-) é um físico especializado em teorias de calibre aplicadas à TQC, especificamente direcionadas para a EDQ e CDQ, então vinculado ao CERN, Genebra, Suíça.

- Confirmação das ideias de Crewther sobre a relevância do enrolamento fracionário [*winding number* $1/N$] na busca de solução para o problema $U(1)$.
- O papel da finitude de ação em QCD4 não é claramente entendido, além das abordagens adotadas por Crewther (1977) e Callan et al. (1978).
- Confirma-se que a estrutura de partículas no modelo de Swieca-Rothe é a mesma do modelo quiral de Gross-Neveu mais um plásmon¹²² desacoplado, que desempenha o papel da partícula **eta** (η) no problema $U(1)$. Como consequências, têm-se:
 - No modelo de Swieca-Rothe, os quarks blindados por carga são liberados, ficando bem próximo do que acontece no modelo de Schwinger sem massa.
 - É a massa nua nula do férmion, e não a gerada dinamicamente, que desempenha o papel decisivo nos aspectos do modelo "blindagem versus confinamento" apresentado em Rothe et al. (1979).
 - O acoplamento ao campo de calibre desempenhou um papel estabilizador na expansão $1/N$, assegurando que a quebra espontânea nula de ordem zero da invariância quiral seja mantida na solução exata, ao contrário do que ocorre no modelo puro de Gross-Neveu.

Outra contribuição de Swieca enquanto pesquisador da UFSCar, refere-se a sua participação na organização do evento *II Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos* de 19 a 22 de setembro de 1980, realizado na cidade de Cambuquira, em Minas Gerais. Nesse evento, Swieca também se fez representado, em uma das comunicações, pelo físico e ex-aluno de mestrado Marcelo Otávio Caminha Gomes, que apresentou o tema "Alguns resultados em modelos bi-dimensionais". Esse tema que Swieca já havia desenvolvido em 1971 por uma ótica mais teórica, mediante o artigo seminal "Quantum electrodynamics in two dimensions", fora então no evento abordado por meio de aplicações e respectivos resultados, tópico que por vezes é chamado de "laboratórios teóricos".

122 As excitações elementares em sólidos têm comportamento de onda o que possibilita serem quantizadas, sendo-as nomeadas no idioma português por vocábulos que terminam em **on**. Define-se plásmon como uma quantidade discreta de oscilação (quantum de excitação), oriunda de uma onda de plasma de metal ou de semicondutor, podendo ser identificada também como elétrons livres de um gás na superfície de um metal; ou ainda ser entendida como quantidade de energia e momento linear transportados por uma quasipartícula (REZENDE, 2004).

A Sociedade Brasileira de Física, em relatório já anteriormente citado, datado de 1987, que também avalia os desenvolvimentos das pesquisas em TQC e EDQ no Brasil, assim se remete a uma das contribuições de Swieca para essas disciplinas:

A década de 70 foi marcada pelo surgimento da liderança de Jorge André Swieca que, junto com seus colaboradores, fez o estudo mais sistemático e conclusivo de modelos de teorias de campo bidimensionais, subárea ainda de grande atividade. (REZENDE (1987, p. 64)

No ano de 2006, em artigo que tem como tema a pergunta: “*Is it possible to compare researchers with different scientific interests?*”, no periódico *Scientometrics*, abordando as disciplinas física, química, biologia/biomédica e matemática, seus autores, após as devidas análises, conferiram, no ano de 2006, a Swieca, a 10ª posição no *ranking* de impacto da produção (índice h) no Brasil, conforme tabela publicada em BATISTA et al. (2006, p. 9):

Table 2. The top h_I -ranking for the four fields. The numbers are (from left to right) the h_I index, h index, total number of citations in the h papers, number of authors and total number of papers published by the author

PHYSICS						
NAME	University	h_I	h	N_c	N_a	N
Tsallis, C	CBPF	14.8	35	5946	83	219
Berkovits, N	Unesp	10.8	20	1101	37	57
Letelier, PS	Unicamp	10.7	17	1156	27	113
Adhikari, S K	Unesp	9.5	20	1423	42	182
Alcaraz, FC	USP	7.7	20	1060	52	74
Lemos, JPS	UFRJ	7.5	14	548	26	32
Nunes, OAC	UNB	7.1	10	338	14	81
Hipolito, O	USP	7.0	18	919	46	75
Sarmiento, EF	UFAL	6.8	20	996	59	56
Swieca JA	UFSCar	6.7	16	714	38	20

Com estada curta na UFSCar, Swieca veio a falecer no dia 22 de dezembro de 1980, aos 44 anos de idade. A sua morte é assim lembrada pelo físico Carlos Aragão, em DE CARVALHO (2018):

Soube do falecimento de Swieca ainda no exterior, em 1980, por carta de meu amigo e colega de turma Paulo Murilo de Castro Oliveira¹²³. Foi um grande choque naquele momento, eu percebi que desaparecia um dos melhores físicos do país, criativo, original e com profundo conhecimento.

123 Paulo M. de C. Oliveira é físico especializado em transições de fase, sistemas dinâmicos e modelagem computacional de sistemas evolucionários. Atualmente é professor titular aposentado do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense e pesquisador senior na Universidade Federal da Integração Latino Americana; é também membro titular da Academia Brasileira de Ciências.

4.6 DIÁLOGOS E DEBATES CIENTÍFICOS ENTRE J. A. SWIECA E T. A. J. MARIS

É plausível afirmar que, no exercício de suas profissões, Maris e Swieca estavam cientes da tese enfatizada por Heisenberg (1958) de que quanto mais se busca uma verdade científica, maiores serão as chances do evento em pauta se expressar probabilisticamente, principalmente em se tratando de TQC e EDQ. Além disso, tal busca não mais se realiza por método único de pesquisa, mas de vários.

No Instituto de Física da UFRGS, Theodor Maris, enquanto docente, diante desse leque de técnicas que proporcionam aprendizagem aos seu orientandos, não optava pela aula expositiva, mas sim pela aula dialogada e contextualizada, modalidade seminário, que requer significativo estudo prévio do tema pelo aluno expositor (palestrante), tanto pela necessidade de exercitar a sintetização do conteúdo, quando da sua apresentação, quanto pelo grau de conhecimento e “cobrança” do público alvo que irá ouvi-lo, questioná-lo, debater e avaliá-lo. Essa didática exercida por Maris é assim recordada, tal como seguidamente descrita por seus parceiros de pesquisa e ex-aluno, em DILLENBURG & JACOB (1994, p. 86-87):

Ele desempenhou frequentemente um papel fundamental em termos de motivação e, especialmente na condução de programas de estudo sob a forma de seminários. Em cada sessão de seminários era determinado um assunto para o encontro seguinte, o palestrante era sorteado entre todos os participantes no início, prática que ocasionalmente gerava protestos devido ao trabalho duro que demandava de todos. Um visitante estrangeiro que desejava participar como ouvinte até murmurou sombriamente sobre violação da liberdade acadêmica; de fato, essa era a forma favorita (e única!) de Theo ministrar aulas. Comentando um pouco o parêntese anterior: enquanto o trabalho individual com estudantes recebia atenção ilimitada de Theo, aulas formais não eram sua modalidade preferida para ensinar física.

Por sua vez, J. A. Swieca, embora também se utilizasse de seminários como ferramenta didática facilitadora do binômio ensino-aprendizagem, em sua atividade docente cotidiana, seja em São Paulo ou no Rio de Janeiro, optava também pela aula expositiva que, na opinião de vários ex-alunos seus e pares, funcionava como que uma “visualização” do conteúdo em pauta. Esta prática é lembrada pelo físico Luciano Videira, seu contemporâneo, docente da USP e PUC-RJ:

Como eu disse, essa sua característica raríssima, de poder explicar em termos simples, de fazer traduções intuitivas, estava justamente centrada no poder que ele tinha de ver os problemas e “vendo-os” de “lê-los”, de interpretá-los, de entendê-los muito mais profundamente. Essa característica de tradução, associada a uma maneira afável, educada, não agressiva e implementada, muitas vezes, na forma de um diálogo, fazia com que os seus interlocutores, além de também passarem a “ver” as coisas pudessem, até, convencerem-se de que haviam visto sozinhos. (VIDEIRA, 1985, p. 2).

Dos propósitos comuns entre os físicos, dos quais se destacam as pesquisas em EDQ realizadas no Brasil, era de se esperar pelos encontros entre Swieca e Maris, sejam esses presenciais, sejam pelas leituras dos seus artigos e respectivas citações. Essas alternativas foram realidades, mas, destaca-se aqui, inicialmente, a busca daquela verdade científica, mediante os diálogos e debates científicos entre eles realizados, tendo principalmente a USP como sede. Sobre esses debates, Wreszinski (2006) assim se reporta em publicação que celebra os 75 anos do IFUSP:

Uma característica fundamental de J. A. Swieca era o debate científico. Havia adversários como T. A. J. Maris, da UFRGS, de quem Swieca discordava em quase tudo, desde a eletrodinâmica quântica até a quebra espontânea de simetria, mas, nunca "inimigos", havia total e absoluta cordialidade.

Indagado sobre essa temática, no ano de 2017, em entrevista concedida para essa Tese de Doutorado, o físico G. Jacob, um dos parceiros de pesquisa de T. Maris, assim se reporta em JACOB (2017):

O contato de Maris com Swieca foi ocasional, não creio que tenha havido uma discussão mais profunda entre ambos [ainda referindo-se a WRESZINSKI, 2006]; se assim não fosse, Maris teria feito um agradecimento em um de seus trabalhos (ele era muito cioso em ser absolutamente correto em referências e créditos a discussões em seus trabalhos).

É provável que o intervalo de 40 anos, entre esses debates e a entrevista anterior tenha subtraído algumas lembranças do professor Jacob, pois Maris procede exatamente com a retidão e compromisso nas citações em relação ao seu par Swieca, tal como dito pelo seu orientando e registrado em MARIS et al. (1967, p. 120): *We thank J. A. Swieca for stimulating discussions*. Essas discussões estimulantes e úteis, entre ambos, são também mencionadas em MARIS et al. (1970a, p. 388) e MARIS et al. (1972, p. 458).

Os anos de 1966 a 1971 no Brasil, e no ambiente das universidades, foram marcados por tensões e perseguições realizadas pelo Regime Militar contra discentes, docentes e

pesquisadores. Registrando-se que compõe esse período a implantação da Reforma Universitária de 1968, tem-se, portanto, as pesquisas universitárias que prosseguiram e as que forma interrompidas, mas, é também fato que várias obtiveram reconhecimento nacional e internacional de centros de pesquisas renomados.

Desse período temático, em TQC pelas trilhas da EDQ, décadas de 1960 e 1970, quatro publicações frutos dessas pesquisas, já nessa TD anteriormente abordadas, são nesta seção novamente escolhidas para abordagens por terem temáticas comuns, complementares e troca de referências entre os pares Maris e Swieca, que são os artigos Maris et al. (1966, 1967), Maris (1969) e Lowenstein & Swieca (1971).

Os artigos realizados por Maris e seu grupo têm, entre outras, uma conclusão comum no que se refere à possibilidade de violação do teorema de Noether, como forma de não se obterem bósons de Goldstone quando da análise de correntes locais em calibres não covariantes.

Por sua vez, referenciando-se em Klaiber (1968, p.141), após analisar em TQC soluções não covariantes, Lowenstein & Swieca (1971) concluem, à página 180, que os campos quânticos não mais anticomutam para separações espaciais, o que é uma característica comum dos calibres não-covariantes.

Retomando esse tópico, sendo agora analisadas situações de quebra de simetria, afirmam esses autores não existir correntes gerando transformações de calibre e que tais conclusões são referenciadas nas pesquisas de Theodor Maris e seu grupo de pesquisadores, tal como se lê em LOWENSTEIN & SWIECA (1971, p. 192):

Nos calibres não-covariantes da Seção III [p. 177] não há corrente local gerando as transformações de campos γ^5 ; e para constante de acoplamento cujo valor é igual a raiz quadrada de pi, também, não há corrente gerando as transformações do calibre. Isso corresponde a uma violação total do teorema de Noether, um mecanismo proposto por Maris et al.¹²⁴ como forma de evitar bósons de Goldstone quando uma simetria é espontaneamente quebrada. De fato, temos uma quebra espontânea de ambas as simetrias sem partículas de massa zero.

124 Refere-se aos artigos Maris et al. (1966, 1967) e Maris (1969).

Seguidamente, esses autores, referenciando-se em Haag (1962), em situação que se assemelha ao efeito da supercondutividade em nível quântico, afirmam inexistirem automorfismos locais da álgebra de campo associados às simetrias, devido à ausência de correntes conservadas, ausência essa que é o motivo pelo qual não se valida o teorema de Goldstone nessa situação.

Ainda no ano de 2017, sobre a temática título dessa seção, em entrevista concedida para essa tese de doutorado, o físico W. Wreszinski, assim se remete àqueles debates, em WRESZINSKI (2017):

Caro Walker:

De fato, pouco tenho a adicionar [...] a não ser recordações pessoais de seminários que assisti proferidos por Maris e Swieca sobre EDQ em São Paulo [...]

A ligação entre Maris e Swieca foi centrada no tema da quebra de simetria, e o comentário mais interessante de Swieca sobre o trabalho de Maris nesse setor é, na minha opinião, a observação na página 192 do seu trabalho magnífico sobre a EDQ em Duas Dimensões, com John Lowenstein (Annals of Physics vol. 68, 172-195 (1971))¹²⁵, sobre o "total breakdown of Noether's theorem, a mechanism proposed by Maris *et al.*."

Não fosse a morte prematura de Swieca, é sensato afirmar que os diálogos e debates entre esses físicos continuariam, com plateia formada por alunos e pares, gerando novos temas para a TQC pelas trilhas da EDQ desenvolvida no Brasil.

125 Esse artigo corresponde, nas referências, a Lowenstein & Swieca (1971).

CAPÍTULO V – LEGADO DOS FÍSICOS PROTAGONISTAS À TQC PELAS TRILHAS DA EDQ

5. CONCLUSÃO

Pelas análises dos conteúdos abordados nessa TD, é possível afirmar que somada aos talentos dos físicos protagonistas, tanto individuais quanto de formadores e líderes de grupos de pesquisas, para o mister de introdução e implantação da TQC pelas trilhas da EDQ no Brasil, tem-se a permissão de universidades e institutos estrangeiros conceituados nessa área da física para liberarem seus físicos, com o propósito de realizarem visitas, estadas e passarem anos sabáticos no Brasil, onde eles então pesquisavam com seus pares brasileiros, produziam as respectivas publicações, além de ministrarem cursos e palestras nas instituições brasileiras supracitadas. Inserido ainda nesse propósito, tem-se a atuação, em conceituadas universidades estrangeiras da Europa e EUA, dos nossos físicos protagonistas especializados em TQC e EDQ como docentes e pesquisadores.

Portanto, da pesquisa realizada nessa TD, pode-se concluir que a TQC pelo formalismo conceitual da EDQ desenvolvida no Brasil no período de 1948 a 1980 registra em prol dessas ciências contribuições singulares (seguidamente detalhadas) em nível nacional e internacional realizadas tanto pelos físicos protagonistas como pelos seus parceiros e orientandos; e para que essas pesquisas se efetivassem, fez-se necessário, com significativo percentual, que fossem fomentadas por vários órgãos de apoio à ciência de diversos países.

5.1 CONTRIBUIÇÕES

Por questões didáticas, de coerência e para se alcançar o objetivo proposto por essa TD, as contribuições serão registradas pela parcela de cada físico protagonista e seu grupo de pesquisa em que além dos registros textuais, tem-se uma relação com registros anuais dos conteúdos temáticos de pesquisa e respectivas publicações. Seguidamente, em seção própria, são registradas as contribuições que tenham atividades comuns entre os protagonistas e seus respectivos grupos.

5.1.1 CONTRIBUIÇÕES DE J. LEITE LOPES

Do conteúdo pesquisado em prol da temática título dessa tese, correspondente a 32 anos de atividade científica do físico Leite Lopes, registra-se que ele proporcionou as seguintes contribuições:

- Coube a ele no Brasil a busca da unificação entre as interações fundamentais eletromagnética e fraca, referenciando-se na TQC pelo formalismo conceitual da EDQ.
- Embora tivesse sido essa busca pela unificação influenciada pelos artigos de Foldy e de Feynman, em Lopes (1958) realizou uma abordagem peculiar, considerando a existência de correntes neutras fracas para se caracterizar os bósons que regem a interação eletrofraca, pela qual ele chegou próximo ao resultado posteriormente estabelecido. Podemos assim considerar Leite Lopes um pioneiro em calcular um valor de limite inferior (estimativa) para a massa desses bósons, que seriam posteriormente componentes do modelo Weinberg-Glashow-Salam para essa interação.
- Leite Lopes deixou como herança para a TQC pelas trilhas da EDQ no Brasil o reconhecimento do nobelista Weinberg, quando do recebimento do prêmio Nobel desse, ao declarar em sua conferência ser L. Lopes um dos pesquisadores de outrora (década de 1950 e seguintes) de proximidade relevante quanto à tentativa de descobrir elementos que regem a interação eletrofraca.
- Mobilizou-se constantemente Leite Lopes, para imprimir uma dinâmica de pesquisa de credibilidade internacional, tanto na ausência de fomento nacional para pesquisas quanto quando da busca de verbas para essas, principalmente via CNPq.
- Está entre os que idealizaram e construíram o CBPF, cuja atuação foi determinante para essas pesquisas, pois a instituição já nasce com *status* de pós-graduação, o que lhe confere rapidez e flexibilidade quanto ao priorizar de medidas para a implantação e desenvolvimento de pesquisas na temática dessa TD, a exemplo do convite e estada de Feynman para o CBPF e as respectivas aulas, pesquisas e publicações com esse físico realizadas enquanto ele esteve nesse centro. Esse procedimento de Leite Lopes se repetiu, extensivo a outros pesquisadores de renome internacional, a exemplo de Léon Rosenfeld, que tal como Feynman utilizou alguns de seus sabáticos para atividades no CBPF.
- Constitui-se em significativo diferencial de credibilidade, perante a comunidade internacional de físicos especializados em partículas e TQC, ser Leite Lopes escolhido por

R. P. Feynman (em 1951 e 1952) como parceiro de pesquisa e respectiva publicação em em anos bem próximos ao da criação da EDQ renormalizada (1948 pela contribuição de um dos artigos de Feynman), da qual esse físico é um dos criadores que então goza de plena evidência e prestígio junto aos pares.

- Pertence a Leite Lopes o mérito de escrever o primeiro livro sobre EDQ, em língua portuguesa, editado e publicado no Brasil.

- Como resultado de pesquisas em TQC por ele liderada, em 1964, tem-se o livro *Introdução a Teoria Quântica de Campos*, em língua portuguesa, editado e publicado no Brasil.

- Devido à saída do Brasil motivada pelo regime militar, quando no exterior, França, Leite Lopes funda e dirige o Grupo de Física Teórica de Altas Energias do CRN da *Université Louis Pasteur*, Strasbourg, por mais de uma década, mantendo as orientações de alunos estrangeiros, com semelhantes propósitos, temáticas e publicações, extensivas também para os alunos brasileiros que naquele país foram seus orientandos.

- De volta ao Brasil Leite Lopes retoma a temática e publica artigos e livro.

- Por interesses vários, manobras políticas, econômicas e financeiras, além do seu alcance, Leite Lopes não conseguiu que o governo brasileiro implantasse o projeto, já em tramitação nos órgãos públicos de C&T do Brasil, de um acelerador de partículas em moldes aos dos centros de pesquisa em física de partículas e universidades da Europa e dos EUA, o qual seria um item facilitador, de porte, para dinamizar pesquisas dessa física no país.

- Compôs a pauta de trabalho de L. Lopes, nos anos dessa pesquisa, estivesse ele presente ou fora do Brasil, promover intercâmbio com universidades estrangeiras em prol de orientandos como também o comprometimento com a produção científica, sua divulgação, formação de docentes e pesquisadores em áreas da TQC, estando entre essas a EDQ.

- A sequência temporal, por Leite Lopes e grupo por ele liderado para conteúdo de pesquisa elegido em TQC pelas vias da EDQ ou nessa se referenciando no período temático dessa TD, com respectiva publicação é conforme apresentada:

Ano	Conteúdos temáticos com respectivas publicações
1949	Momento magnético anômalo do núcleon
1951	Polarização do vácuo e energia própria na teoria quântica de campos
1954	A energia média harmônica para absorção de fótons pelos núcleos
1958	Proposta de modelo para a interação universal de Fermi.

	Captura de múons negativos por núcleos leves.
1960 a 1964	Temas que compõem uma introdução a EDQ
1969	Características da massa na teoria dos férmions.
	Simetrias em TQC e EDQ
1970	Invariância de calibre em TQC do segundo tipo e regras de comutação
1972	A evolução das noções de espaço e tempo aplicadas à TQC e EDQ
1975	Correntes neutras e dispersão elástica de lépton-núcleon em alta energia
1977	Proposta de modelo para Léptons
1979	Análise da proposta dos campos Bargmann-Wigner e Weyl para Spin 3/2
	O limite da EDQ massiva e a teoria dos campos de fótons de dois componentes.
	Outras novas possíveis interações de léptons.
1980	Releituras de temas de TQC e EDQ

Ano	Conteúdos temáticos com respectivos livros publicados
1960	Introdução à Eletrodinâmica Quântica
	Teoria do Campo Unificado (In Encyclopedie Delta-Larousse)
1964	Introdução à Teoria Quântica de Campos
1969	Lectures on Symmetries
1977	Introducción a la Electrodinámica Cuántica (em espanhol)
1980	Gauge field theories: an introduction

Em 12 de junho de 2006, com 87 anos de idade, uma segunda-feira, registra-se o falecimento do físico Leite Lopes, sendo assim recordado pelo jornal Folha de São Paulo no dia seguinte:

Morre José Leite Lopes, físico e pioneiro da ciência

Cientista combateu a ditadura e articulou a criação de instituições de pesquisa

Físico foi precursor da área que rendeu prêmio Nobel ao norte-americano Steven Weinberg; no Brasil, ajudou a fundar o CBPF e o CNPq

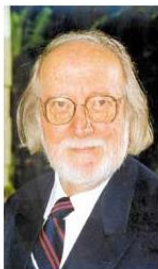


Fig. 10 Leite Lopes pela Folha de São Paulo

Fonte: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/fe1306200601.htm>

Até os dias de 2019, eventos científicos ocorrem em sua homenagem.

5.1.2 CONTRIBUIÇÕES DE THEODOR MARIS

Do conteúdo pesquisado para a temática título dessa tese, correspondente aos 21 anos (1959 a 1980) de atividade científica no Brasil desenvolvida pelo físico Theodor A. J. Maris, registra-se que ele proporcionou as seguintes contribuições:

- Vindo do exterior, Maris se dedica e é pioneiro na UFRGS, em pesquisa que objetiva formação de grupos e implantação da TQC pelo formalismo conceitual da EDQ.

- Suas pesquisas em prol da TQC no Brasil são também referenciadas nos estudos do físico alemão Rudolf Haag.

- A escolha, por Maris, da temática quebra espontânea de simetria prevalece como linha de pesquisa em TQC pelas vias da EDQ realizada nessa universidade e no Brasil, com vários artigos publicados em periódicos de renome internacional.

- Norteia várias de suas pesquisas a hipótese de que as massas de elétron e múon são de origem puramente eletromagnética, tendo essas partículas massa nula na ausência de interação eletromagnética. A invariância dilatacional (de escala) ocupou posição de destaque em suas pesquisas.

- Na UFRGS, Maris orientou a primeira tese de doutorado em eletrodinâmica quântica, sobre quebra espontânea de simetria, e que é também uma das primeiras do Brasil.

- Seu grupo de pesquisa se mantém coeso na temática título dessa TD por cerca de duas décadas no IF da UFRGS.

- Excetuando-se a publicação Haag & Maris (1963) e 4 individuais, é importante registrar que as pesquisas e respectivas publicações em EDQ, lideradas por Maris, são realizadas com físico brasileiro do IF da UFRGS e seus ex-alunos desse IF, também brasileiros, ou seja, 13 dos 18 artigos analisados nessa TD, que correspondem a 72,22% da produção científica em EDQ publicada em periódico de física do exterior e de credibilidade internacional, foram efetivamente realizados em grupo constituído por físicos brasileiros e formados no âmbito dessa universidade; o que significa coerência, duas décadas depois, com a proposta de Maris apresentada no ano de 1960 em simpósio ocorrido no IF-UFRGS para esboçar o perfil do grupo de pesquisa a ser formado nesse IF, realidade em conformidade, portanto, com a citação JACOB (2010, p. 21), já anteriormente postada nessa TD.

- A sequência temporal, por T. Maris e grupo por ele liderado para conteúdo de pesquisa elegido em TQC pelas vias da EDQ ou nessa se referenciando no período temático dessa TD, com respectiva publicação é conforme apresentada:

Ano	Conteúdos temáticos com respectivas publicações
1963	Razão de massa elétron-múon
	Invariância dilatacional de elétrons e múons
1964	Férmion nu com massa nula em EDQ
	Generalização do calibre de Landau
	Quebra de simetria e o problema elétron-múon (Par. I)
1965	Escala de comprimento em EDQ sem massa nua
	Quebra de simetria e o problema elétron-múon (Par. II)
1966	Quebra espontânea de simetria e conservação de corrente
1967	Alternativas de quebra espontânea de simetria
1968	Proposta de Lagrangiana para EDQ
	Proposta de novo formalismo conceitual para EDQ
1969	Renormalização de infinitos em TQC
	Quebra espontânea de simetria e conservação de corrente em EDQ sem massa
1970	Renormalização e invariância de calibre em EDQ
	Propagador fermiônico em EDQ
1972	Graus e hierarquias de simetrias em TQC e EDQ
1975	Razão de massa entre partículas subatômicas em TQC e EDQ
1976	Grupo de renormalização em TQC

- Várias das pesquisas e respectivas publicações de Maris e seu grupo foram fomentadas no Brasil, com financiamento de órgãos estrangeiros, tal como o *U.S. Army Research Office*, que contribuiu em parceria com o CNPq, para a pesquisa que gerou o artigo Maris; Herscovitz; Jacob (1965a).

- Para Maris e seu grupo, observa-se uma produção científica quantitativamente menor na temática TQC pelo formalismo conceitual da EDQ quando comparada com a produção científica em física nuclear, principalmente na década de 1970, o que é explicado pelos fatores políticos, econômicos e financeiros atuantes no Brasil, pois a política de fomento para C&T instalada no país priorizava as linhas de pesquisa em física nuclear, principalmente até a metade da década de 1970, e física de estado sólido, essa a partir da segunda metade dessa década até 1980 (limite temporal e superior dessa TD) e anos seguintes, como prioritárias em determinadas universidades, estando a UFRGS entre essas.

- Tal como os outros dois protagonistas dessa tese de doutorado, registra-se nas três décadas em análise para o físico T. Maris o engajamento para promover intercâmbio com universidades estrangeiras em prol de orientandos na temática tese e correlatas, além do comprometimento com a produção científica, divulgação, formação de docentes e pesquisadores em TQC pelo formalismo conceitual da EDQ e disciplinas correlatas.

Em 20 de agosto de 2010, uma sexta-feira, registra-se o falecimento do físico holandês, então com 90 anos de idade, ele que adotou a física brasileira, sendo assim lembrado pelo CNPq em 02/03/2016:



Fig.11 Theodor Maris pelo CNPq

Fonte: <http://www.cnpq.br/web/guest/agraciados?>

Até os dias de 2019, eventos científicos ocorrem em sua homenagem.

5.1.3 CONTRIBUIÇÕES DE J. A. SWIECA

Do até então pesquisado em prol da temática título dessa tese, correspondente aos 21 anos (1959 a 1980) de atividade científica no Brasil desenvolvida pelo físico Jorge André Swieca, registra-se que ele proporcionou as seguintes contribuições:

- Depois das dificuldades naturais de percurso, dedica-se ainda mais à TQC, e apesar da sua orientação de doutorado e publicação inicial terem sido com W. Güttinger, Swieca segue por determinado período em temas de pesquisas em EDQ, referenciando-se principalmente nos estudos do físico alemão Rudolf Haag.
- Swieca retoma o tema Teorema de Goldstone, desenvolve-o e é reconhecido pelos pares como o físico que proporcionou a prova (demonstração) mais detalhada desse teorema.
- Retomando um tema inicialmente apresentado e desenvolvido pelos físicos Thirring e Schwinger, Swieca se aprofunda e contribui para ampliar a “visibilidade” da EDQ, mediante a EDQ em duas dimensões, também denominada pelos pares de “laboratórios teóricos em EDQ”.
- As singularidades apresentadas no desenvolvimento da EDQ em duas dimensões por Swieca, juntamente com J. Lowenstein, possibilitaram no ano de 1971, e, portanto, de forma antecipada ao estabelecimento do Modelo Padrão, entendimento da estrutura de vácuos θ da QCD, proporcionando-lhe notório reconhecimento pelos pares.
- Com sua interpretação à luz da EDQ desenvolvida no *Teorema para “Blindagem” da Carga*, Swieca contribuiu para um entendimento alternativo, e diferenciado, dos modelos de Higgs e Padrão.
- É também significativa a sua contribuição, mediante o artigo “*Charge screening and mass spectrum*”, para o entendimento do fenômeno da supercondutividade (em nível quântico), confirmado experimentalmente pelo efeito *Meissner-Ochsenfeld*.
- Os estudos de soluções tipo *sóliton*, *monopolo* e *kink* para resolver problemas em TQC e EDQ2 compuseram a pauta dos seus grupos de pesquisa e publicações.
- Swieca e seu grupo de pesquisa mantêm até o ano de 1980 um ritmo sempre crescente em pesquisas, orientações e publicações em TQC.

- Apesar de significativo número as pesquisas e respectivas publicações em EDQ serem realizadas com físicos da USP, PUC e UFSCAR, registra-se a parceria de Swieca para produção de artigos, inclusive os de maior projeção entre pares, com físicos estrangeiros e já renomados.

- Algumas das pesquisas e respectivas publicações em TQC pelas trilhas da EDQ se faz no Brasil, com apoio financeiro de órgãos estrangeiros, tal como o Ministério Federal Alemão de Energia Atômica e a Agência Internacional de Energia Atômica.

- Tal como os outros dois protagonistas dessa TD, promove intercâmbio com universidades estrangeiras em prol de orientandos na temática tese; mantém-se em todo o período comprometido com a produção científica, sua divulgação, formação de docentes e pesquisadores em TQC e EDQ.

- A sequência temporal, por J. A. Swieca e grupo por ele liderado para conteúdo de pesquisa elegido em TQC pelas vias da EDQ ou nessa se referenciando no período temático dessa TD, com respectiva publicação é conforme apresentada:

Ano	Conteúdos temáticos com respectivas publicações
1961	Teorias quânticas de campos a pequenas distâncias e renormalização
1962	Propagadores de campo singulares com acoplamento zero
1965	Massa e conexão proveniente da interação direta.
	Critério para interpretação de partículas em TQC; Estados essencialmente localizados
1966	Correntes conservadas, simetrias associadas, quebra espontânea de simetria e Teorema de Goldstone
	Cargas como integrais de densidades
1967	Alcance de forças e simetrias quebradas em sistemas de muitos corpos
	Quebra espontânea de simetrias e estados de massa zero
	Correntes conservadas, renormalização e estados de massa zero
1968	Condição para quebra de simetria de campos de férmion
1970	Problemas de estabilidade de campos quânticos em potenciais externos dependentes de tempo
1971	Eletrodinâmica quântica em duas dimensões
1976	Blindagem de carga e espectro de Massa
1977	Transformações de calibre e estrutura de vácuo no modelo de Schwinger
	Campos e observáveis no modelo de Schwinger massivo
	Sólitons e confinamento
1978	Abordagens sobre critérios de confinamento (referenciadas em EDQ2)
	Número topológico não inteiro e infinitude da ação.
	Condições-limite quase periódicas e estrutura de vácuo em teorias de calibre

	Teorias bidimensionais generalizadas abelianas de calibre; e confinamento (referenciado em EDQ2)
1979	Ambiguidade de quantização e estrutura de vácuo não trivial
	Representação de integral de caminho para amplitudes de tunelamento no modelo Schwinger (referenciada em EDQ2)
	Blindagem versus confinamento (refer. em EDQ2)
1980	Números de enrolamento fracionário e o problema U(1)

Ano	Conteúdos temáticos com respectivas publicações: Capítulo de Livro
1970	Teorema de Goldstone e tópicos relacionados (SWIECA, 1970)

- Swieca falece em 1980, ainda perseguindo o questionamento inicial da sua vida profissional: *When does a quantum field theory describe particles?*

O periódico científico *Physics Today*, em maio de 1981, nas páginas 97 e 98, além de uma sucinta descrição sobre atividade profissional desse físico, exhibe a foto a seguir:



Fig.12 Swieca pelo *Physics Today*

Fonte: < <https://doi.org/10.1063/1.2914592> >

Organizado pelo físico Jorge Leal Ferreira, ainda em 1981, o CNPq publicou suas Obras Coligidas (SWIECA, 1981). Até os dias de 2019, eventos científicos ocorrem em sua homenagem.

5.1.4 INSTITUIÇÕES DE FOMENTO ÀS PESQUISAS

Nem todas as pesquisas foram fomentadas, no entanto, guardadas as devidas analogias com acordos celebrados entre o Brasil e vários países para incentivo à pesquisa em C&T, aqui exemplificados pelas instituições German Federal Ministry for Atomic Energy e International Atomic Energy Agency que contribuíram com fomento para a pesquisa que resultou no artigo Güttinger & Swieca (1961), registra-se que, apesar das dificuldades sociais, políticas e econômicas, as pesquisas em TQC pelas trilhas da EDQ, objeto dessa TD, não se mencionando nesta seção as contribuições das universidades e centros de pesquisa, efetivaram-se, em significativa quantidade, a partir de acordos para fomento de pesquisa realizados pelo governo do Brasil com países da Europa, das Américas e os EUA.

Essas pesquisas foram parcialmente ou integralmente fomentadas pelas seguintes instituições:

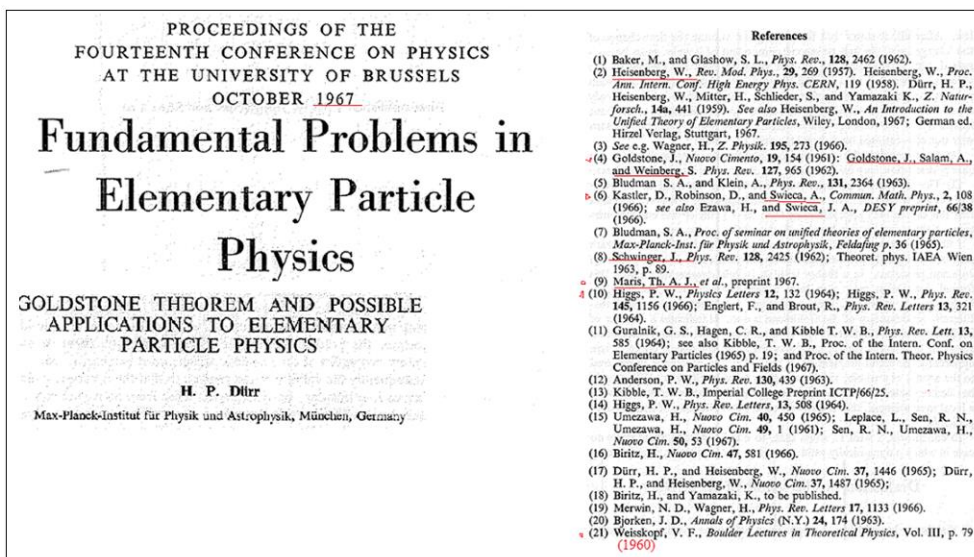
Instituição	País
John Simon Guggenheim Memorial	EUA
German Federal Ministry for Atomic Energy	Alemanha
The International Atomic Energy Agency ¹²⁶	Áustria (País sede)
National Science Foundation	EUA
Research Corporation for Science Advance	EUA
CNPq Conselho Nacional de Pesquisas, Brazil.	Brasil
U. S. Army Research Office	EUA
CNPq Conselho Nacional de Pesquisas (Brasil).	Brasil
Professorship Program of the Pan American Union.	EUA (País sede)
Conselho de pesquisa da UFRGS	Brasil
BNDE - Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico	Brasil
Regional Program of Scientific and Technological Development of the OAS (Organization of American States)	EUA (País sede)
Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul	Brasil
National Science Foundation	EUA

126 Criada em 29/07/1957 com o objetivo de promover entre os países membros o uso pacífico da energia nuclear e portanto sem fins para uso militar e fabricação de armas, tendo sede em Viena - Áustria.

5.2 INTERSEÇÕES NA PRÁTICA DE PESQUISAS EM EDQ

Registra-se nesta seção as atividades que foram comuns aos físicos protagonistas, em prol do tema desenvolvido nessa tese, conforme a seguir:

- As pesquisas têm a TQC como foco comum, seja em nível de mestrado ou de doutorado, e já se iniciam no Brasil nos primeiros anos de 1960.
- A Teoria de Grupo como ferramenta utilizada em TQC se fez presente em pesquisas e respectivos artigos.
- As pesquisas em EDQ no Brasil, para o período em pauta, têm a quebra espontânea de simetria como linha de pesquisa, seguindo uma tendência de prioridade entre os pares que é mundial, tal como acontece em outros núcleos de pesquisas internacionais.
- Em vários artigos de Swieca e Maris, têm-se a influencia intelectual direta de R. Haag, seja presencial, mediante consultas, ou como referência técnica devido a sua obra (conjunto de artigos) especializada e seu talento internacionalmente reconhecido em TQC pelo formalismo conceitual da EDQ.
- A existência de debates entre Swieca e Maris sobre EDQ e os mecanismos da quebra espontânea de simetria, representam registros de diálogos enriquecedores entre esses pares em prol da TQC desenvolvida no Brasil nas décadas de 1960 e 1970; existindo ainda entre eles uma troca recíproca de citações em artigos publicados, oriundos de pesquisas realizadas pelos grupos de EDQ por eles liderados.
- É oportuno mencionar que as dificuldades vivenciadas pelos protagonistas: Leite Lopes quanto ao não se instalar um acelerador de partículas vinculado ao CBPF; a ausência de recursos condizentes com os propósitos de Swieca para a UFSCar e a saída de membro do grupo de pesquisa em EDQ do IF da UFRGS, liderado por Maris, para o de física nuclear tiveram também como ponto de interseção a consequência de que pesquisas em física de partículas, representadas pela TQC e EDQ, não eram consideradas como prioritárias para o Brasil, principalmente, na década de 1970.
- Independentemente dos indicadores de registros de citações, os grupos de pesquisas brasileiros, em TQC regida pelo formalismo conceitual da EDQ, liderados por Leite Lopes, Maris e Swieca, ocupam a pauta de eventos nacionais e internacionais, a exemplo do aqui apresentado em folder em que os dois últimos se fazem presentes:



- Registra-se que formar físicos talentosos em TQC pelas vias da EDQ foi, no período dessa tese, e que deram continuidade à então temática, uma prática comum entre os físicos protagonistas, servindo às instituições de física brasileiras e estrangeiras às quais se vincularam, contribuindo portanto para o desenvolvimento da TQC pelo formalismo conceitual da EDQ, independentemente de nacionalidade. Desses físicos inicialmente formados em nível de mestrado e/ou doutorado pelos protagonistas, e no período em pauta, com contribuições na temática dessa TD, são aqui mencionados:

Orientador	Orientando	Instituição a que serve ou serviu
José Leite Lopes	Mario Novello	CBPF
	Maria B. L. Gay Ducati	UFRGS
	Dominique Spheler	USP
Theodor A. Maris	Victoria E. Herscovitz	UFRGS
	Gerhard Jacob	UFRGS
	Bernardo Liberman	UFRGS
Jorge A. swieca	Marcelo O. C. Gomes	USP
	Eduardo C. Marino	UFRJ
	Gil da Costa Marques	USP
	Carlos A. Aragão de Carvalho Filho	PUC
	Valério Kurak	PUC
	Luiz Victorio Belvedere	PUC

- Registra-se, ainda, que, apesar de o ITA estar entre as instituições inicialmente contempladas com a TQC pelas trilhas da EDQ, mediante seminários e palestras ministradas por Feynman e Leite Lopes, pesquisas em EDQ não se iniciaram nem foram desenvolvidas pelos físicos protagonistas dessa TD, tanto nessa instituição como em outras instituições militares de ensino superior do Brasil.

5.2.1 MAIS UM OLHAR PARA A TCQ PELAS TRILHAS DA EDQ

Para essa tese que tem, também, como coincidentes com os seus limites temporais o ano de fundação da SBPC (1948) e o ano da aprovação pelo Congresso Nacional do Brasil da emenda constitucional que restabelece eleições diretas para os governos estaduais e do distrito federal (1980), intervalo temporal esse também marcado por limitações sociais, políticas e econômicas impostas aos nossos físicos protagonistas e por extensão aos grupos de pesquisas por eles liderados, constata-se que apesar dos dificultadores desse intervalo as atividades em Física Quântica representadas pelas pesquisas na área de TQC pelas trilhas da EDQ, realizadas por esses físicos, objetos dessa TD, contribuíram significativamente para desenvolvimentos de ciências correlatas, tais como Física de Estado Sólido, Cromodinâmica Quântica e a Física de Partículas em si, inclusive, minimizando, e até invertendo, algumas ideias oposicionistas, presentes em determinados físicos brasileiros, que afirmavam não ser essa a área da física que um país como o Brasil, em vias de desenvolvimento, necessitava.

Apesar do reconhecimento, em nível mundial, dessas pesquisas teóricas em Física de Altas Energias, com as respectivas publicações em periódicos científicos internacionais de credibilidade, registradas pelas citações nessas publicações, o *Web of Science* e outras bases de dados internacionais não contemplam devidamente J. L. Lopes, T. A. J. Maris e J. A. Swieca com os números de citações que realmente lhes cabem, creditadas pelos seus pares, para o período temático dessa tese de doutorado, por conter esse período intervalo temporal ainda não devidamente coberto por essas bases.

As pesquisas em TQC pelo formalismo conceitual da EDQ realizadas pelos protagonistas dessa tese e seus alunos e/ou parceiros, que têm a quebra espontânea de simetria local como item de pauta, colocam-os, nos dias de 2019, ainda mais em atualidade por estar essa quebra estritamente vinculada ao campo de Higgs (associado ao bóson de Higgs); campo que permeia o mundo físico e que é quebrado quando abaixo de temperaturas altíssimas pelo mecanismo de Higgs, desencadeado por essa quebra espontânea de simetria, sendo esse mecanismo segundo o Modelo Padrão responsável por gerar a massa (inercial) de partículas elementares e por extensão da formação do Universo.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, C. D. Energies of cosmic-ray particles. *Phys. Rev.* 41, 405, 1932.
- _____. The positive electron. *Phys. Rev.* 43, 491, 1933.
- ARAÚJO, J. P. *Introdução à teoria de homotopia*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2012.
- ARNOWITT, R.; DESER, S. Spontaneous symmetry breakdown and the μ -e- γ interaction. *Phys. Rev. B* 138, 712, 1965.
- AURILIA, A. The problem of confinement: from two to four dimensions. *Physics Letters B* 81(2), 1979.
- BAGATOLLI, C. et al. A volatilidade da agenda de políticas de C&T no Brasil. *Revista de Administração Pública*, 2017. Disponível em:
<http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rap/article/view/72425/pdf_139>.
- BARDEEN, J.; COOPER, L. N.; SCHRIEFFER, J. R. Theory of superconductivity. *Phys. Rev.* 108, 1175, 1957a.
- _____. *Microscopic theory of superconductivity*. *Phys. Rev.* 106, 162, 1957b.
- BAKER, M.; GLASHOW, S. L. Spontaneous Breakdown of Elementary Particle Symmetries. *Phys. Rev.* 128, 2462, 1962.
- BARGMANN, V.; WIGNER, E. P. *Group theoretical discussion of relativistic wave equations*. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 34, 211, 1948.
- BASSALO, J. M. F. Extrato de Entrevista. Entrevistado: José Maria Filardo Bassalo. Entrevistador: Walker Lins. Belém, 2017.
- BATISTA, P. D. et al. Is it possible to compare researchers with different scientific interests? *Scientometrics*, 68(1), 2006.
- BELVEDERE, L. V.; ROTHE, K. D.; SCHROER, B.; SWIECA, J. A. Generalized two-dimensional Abelian gauge theories and confinement. *Nucl. Phys. B* 153, 112, 1979.
- BETHE, A. H. The electromagnetic shift of energy levels. *Phys. Rev.* 72, 339, 1947.
- BLACKETT, P. M. S.; OCCHIALINI, G. P. S. *Some photographs of the tracks penetrating radiation*. Cambridge University, 1933.
- BLOCH. F.; NORDSIECK, A. Note on the radiation field of the electron. *Phys. Rev.* 52, 54, 1937.
- BLOCH, F. *The principle of nuclear induction*. Nobel Lecture, December 11, 1952. Disponível em:
< <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1952/bloch/lecture/> >.
- BOHR, N. LXXIII. On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, Series 6, Vol. 26, 857-875, 1913.
- BOHR, N. The Quantum Postulate and the recent development of Atomic Theory. *Nature*, 121, pp. 580-590, London, 1928.
- BOGOLIUBOV, N. N. A new method in the theory of superconductivity. *Soviet Physics JETP* 34, 7, 1958.
- BORCHERS, H. On the structure of the algebra of field observables. *Nuovo Cimento* 24, 214, 1962.
- BORN, M.; JORDAN, P. Zur Quantenmechanik. *Z. Phys.* 34, 858-88, 1925. Em inglês: On quantum mechanics.
- M. BORN. Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge *Z. Phys.* 37, 863–867, 1926 Em inglês: [On the quantum mechanics of collision processes].
- BORN, M.; HEISENBERG, W.; JORDAN, P. Zur Quantenmechanik II. *Z. Phys.* 35, 557, 1926. Em inglês: On quantum mechanics II.

- BUCHHOLZ, D.; FREDENHAGEN, K. Charge screening and mass spectrum in abelian gauge theories. *Nuclear Physics B* 154(2), 226-38, 1979.
- BULLOUGH, R. K. Solitons. *Physics Bulletin* 29(78), 1978.
- CABIBBO, N. Unitary symmetry and leptonic decays. *Phys. Rev. Lett.* 10(12), 531-33, 1963.
- CAPES. *História e missão*. Brasília: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, 2018. Disponível em < <http://www.capes.gov.br/historia-e-missao> >.
- CALLAN Jr., C. G.; DASHEN, R.; GROSS, D. J. The structure of the gauge theory vacuum. *Phys. Rev. D* 17, 2717, 1976.
- _____. Toward a theory of the strong interactions. *Phys. Rev. D*, 1978.
- CÂMARA DOS DEPUTADOS. Decreto-Lei nº 218, de 26 de fevereiro de 1938. Rio de Janeiro, 1938.
- CARUSO, F. Vida e obra de Leite Lopes. *Caderno de Física da UEFS* 4, 11-14, 2006.
- CARTAN, É. Sur les variétés à connexion affine et la théorie de la relativité généralisée (première partie). *Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure* 40, 325-412, 1923.
- _____. Sur les variétés à connexion affine et la théorie de la relativité généralisée (première partie, suite). *Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure* 41, 1-25, 1924.
- CHADWICK, J. The Existence of a Neutron. *Proceedings of the Royal Society of London A* 136, 692-708, 1932.
- CNPQ. *História: a criação, anos 50, 60 e 70*. Brasília: Conselho Nacional de Pesquisas, 2018. Disponível em < <http://www.cnpq.br/web/guest/a-criacao/> >.
- COLEMAN, S. Quantum sine-Gordon equation as the massive Thirring model. *Phys. Rev. D* 11, 2088, 1975.
- _____. More about the massive Schwinger model. *Annals of Physics* 101, 239-67, 1976.
- COLEMAN, S., JACKIW, R., SUSSKIND, L. Charge shielding and quark confinement in the massive Schwinger model. *Annals of Physics* 93, 267-75, 1975.
- COMPTON, A. H. A Quantum Theory of the Scattering of X-Rays by Light Elements. *Physical Review*. 21, 5, 4, 1923.
- COOPER, L. N. Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas. *Phys. Rev* 104, 1189-90, 1956.
- CREWSTER, R. J. Chirality selection rules and the U(1) problem. *Phys. Lett.* 70 B, 349, 1977.
- CRONIN, J. W.; CHRISTENSON, J. H.; FITCH, V. L.; TURLAY, R. Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson. *Phys. Rev. Lett.* 13, 138, 1964.
- CUNNINGHAM, E. The principle of relativity in electrodynamics and an extension thereof. *Proceedings of the London Mathematical Society* 8, 77, 1910.
- DANCOFF, S. M. On radiative corrections for electron scattering. *Phys. Rev.* 55, 959, 1939.
- DANCOFF, S. M. *Non-Adiabatic Meson Theory of Nuclear Forces*. *Phys. Rev.* 78, 382, 1950.
- D'BROGLIE, 1923. Quanta de lumière, diffraction et interférences. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences de Paris* 177: 548-50, 1923.
- DE CARVALHO, C. A. C. *Extrato de entrevista oral e por e-mail com o prof. Carlos Alberto Aragão de Carvalho Filho*. Realizada pelo entrevistador Walker Lins, 2018.
- DILLENBURG, D.; JACOB, G. Festschrift for Th. A. J. Maris. In: DILLENBURG, D.; JACOB, G.; KITCHING P.; VASCONCELLOS, C. (orgs.). *Current topics in nuclear physics and quantum field theory*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1994.

- _____. Theodor August Johannes Maris: the man, the scholar, the professor. In: César, A.Z. et al. (orgs.). *Structure and interaction of hadronics systems. Proceedings of the VIII International Workshop on Hadron Physics 2002*. Bento Gonçalves: UVRs & UFRGS, 2003.
- DIRAC, P. A. M. The quantum theory of the emission and absorption of radiation. *Proceedings of the Royal Society of London A* 114, 243-65, 1927.
- _____. The quantum theory of the electron. *Proc. R. Soc. Lond. A* 117, 610-24, 1928a.
- _____. The quantum theory of the electron. Part. II. *Proc. R. Soc. Lond. A* 117, 351-61, 1928b.
- _____. Theory of electrons and positrons. *Nobel Lecture*. December 12, 1933.
- _____. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 167, 148-169, 1938.
- _____. A new notation for quantum mechanics. *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.* 35(3), 1939.
- _____. Generalized Hamiltonian dynamics. *Can J. Math.* 2, 129, 1950.
- DIXON, L. J. *Introduction to conformal field theory and string theory*. Stanford University, SLAC-PUB-5149, EUA, 1989.
- DÜRR, H.P.; HEINSENBERG, W.; MITTER, H.; SCHLIEDER, S.; YAMAZAKI, K. Zur Theorie der Elementarteilchen. *Zeits. Naturfors.* 14a, 441, 1959. Em inglês: On the theory of elementary particles.
- DYSON, F. J. The radiation theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman. *Phys. Rev.* 75, 486, 1949a.
- _____. The S matrix in quantum electrodynamics. *Phys. Rev.* 75, 1736, 1949b.
- EINSTEIN, A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik* 17, 132-48, 1905a. (Título em português: Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e da transformação da luz).
- _____. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik* 17, 549-60, 1905b. (Título em português: Sobre o movimento de pequenas partículas em suspensão dentro de líquidos em repouso, tal como exigido pela teoria cinético-molecular do calor.)
- _____. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik* 17, 891, 1905c. Tradução para o inglês: On the electrodynamics of moving bodies. In: *The principle of relativity*. Londres: Methuen, 1923.
- _____. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik* 18, 639-41, 1905d. (Título em português: A inércia de um corpo depende da sua energia?). Disponível em: <<http://www.zbp.univie.ac.at/dokumente/einstein4.pdf>>.
- _____. *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*. Tese de doutorado, Universität Zürich, 1906. (Título em português: Uma nova determinação das dimensões moleculares.)
- _____. *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*, 1907. (Título em português: Sobre o princípio da relatividade e as conclusões dele obtidas.)
- _____. Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Annalen der Physik* 85, 898-908, 1911. (Título em português: Sobre a influência da gravidade quando da propagação da luz.) Disponível em: <http://www.relativitycalculator.com/pdfs/On_the_influence_of_Gravitation_on_the_Propagation_of_Light_English.pdf> .
- _____. *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*. *Annalen der Physik* 49, 1916. Tradução para o português: *A teoria da relatividade especial e geral*. São Paulo: Atlas, 1991.
- _____. *Escritos da maturidade: artigos sobre ciência, educação, religião, relações sociais, racismo, ciências sociais e religião*. Trad. Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1994.

- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* *Phys. Rev.* 47, 777, 1935.
- ENGLERT, F.; BROUT, R. Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons. *Phys. Rev. Letters* 13, 321, 1964.
- ESTEVES, B.; MASSARANI, L.; MOREIRA, I. C. *Ciência para Todos e a divulgação científica na imprensa brasileira entre 1948 e 1953. Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência* 4, 62-85, 2006.
- EZAWA, H.; SWIECA, J.A. *Spontaneous breakdown of symmetries and zero-mass states. Comm. Mat. Phys.* 5, 330, 1967.
- FERREIRA, M. M.; MOREIRA R. L. (orgs.) *Capes, 50 anos: depoimentos ao CPDOC/FGV*. Brasília: Capes, 2002.
- FERMI, E. *Versuch einer Theorie der β -Strahlen*. *I. Z. Physik* 88, 161, 1934. Traduzido para o inglês por F.D.L. Wilson: An attempt of a theory of beta radiation. 1. *American Journal of Physics* 36, 1150, 1968.
- FEYNMAN, R. P. Relativistic cut-off for quantum electrodynamics. *Physical Review* 74, 1430-38, 1948a.
- _____. Space-time approach to non-relativistic quantum mechanics. *Rev. Mod. Phys.* 20, 367, 1948b.
- _____. The theory of positrons. *Phys. Rev.* 76(6), 749, 1949a.
- _____. Space-time approach to quantum electrodynamics. *Phys. Rev.* 76, 769, 1949b.
- _____. *Mathematical formulation of the quantum theory of electromagnetic Interaction*. *Phys. Rev.* 80, 440, 1950.
- _____. *The development of the space-time view of quantum electrodynamics*. Nobel Lectures, Physics 1963-1970. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 1965.
- _____. The development of the space-time view of quantum electrodynamics. *Science* 153, n. 3737, 699-708, 1966.
- _____. *The problem of teaching Physics in Latin America*, 1959. Disponível em: < <http://calteches.library.caltech.edu/2255/1/LatinAmerica.pdf> >.
- FEYNMAN, R. P.; LOPES, J. L. On the pseudoscalar meson theory of the deuteron. In Symposium on New Research Techniques in Physics. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 1952.
- FEYNMAN, R. P.; GELL-MANN, M. Theory of the Fermi interaction. *Physical Review* 109(1), 193-198, 1958.
- FEYNMAN, R. P; HIBBS, A. R. *Quantum mechanics and path integrals*. New York: McGraw-Hill, 1965.
- FLEMING, H. *Quebra espontânea de simetria e modelos cosmológicos*. Instituto de Física da USP, 1979.
- _____. *Introdução a quantização e renormalização de Teorias de Campo*. In: I Escola de Verão J. A. Swieca, Seção de Partículas e Campos. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física/CNPq, 1981.
- FREIRE JR., O.; PESSOA JR, O.; BROMBERG, J. (orgs.). *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais*. Campina Grande: EDUEPB e Livraria da Física, 2010.
- FRISHMAN, Y.; KATZ A. Corollaries of the Goldstone theorem. *Phys. Rev. Lett.* 16, 370, 1966.
- FOLDY, L. L. The electron-neutron interaction. *Physical Review* 87(5), 693-696, 1952.
- FORTES, E.C.F.S.; TIJERO, M.C.; PLEITEZ, E. V. A descoberta das correntes neutras das interações fracas. *Rev. Bras. Ens. Fís.* 29(3), 415-435, 2007.

- FRISHMAN, Y.; KATZ, A. Does zero bare mass for the electron entail finite mass for the photon? *Physics Letters* 11(2), 172-174, 1964.
- FULTON, T; ROHBlich, F.; WITTKN, L. Conformal invariance in physics. *Reviews of Modern Physics* 34(3), 1962.
- GAROTTI, H. *As quatro forças fundamentais da natureza*. Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018. Disponível em: < <http://www.if.ufrgs.br/text/fis01043/20032/Humberto/pagina1.html> >
- GELL-MANN, M. A schematic model of baryons and mesons. *Phys. Lett.* 8, 1964.
- G. M. GELL-MANN AND F. E. LOW. Quantum Electrodynamics at Small Distances. *Phys. Rev.* 95, 1300, 1954.
- GEORGI, H; S. L. GLASHOW, S. L. Unity of all elementary particle forces. *Phys. Rev. Lett.* 32, 438-441, 1974.
- GLASER, W. An explicit solution of the Thirring model. *Nuovo Cimento* 9, 990, 1958.
- GLASHOW, S. L. Partial symmetries of weak interactions. *Nucl. Phys.* 22, 579-588, 1961.
- _____. Breaking chiral $SU(3) \otimes SU(3)$. In: ZICHICHI, A. (org.) *Hadrons and their interactions: current and field algebra, soft pions*. New York: Academic Press, 1968, p. 83.
- GLASHOW, S. L.; JACKIW, R.; SHEI, S-S. Electromagnetic decays of pseudoscalar mesons. *Phys. Rev.* 187, 1916, 1969.
- GORDON, W. *Der Comptoneffekt nach der Schrödingerschen Theorie* [The Compton effect according to Schrödinger's theory]. *Zeitschrift für Physik.* 40 (1-2): 117, 1926.
- GREENBERG, O. W. Spin and Unitary-Spin Independence in a Paraquark Model of Baryons and Mesons. *Phys. Rev. Lett.* 13, 598-602, 1964.
- GREEN, G. *An essay on the application of mathematical analysis to the theories of electricity and magnetism*. Nottingham, 1828.
- GROENEWOLD, H. J. On the principles of elementary quantum mechanics. *Physica XII(7)*, 405-460, 1946.
- GÜTTINGER, W.; SWIECA, J. A. Quantum field theories at small distances. *Zeitschrift für Naturforschung* 16, 1265-89, 1961.
- GOLDSTONE, J. Field theories with "superconductor" solutions. *Nuovo Cimento* 19(1), 154, 1961.
- GOLDSTONE, J.; SALAM, A.; WEINBERG, J. Broken symmetries. *Phys. Rev.* 127, 965, 1962.
- GORDON, A. M. P. L. *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP): um estudo de caso à luz da história da ciência, tecnologia e cultura do Brasil*. Tese de Doutorado: Departamento de História, FFLCH, Universidade de São Paulo, 2003.
- GINZBURG, V. B. *Prime elements of ordinary matter, dark matter & dark energy: beyond standard model & string theory*. Roca (FL): Universal Publishers, 2007.
- GROSS, D. J.; ANDRE, N. Dynamical symmetry breaking in asymptotically free field theories. *Phys. Rev. D* 10(10), 1974.
- GUPTA, S. N. Theory of longitudinal photons in quantum electrodynamics. *Proceedings of the Physical Society A* 63(7), 681, 1950.
- HAAG, R. The mathematical structure of the Bardeen-Cooper-Schiff model. *Nuovo Cimento* 25, 287, 1962.
- HAAG, R.; KASTLER, D. An algebraic approach to quantum field theory. *J. Math. Phys.* 5(7), 848-86, 1964.

- HAAG, R.; MARIS, T. A. J. Dilatationally invariant quantum electrodynamics of electrons and muons. *Phys. Rev.* 132(5), 2325-28, 1963.
- HAAG, R.; SWIECA, J. A. When does a quantum field theory describe particles? *Commun. Math. Phys.* 1, 308, 1965.
- HAGEN, C. R. New solutions of the Thirring model. *Nuovo Cimento* 51B,169, 1967.
- HAN, M. Y.; NAMBU, Y. Three-Triplet Model with Double SU(3) Symmetry. *Phys. Rev.* 139, B1006, 1965.
- HEISENBERG, W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik* 43, 172-198, 1927. (Trad. para o inglês: "The actual content of quantum theory kinematics and mechanics", National Aeronautics and Space Administration, NASA TM-77379, 1983.) Disponível em: < https://archive.org/stream/nasa_techdoc_19840008978/19840008978#page/n1/mode/2up >
- _____. Zur Theorie des Ferromagnetismus. *Zeit. Phys.* 49, 619-636, 1928. (Em inglês: On the theory of ferromagnetism, trad. D. H. Delphenich). Disponível em: < http://www.neo-classical-physics.info/uploads/3/0/6/5/3065888/heisenberg_-_on_the_theory_of_ferromagnetism.pdf >
- _____. Über den Bau der Atomke. [On the structure of atomic nuclei]. I. *Z. Phys.* 77, 1, 1932a.
- _____. Über den Bau der Atomke. [On the structure of atomic nuclei]. II. *Z. Phys.* 78, 156, 1932b.
- _____. Über den Bau der Atomke. [On the structure of atomic nuclei]. III. *Z. Phys.* 80, 587, 1933.
- _____. *Physics and philosophy: the revolution in modern science*. New York: Harper and Brothers, 1958.
- _____. Quantum theory of fields and elementary particles. *Rev. Mod. Phys.* 29, 269, 1967.
- HENDRY, J. *The creation of quantum mechanics and the Bohr-Pauli dialogue*. Dordrecht: Reidel, 1984.
- HERTZ, H. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung [Sobre uma influência de luz ultravioleta na descarga elétrica]. *Annalen der Physik* 267(8), 983-1000, 1887.
- HIGGS, P. W. Broken symmetries, massless particles and gauge fields. *Phys. Lett.* 12, 132, 1964a.
- _____. Broken symmetries and the mass of gauge bosons. *Phys. Rev. Lett.* 13, 508, 1964b.
- _____. Spontaneous breakdown without massless bosons. *Phys. Rev.* 145, 1156, 1966.
- HORTAÇSU, M.; ROTHE, K. D.; SCHROER, B. Generalized two-dimensional QED and functional determinants. *Phys. Rev. D* 20(12), 1979.
- IMPA. *Breve história*. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada, 2018. Disponível em: < <https://impa.br/sobre/historia/> >.
- JACKIW, R.; REBBI, C. Solitons with fermion number 1/2. *Phys. Rev. D* 13(12), 1976.
- JACOB, G. *Entrevista oral com o prof. Gerhard Jacob*. Realizada por Marcia B. M. L. Ariele e Ricardo G. Pinto em 1977, depositada no CPDOC da Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2010.
- _____. *Extrato de entrevista*. Entrevistado: Prof. Dr. Gerhard Jacob. Porto Alegre. Entrevistador: Walker Lins. Salvador, 2017.
- JOHNSON, K. Solution of the equations for the green's functions of a two dimensional relativistic field theory. *Nuovo Cimento* 20, 773, 1961.
- JORDAN, P. The present state of Quantum Electrodynamics. *Physik. Zeitschr.* 30, 700, 1929.
- JORDAN, P.; NEUMANN, J. von; WIGNER, E. On the algebraic generalization of the quantum mechanical formalism. *Annals of Mathematics Princeton* 35, 29, 1934.

- KALBFLEISCH, G. R. et al. Observation of a nonstrange meson of mass 959 MeV. *Phys. Rev. Lett.* **12**, 527, 1964.
- KASTLER, D.; ROBINSON, D. W.; SWIECA, J. A. Conserved currents and associated symmetries; goldstone's theorem. *Commun. Math. Phys.* **2**, 108-120, 1966.
- KLAIBER, B. Analyticity with respect to the coupling constant in certain two-dimensional field theoretic models. *Helvetica Physica Acta* **37**, 554, 1964.
- _____. *Lectures in Theoretical Physics, Boulder Lectures 1967*, p. 141. New York: Gordon and Breach, 1968.
- KLEIN, O. *Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie* [Quantum Theory and Five Dimensional Theory of Relativity]. *Zeitschrift für Physik.* **37** (12): 895, 1926.
- _____. On the Theory of Charged Field in BROWN, L. M.; RECHENBERG, H. The Origin of the Concept of Nuclear Forces. International Institute of Intellectual Cooperation, 77-93, 1939.
- _____. Mésons and nucleons. *Nature* **161**, n. 4101, 897-899, 1948.
- KOBAYASHI, S.; NOMIZU, K. *Foundations of differential geometry*. Vol. I. New York: Wiley Interscience, 1963.
- KÖBERLE, R.; SWIECA, J. A. Factorizable Z(N) Models. *Phys. Lett. B* **86**, 2-5, 1979.
- KÖBERLE, R.; KURAK, V.; SWIECA, J. A. Scattering Theory And 1/N Expansion In The Chiral Gross-Neveu Model. *Phys. Rev. D* **20**, 897-900, 1979.
- KOGUT, J.; SUSSKIND, L. Vacuum polarization and the absence of free quarks in four dimensions. *Phys. Rev. D* **9**, 3501, 1974.
- _____. Hamiltonian formulation of Wilson's lattice gauge theories. *Phys. Rev. D* **11**, 395, 1975.
- KORCYL, P.; KOREN, M. Screening in two-dimensional gauge theories. *Proceedings of Science*, 2012. Disponivel em: <<https://arxiv.org/pdf/1212.0569.pdf>>.
- KRAGH, H. *Quantum generations: a history of physics in the twentieth*. Princeton: Princeton University Press, 1999.
- KRAMERS, H. A. Subtraction of infinities. *Nuovo Cimento* **15**, 108, 1936.
- KUSCH, P.; FOLEY, H. M. Precision Measurement of the Ratio of the Atomic 'g Values' in the $2p_{3/2}$ and $2p_{1/2}$ States of Gallium. *Phys. Rev.* **72**, 1256, 1947.
- LAMB, W. E.; RETHERFORD, R. C. Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method. *Physical Review* **72**, 3, 1947.
- LARMOR, J. *Dynamical theory of the electric and luminiferous medium*. Part. III: *Relations with material media*. Cambridge, 1897. Disponivel em: < <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k559956/f226.table> >.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. Question of parity conservation in weak interactions. *Phys. Rev.* **104**(1), 1956.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. *Theoretical Discussions on Possible High-Energy Neutrino Experiments*. *Physics Review Letters* **4**, 307, 1960a.
- LEE, T. D.; YANG, C. N. *Implications of the Intermediate Boson Basis of the Weak Interactions: Existence of a Quartet of Intermediate Bosons and Their Dual Isotopic Spin Transformation Properties*. *Physical Review* **119**, 14140, 1960b.
- LEUTWYLER, H. Goldstone bosons. *Institut für theoretische Physik der Universität Bern Sidlerstr.*, Suïça, 1994. Disponivel em <<https://cds.cern.ch/record/277818/files/9409422.pdf>>.
- LEVINE, et al. Measurement of the electromagnetic coupling at large momentum transfer. *Phys. Rev. Lett.* **78**, 424, 1997.

- LIBERMAN, B. *Quebra espontânea de simetrias em eletrodinâmica quântica*. Tese de doutorado, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1971.
- LICCIARDI, C. A. P. D. B. *Estudo analítico das probabilidades de oscilação de neutrinos na matéria em três gerações*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2007.
- LIE, S. *Theorie der Transformationsgruppen I*. Leipzig: Teubner, 1888. Escrito com F. Engels Trad. Para o inglês de J. Merker in 2010. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1003.3202>>.
- LOPES, J. L. Nota sobre a energia potencial do dêuteron. *Ann. Acad. Bras. de Ciências*, 17, 273, 1945.
- _____. High energy neutron-proton scattering and the mesons theory of nuclear forces with strong coupling. Tese de Doutorado, Princeton University, 1946.
- _____. On the divergences of quantum electrodynamics. *Ann. Acad. Bras. de Ciências*, 19, 519, 1947.
- _____. The nucleon magnetic moment in meson pair theories. *Physical Review D* 78, 36, 1950.
- _____. A model of the universal Fermi interaction. *Nuclear Physics* 8, 234, 1958.
- _____. *Introdução à eletrodinâmica quântica*. CBPF/CNPq. DH-001-92. Rio de Janeiro, 1960.
- _____. *Lectures on symmetries*. New York: Gordon & Breach, 1969.
- _____. *Entrevista oral com o prof. José Leite Lopes*. Realizada por Tjerk Franken em 1977. Depositada no CPDOC da Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2010.
- _____. *Gauge field theories: an introduction*. Oxford: Pergamon Press, 1981.
- _____. *Richard Feynman e a física no Brasil*. CBPF/CNPq, CS-005-88. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. *A estrutura quântica da matéria*. Rio de Janeiro: Erca, 1992.
- _____. *A estrutura quântica da matéria: do átomo pré-socrático às partículas elementares*. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 1993.
- _____. *Projeto de Organização de uma Escola de Física apresentado à O.N.U. em 1960*. Rio de Janeiro: CBPF, 1995.
- _____. *Formação de físicos nas universidades brasileiras*. Série Ciência e Sociedade. Rio de Janeiro: CBPF, n. 028/97, p.1-9, set. 1997. (Conferência pronunciada no Seminário de Energia Atômica promovido pelo Instituto de Pesquisas Radioativas. Belo Horizonte, 1958.)
- _____. Forty Years of the First Attempt at the Electroweak Unification and of the Prediction of the Weak Neutral Boson Z_0 . *Brazilian Journal of Physics* 29(3), 1999.
- _____. *Uma história da Física no Brasil*. São Paulo: Livraria da Física, 2004.
- _____. in ALVES, G.; CARUSO, F.; SANTORO, A. & MOTTA, H. (orgs.). *O mundo das partículas de hoje e de ontem*. 2ª ed. São Paulo: Livraria da Física, 2012.
- LOPES, J. L.; DUCATY, M. L. G.; SIMÕES, J. A. M. On new possible lepton interactions. *Lettere al Nuovo Cimento* 24(12), 1979.
- LOPES, J. L.; NOVELLO, M. The role of the mass in the theory of fermions. *Revista Mexicana de Física* 18(5), 1969.
- LOPES, J. L.; SILVEIRA, A. Polarização do vácuo e a energia interna na Teoria Quântica de Campos. *Ciência e Cultura* 3, 302, 1951.
- LOPES, J. L.; SIMÕES, J. A. M.; SPHELER, D. Weak interactions physics: from its birth to the electroweak model. *Química Nova* 11(1), 156, 1988. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol11No1_146_v11_n1_%2823%29.pdf>
- LOPES, J. L.; SPHELER, D. The limit of massive electrodynamics and two-component photon field theory. *Lettere al Nuovo Cimento* 25 (4), 1979.

- LOPES, J. L.; TIOMNO, J. On the proton-proton scattering, at 14.5 Mev. *Phys. Rev.* 72, 731, 1947.
- LOPES, J. L.; CARRION, A. V. *Introdução à teoria quântica de campos*. Rio de Janeiro: CBPF, 1964.
- LORENTZ, H.A., La theorie electromagnetic de Maxwell et son application aux corps mouvants. *Arch. Neerl.* 25, 363, 1892.
- _____. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light, *Proc. Roy. Acad. Sc. Amsterdam* 6, 809, 1904.
- LOWENSTEIN, J. H.; SWIECA, J.A. Quantum Electrodynamics in Two Dimensions. *Annals of Physics* 68, 172, 1971.
- LÜDERS, G. Proof of the TCP theorem. *Annals of Physics* 2, 1-15, 1957.
- MARINO, E. C. Jorge Andre Swieca: uma figura ímpar na física brasileira. *Rev. Bras. Ens. Fís.* 37(3), 3602, 2015.
- MARINO, E. C.; SWIECA, J. A. Order, disorder and generalized statistics. *Nucl. Phys. B* 170, 175, 1980.
- MARIS, T. A. J. *Über die statistische Auffassung der Entropie in nicht-stationären Prozessen* [Sobre a interpretação estatística da entropia em processos não-estacionários]. Tese de Doutorado, Universidade de Munique, Alemanha, 1954.
- _____. An electrodynamic approach to the electron-muon mass ratio. *Il Nuovo Cimento* 30, 378-384, 1963.
- _____. Infinite renormalizations in quantum field theories. *Lettere al Nuovo Cimento* 1(15), 1969a.
- _____. Spontaneous breakdown of current conservation in massless quantum electrodynamics. *Lettere al Nuovo Cimento* 2(17), 1969b.
- _____. The renormalization group of relativistic quantum field theory as a set of generalized, spontaneously broken, symmetry transformations. *Revista Brasileira de Física* 6(1), 1976.
- MARIS, T. A. J.; DILLENBURG, D. The fermion propagator of quantum electrodynamics in an arbitrary gauge. *Nuclear Physics B* 18, 390-402, 1970.
- _____. On the electron-muon mass ratio. *Nuclear Physics B* 88, 337-348, 1975.
- MARIS, T. A. J.; DILLENBURG, D.; GONÇALVES DA SILVA, C. E. T.; JACOB, G.; LIBERMAN, B. On a new formulation of quantum electrodynamics. *Il Nuovo Cimento A* 55(3), 1968.
- MARIS, T. A. J.; DILLENBURG, D.; JACOB, G. Renormalization and gauge invariance in quantum electrodynamics. *Nuclear Physics B* 18, 366-89, 1970.
- MARIS, T. A. J.; DILLENBURG, D.; JACOB, G.; LIBERMAN, B. On the Lagrangian of quantum electrodynamics. *Il Nuovo Cimento A* 53(3), 1968.
- _____. Degrees of symmetry in quantum field theories. *Nuclear Physics B* 37, 444-460, 1972.
- MARIS, T. A. J.; DILLENBURG, D.; JACOB, G.; STECH, B. Charge commutator for any momentum. *Nuclear Physics B* 10, 27-34, 1969.
- MARIS, T. A. J.; HERSCOVITZ, V. E.; JACOB, G. Quantum electrodynamics with zero bare fermion mass. *Physical Review Letters* 12, 313-315, 1964a.
- _____. A generalization of the landau gauge. *Il Nuovo Cimento* 33(6): 1633-1638, 1964b.
- _____. Broken symmetries and the electron-muon problem. *Il Nuovo Cimento* 34(4): 946-955, 1964c.
- _____. The length scale in quantum electrodynamics without a bare mass. *Il Nuovo Cimento* 38(2), 783-795, 1965a.
- _____. Broken symmetries and the electron-muon problem - II. *Il Nuovo Cimento* 40(1), 214-224, 1965b.

- _____. Bemerkungen zu spontan gebrochenen Symmetrien. *Z. Physik* 229, 392–402, 1969.
- MARIS, T. A. J.; JACOB, G. Spontaneously broken symmetries and current conservation. *Phys. Rev. Lett.* 17, 1966.
- MARQUES, G. C. (org.). *A física no Brasil na próxima década*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 1990.
- _____. (org.). *IFUSP: passado, presente e futuro*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2005.
- MAXWELL, J. C. On physical lines of force. *Phil. Mag.*, 1861. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786431003659180?journalCode=tphm20>>
- MEISSNER, W.; OCHSENFELD, R. Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften* 21, 787, 1933. Em inglês: A new effect concerning the onset of superconductivity. Trad. A. M. Forrest. *Eur. J. Phys.* 4, 117, 1983.
- MILLER, A. I. Werner Heisenberg and the beginning of nuclear physics. *Physics Today* 38(11), 60, 1985. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.880993>>.
- MILLIKAN, R.A. A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the most Probable Value of that Charge. *Philosophical and Journal of Magazine Science*. 6th Series, 1910.
- _____. The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Law. *Phys. Rev.* 32, 349, 1911.
- MILLS, R. L.; YANG, C. N. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance. *Phys. Rev.* 96(1), 191-195, 1954.
- MOTOYAMA, S. A gênese do CNPq. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência* 2, 1985.
- _____. (org.). *50 anos do CNPq: contados pelos seus presidentes*. São Paulo: FAPESP, 2002.
- MOTOYAMA, S.; GARCIA, J. C. (orgs.). *O Almirante e o novo prometeu*. Cap. 4. Álvaro Alberto e a Energia Nuclear, p. 80, 1996.
- NAKANISHI, N. Operator solutions in terms of asymptotic fields in the Thirring and Schwinger Models. *Prog. Theor. Phys.* 57, 1025, 1977.
- NAMBU, Y. Axial vector current conservation in weak interactions. *Phys. Rev.* 4(7), 380-382, 1960.
- _____. Strings, monopoles, and gauge fields. *Phys. Rev. D* 10, 4262, 1974.
- NAMBU, Y.; JONA-LASINIO, G. Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. I. *Phys. Rev.* 122(1), 345-358, 1961a.
- _____. Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. II. *Phys. Rev.* 124(1), 246-254, 1961b.
- NAS. *The Shelter Island Conference of 1947*. National Academy of Science, 2005. Disponível em <<http://www.nas.edu/history/sic/>>.
- NEDDERMEYER, S. H.; ANDERSON, C. D. "Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles". *Physical Review*. 51 (10): 884–886, (1937). < doi:10.1103/PhysRev.51.884 >.
- NEWTON, I. *Philosophiae naturalis principia mathematica*. 1687. Trad. de Andrew Motte. New York: Daniel Adee, 1846. Disponível em: < <https://archive.org/details/newtonspmathema00newtrich/page/n7> >.
- NIELSEN, H.; P. OLESEN, P. Vortex-line models for dual strings. *Nuclear Phys. B* 61, 45, 1973.
- NOETHER, E. Invariant variation problems. *Nachr. d. König Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, Math-phys.*, 235-257, 1918. Em inglês: Problems of invariant variation. Trad. M. A. Tavel. *Transport Theory and Statistical Physics* 1(3), 183-207, 1971.

- NUSSENZVEIG, H. M. Entrevista com o Prof. Herch Moysés Nussenzveig. Realizada por Alzira Alves de Abreu, Gilberto Velho e Luiz Davidovich. *Ciência e Cultura* 60, 2008. Disponível em: <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v60nspe1/a1360ns1.pdf>>
- _____. *Integrais de trajetória*. In: I Escola de Verão J. A. Swieca, Seção de Partículas e Campos, 1981. São Paulo, Sociedade Brasileira de Física/CNPq.
- _____. *J. A. Swieca: reminiscência*. 2007. Disponível em: <https://social.stoa.usp.br/articles/0016/4046/reminiscencias_moyses.pdf>.
- OKUN, L. *Weak interactions of elementary particles*. Oxford: Pergamon Press, 1965.
- ONNES, H. K. The resistance of pure mercury at helium temperatures. *Univ. Leiden. Commun. Phys.* 12, 1911.
- OPPENHEIMER, J. R. Note on the theory of the interaction of field and matter. *Phys. Rev.* 35, 461, 1930a.
- _____. On the theory of electrons and protons. *Phys. Rev.* 35, 562-563, 1930b.
- PATY, M. *La physique du XXe siècle*. France: EDP Sciences, 2003.
- PATY, M. *Lembranças do professor José Leite Lopes mestre, colega e amigo. Homenagem à sua memória na ocasião do 100º aniversário do seu nascimento*. CBPF, Ciência e Sociedade, v. 6, número especial, p. 26-34, 2019.
- PAULI, W. Über den Einfluß der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse auf den Zeemaneffekt. *Zeitschrift für Physik* 31, 373-385, 1925. (Sobre a influência da dependência da velocidade da massa de elétrons no efeito Zeeman).
- _____. *Carta aos pesquisadores Lise Meitner, Otto Hahn, Debye e colegas*. 1930. Disponível em: <<https://icecube.wisc.edu/info/neutrinos/1931.php>>.
- _____. The connection between spin and statistics. *Phys. Rev.* 58, 716-722, 1940.
- _____. Exclusion principle and quantum mechanics. Nobel Lecture, 1946. (Palestra dada em 13/12/1946 ao receber o Prêmio Nobel de física de 1945). Disponível em: < https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1945/pauli-lecture.html >.
- PENROSE, R. & ISHAM, C. J. *Quantum concept and space and time*. New York: Oxford University Press, 1986.
- PESSOA JR., O. *Conceitos de física quântica, vol. 1*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
- _____. *Conceitos de física quântica, vol. 2*. São Paulo: Livraria da Física, 2006.
- PEVSNER, A.; KRAEMER, R.; NUSSBAUM, M. et al. Evidence for a three-pion resonance near 550 Mev. *Phys. Rev. Lett.* 7(11), 1961.
- PERL, M. L. An Experimental Summary of the XIII Rencontre de Moriond. Stanford Linear Accelerator Center, SLAC-PUB-2132, 1978.
- PISANO, F.; PLEITEZ, V. SU(3) \otimes U(1) model for electroweak interactions. *Phys. Rev.* 46(1), 410-417, 1992.
- PLANCK, M. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Annalen der Physik.* 4, 553, 1901. (Em inglês: On the law of distribution of energy in the normal spectrum).
- POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo* 21, 129-176, 1906.
- POLYAKOV, A. M. Non-Hamiltonian approach to conformal quantum field theory. *Sov. Phys. JETP* 39, 1, 1974.

- RANUM, A. The group-membership of singular matrices. *American Journal of Mathematics* 31(1), 1909.
- REZENDE, S. M. (org.). *Física no Brasil*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 1987.
- ROBISON, D.; PEACOCK, N. J.; FORREST, M. J.; WILCOCK, P. D.; SANNIKOV, V. V. Measurement of the electron temperature by Thomson scattering in Tokamak T3. *Nature* 224, 488–490, 1969.
- ROCHESTER, G. D.; BUTLER, C. C. Evidence for the existence of new unstable elementary particles. *Nature* 160, 855-857, 1947.
- ROTHER, H. J.; ROTHER, K. D.; SWIECA, J. A. Screening versus confinement. *Phys. Rev. D* 19, 3020, 1979.
- ROTHER, K. D.; SWIECA, J. A. Fractional winding numbers and the U(1) problem. *Nuclear Physics B* 168, 454-464, 1980.
- SALAM, A.; WARD, J. On a gauge theory of elementary interactions. *Il Nuovo Cimento* 19(1), 165-170, 1961.
- _____. Electromagnetic and weak interactions. *Phys. Lett.* 13(2), 168-171, 1964.
- SAKURAI, J. J. *Invariance principles and elementary particles*. Princeton: Princeton University Press, 1964.
- SANTANA, W. A. L. & FREIRE JR, O. Contribuição do físico brasileiro Sergio Porto para as aplicações do laser e sua introdução no Brasil. *Rev. Bras. Ensino de Fís.* 32(3),1-10, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172010000300015>.
- SANTOS, C. A. A efêmera e produtiva existência do Centro de Pesquisas Físicas da URGs. *Rev. Bras. Ensino Fís.* 39(2), e2601, 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v39n2/1806-1117-rbef-39-02-e2601.pdf>>.
- SAVIGNANO, V. *20º aniversário da criação do Instituto de Física de São Carlos e seis décadas participando da história da pesquisa em Materiais no Brasil*. SBPMat, 2014.
- SERBER, R. A note on positron theory and proper energies. *Phys. Rev.* Vol. 49, 545-550, 1936.
- SCHERER, C. *Radiação gama e testes de simetria*. Dissertação de Mestrado em Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1968.
- SCHÖNBERG, M. On Quantum Theory of the Point Electron. I. *Phys. Rev.* 74, 738-747, 1948a.
- _____. Elimination of divergences in the Meson Theory. I. *Phys. Rev.* 74, 748-760, 1948b.
- SCHRÖDINGER, E. *Annalen der Physik* 80, 437, 1926. Em inglês: An undulatory theory of mechanics of atoms and molecules. *Physical Review* 28(6), 1049-70, 1926.
- _____. Discussion of probability relations between separated systems. *Proc. Camb. Phil. Soc.* 31, 555, 1935.
- SCHROER, B. *Um passado rico na física brasileira: reminiscências sobre Jorge André Swieca*. Rio de Janeiro: CBPF, e Institut für Theoretische Physik der FU Berlin, 2007.
- _____. *Jorge A. Swieca's contributions to quantum field theory in the 60s and 70s and their relevance in present research*. Rio de Janeiro: CBPF, 2009.
- _____. *Rudolf Haag's legacy of local quantum physics and reminiscences about a cherished teacher and friend*. Cornell University Library, 2016. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1612.00003>>.
- SCHWINGER, J. On quantum-electrodynamics and the magnetic moment of the electron. *Phys. Rev.* 73, 416, 1948a.

- _____. Quantum electrodynamics. I. A Covariant Formulation. *Phys. Rev.* 74, 1439, 1948b.
- _____. Quantum Electrodynamics. II. Vacuum Polarization and Self-Energy. *Phys. Rev.* 75, 651, 1949a.
- _____. Quantum Electrodynamics. III. The Electromagnetic Properties of the Electron - Radiative Corrections to Scattering "III. *Phys. Rev.* 76, 790, 1949b.
- _____. On the Green's functions of quantized fields. I. *Proc. N. A. S.* 37, 452, 1951a.
- _____. On the Green's functions of quantized fields. II. *Proc. N. A. S.* 37, 455, 1951b.
- _____. A theory of the fundamental interactions. *Annals of Physics* 2, 407-434, 1957.
- _____. Field theory commutators. *Phys. Rev. Lett.* 3, 296, 1959.
- _____. Gauge invariance and mass. *Phys. Rev.* 125(1), 397, 1962a.
- _____. Gauge invariance and mass. II. *Phys. Rev.* 128(5), 2425, 1962b.
- _____. The one dimensional model in gauge theories of vector particles. Theoretical physics Trieste Lectures. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1963, p. 89.
- _____. The greening of quantum field theory. Cornell University, 1993. Disponível em: < <https://arxiv.org/abs/hep-ph/9310283v1> >.
- SERBER, R. A note on positron theory and proper energies. *Phys. Rev.* 49, 545-550, 1936.
- SILVA, C. C. A ciência em foco: a revista Ciência Popular e a divulgação científica no Brasil (1948-1956). In: IV Congresso Brasileiro de História da Educação: A educação e seus sujeitos na história. Goiânia: Ed. da UCG, 2006. Disponível em: <<http://www.sbhe.org.br/novo/congressos/cbhe4/coordenadas/eixo03/Coordenada%20por%20Claudia%20Alves/Catarina%20Capella%20Silva%20%20-%20Texto.pdf>>.
- SKIDMORE, T. *Brasil: de Getúlio Vargas a Castelo Branco, 1930-1964*. Trad. Ismênia Tunes Dantas. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2000.
- SOMMERFELD, A. Zur Quantentheorie der Spektrallinien. *Annalen der Physik* 51, 1, 1916. (On the Quantum Theory of Spectral Lines).
- STEENROD, N. *The topology of fibre bundles*. Princeton: Princeton University Press, 1951.
- SWIECA, J. A. Field propagators singular at zero coupling. *Nuclear Physics* 35, 686 -693, 1962.
- _____. *A. Método Tamm-Dancoff e sua aplicação a modelos solúveis da teoria dos campos*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1963.
- _____. Broken-symmetry condition for Fermion field. *Il Nuovo Cimento* 52 A, 242, 1968.
- _____. Goldstone's theorem and related topics. In: Kastler, D. (org.), *Cargèse Lectures in Physics*, New York: Gordon and Breach, pp. 215–233, 1970.
- _____. Charge screening and mass spectrum. *Phys. Rev. D* 13, 312, 1976.
- _____. Solitons and confinement. *Fortschr. Phys.* 25, 303, 1977.
- _____. *Obras coligadas*. Projeto Galileo Galilei. Brasília: CNPq, 1981.
- SWIECA, J. A.; VÖLKEL, A. H. Remarks on conformal invariance. *Commun. Math. Phys.* 29, 319-342, 1973.
- TAKASHI, Y. On the Generalized Ward Identity. *Il Nuovo Cimento.* 6(2): 371, 1957.
- TAMM, I. Y. Relativistic Interaction of Elementary Particles. *J. Phys. USSR* 9, 449-460, 1945.
- THOMSON, J. J. "Cathode Rays". *Philosophical Magazine.* 44, 269, 1897.
- < doi:10.1080/14786449708621070 >.

- THIRRING, W. E. A soluble relativistic field theory. *Ann. Phys. (N.Y.)* 3, 91, 1958.
- THIRRING, W. E.; WESS, J. E. Solution of a field theoretical model in one space-one time dimension. *Ann. Phys. (N.Y.)* 27, 331, 1964.
- 't HOOFT, G. Renormalization of massless Yang-Mills fields. *Nuclear Physics B* 35, 173-199, 1971a.
- _____. Renormalization lagrangians for massive Yang-Mills fields. *Nuclear Physics B* 35, 167-188, 1971b.
- TOMONAGA, S. On a relativistically invariant formulation of the quantum theory of wave fields. *Progress of Theoretical Physics* 1(2), 27, 1946. Versão original em japonês: *Rikon-Iho* 22, 545, 1943.
- UTIYAMA, R. Invariant theoretical interpretation of interaction. *Phys. Rev.* 101, 1597-1607, 1956.
- UFMG. *Criação do Instituto de Pesquisas Radioativas*. (Ata da 321ª sessão da Congregação da Escola de Engenharia da Universidade de Minas Gerais). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1952. Disponível em:
< <http://www.repositorio.cdn.br:8080/handle/123456789/56> >.
- UFSCar. *Programa de Pós-Graduação em Física*. Universidade Federal de São Carlos, 2018. Disponível em:
< <http://www.ppgf.ufscar.br/pt-br/programa/historico> >.
- UNESP. *Instituto de Física Teórica: pioneirismo*. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2018. Disponível em:
< <https://www2.unesp.br/portal#!/unesp-40-anos/faculdades-e-institutos/sao-paulo---ift> >.
- VARGAS, J. I. *Entrevista oral com José Israel Vargas*. Realizada por Nadja Volia, Ricardo Guedes Pinto e Simon Schwartzman, em 1977, depositada no CPDOC da Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, 1977.
- VIDEIRA, A. L. L. *A obra de Jorge André Swieca e seu papel na física brasileira*. CBPF-CS-005/85, 1985.
- VON NEUMANN, J. *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton: Princeton University Press, 1955. Trad. de *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer, 1932.
- WEINBERG, S. High energy behavior in quantum field theory. *Phys. Rev.* 118, 838, 1960.
- _____. A model of lepton. *Phys. Rev.* 19, 1967.
- _____. Electromagnetic and weak masses. *Phys. Rev. Lett.* 29, 388, 1972.
- _____. The U(1) problem. *Phys. Rev. D* 11, 1975.
- _____. *Conceptual foundations of the unified theory of weak and electromagnetic interactions*. Nobel Lecture, 1979.
- WEISSKOPF, V. F. On the self-energy and the electromagnetic field of the electron. *Physical Review* 56, 72, 1939.
- WEYL, H. Gravitation und elektrizität. *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin* 26, 465-480, 1918. (Em inglês: Gravity and electricity).
- _____. *Space-time-matter*. Trad. H.L. Brose. New York: Dutton, 1921. Original alemão: 1918.
- _____. *The theory of groups and quantum mechanics*. New York: Dover, 1931. Trad H. P. Robertson do original em alemão: *Gruppentheorie und Quantenmechanik*, 1928.
- _____. *The classical groups, their invariants and representations*. Princeton: Princeton University Press, 1928.

- WIGNER, E. P. Über die operation der Zeitumkehr in der Quantenmechanik, *Nachrichten Akademie der Wissenschaften in Göttingen Mathematisch-Physikalische Klasse*, 546-559, 1932. (Em inglês: The operation of time-reversal in quantum mechanics).
- _____. On the Quantum Correction For Thermodynamic Equilibrium. *Phys. Rev.* 40, 749, 1932.
- _____. On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group. *Ann. Math.* 40, 149-204, 1939.
- _____. Symmetries and reflections: Scientific Essays by Eugene P. Wigner. Indiana University Press, Bloomington & London, 1967.
- WILSON, K. G. Renormalization Group and Critical Phenomena. I. Renormalization Group and the Kadanoff Scaling Picture. *Phys. Rev. B*4, 3174, 1971.
- _____. Confinement of quarks. *Phys. Rev. D* 10, 2445, 1974.
- _____. The renormalization group: critical phenomena and the Kondo problem. *Rev. Mod. Phys.* 47, 4, 1975.
- WRESZINSKI, W. F. *Escola Swieca: Swieca e o Debate Científico*. São Paulo: IFUSP, 2006.
- _____. *J. A. Swieca faria 80 anos*. São Paulo: IFUSP. 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v38n3/1806-1117-rbef-38-03-e3601.pdf>>
- WU, C. S.; AMBLER, E.; HAYWARD, R. W.; HOPPES, D.D.; HUDSON, R. P. Experimental test of parity conservation in beta decay. *Phys. Rev.* 105, 1413, 1957.
- WU, T. T.; YANG, C. N. Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields. *Physical Review* 12, 1975.
- YUKAWA, H. On the Interaction of Elementary Particles.I. [Translated from Japanese]. IProceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan 3, 48, 1935.
- ZWEIG, G. An SU3 model for strong interaction symmetry and its breaking. *CERN Report 8419/TH.* 401, 1964.

ANEXOS

A1 – ORIENTAÇÕES DE JOSÉ LEITE LOPES

ORIENTAÇÕES MESTRADO

1 - M. Novello. *Teoria de Distribuições no Eletromagnetismo Clássico*. 1968. Dissertação (Mestrado em Física) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Orientador: José Leite Lopes.

2 - S. Joffily. *Polos da Matriz S para potenciais complexos*. 1969. Dissertação (Mestrado em Física) - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Orientador: José Leite Lopes.

3 - N. Rohr da Silva. *Estrutura Eletrônica das Bases do DNA: o Efeito Túnel e Mutações*. 1969. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de Brasília. Orientador: José Leite Lopes.

4 - J. D. M. Vianna. *Álgebra de Convolução Aplicada à Mecânica Quântica*. 1969. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de Brasília. Orientador: José Leite Lopes.

5 - J. Simons. *Conservation Laws in General Relativity*. 1977. Dissertação (Mestrado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

6 - D. Spheler. *Sur la Théorie des Champs à Spin 1 et 3/2*. 1979. Dissertação (Mestrado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

ORIENTAÇÕES DOUTORADO

1 - B. Fernandes. *Sur les Représentations du Group de Poincaré et les Masses Imaginaires*. 1974. Tese (Doutorado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

2 - A. Bilodeau. *Sur la Création de Particules dans un Modèle Rectiligne de la Métrique de Kerr*. 1977. Tese (Doutorado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

3 - J. L. Jacquot. *Violation CP par des Bosons Neutres de Higgs*. 1979. Tese (Doutorado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

4 - Ch Ragiadakos. *Les Leptons Lourds*. 1979. Tese (Doutorado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

5 - D. Spheler. *Propriétés de Possibles Leptons à Spin 3/2*. 1981. Tese (Doutorado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

6 - J. A. Martins Simoes. *Sur la Possibilité d'une Structure pour les Leptons et les Quarks*. 1981. Tese (Doutorado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

7 - N. Fleury. *Les Interactions Electrofaibles et les Possibles Leptons à Spin 3/2*. 1983. Tese (Doutorado em Física) - Université de Strasbourg I. Orientador: José Leite Lopes.

A2 – ORIENTAÇÕES DE THEODOR AUGUSTO MARIS

ORIENTAÇÕES DE MESTRADO

1 - César Augusto Zen Vasconcellos. *Informação nuclear através de espalhamento quase livre com partículas polarizadas*. 31/07/1978. Dissertação (Mestrado em Física). UFRGS. Orientação: Theodor August Johannes Maris e Maria Ribeiro Teodoro.

2 - Dionísio Bazeia Filho. *Depolarização de elétrons relativísticos no campo coulombiano nuclear*. 12/01/1979. Dissertação (Mestrado em Física). Orientação: Victoria Elnecave Herscovitz e Theodor August Johannes Maris.

3 - Eliane Ângela Veit. *Estudo comparativo de reações quase-livres ($p, 2p$) e (p, pn)*. 06/02/1979. Dissertação (Mestrado em Física). UFRGS. Orientação: Theodor August Johannes Maris e Maria Ribeiro Teodoro.

4 - Maria Helena Steffani. *Localização das interações em espalhamento nuclear a energias médias*. 23/05/1979. Dissertação (Mestrado em Física). UFRGS. Orientação: Victoria Elnecave Herscovitz e Theodor August Johannes Maris.

ORIENTAÇÕES DE DOUTORADO

1 - Gerhard Jacob. *Espalhamento quase-livre e estrutura nuclear*. 1964. Tese (Doutorado em Física). UFRGS. Orientação: Theodor August Johannes Maris.

2 - Victoria Elnecave Herscovitz. *Estados-furo de vida curta em espalhamento nuclear quase-livre*. 12/12/1969. Tese (Doutorado em Física). UFRGS. Orientação: Theodor August Johannes Maris.

3- Claudio Scherer. *Correlação angular gama-gama com perturbação aleatória*. 25/06/1971. Tese (Doutorado em Física). Orientação: Theodor August Johannes Maris; Darcy Dillenburg.

4 - Bernardo Liberman. *Quebra espontânea de simetrias em eletrodinâmica quântica*. 11/08/1971. Tese (Doutorado em Física). UFRGS. Orientação: Theodor A. J. Maris.

5 - Maria Ribeiro Teodoro. *Um modelo de espalhamento quase-livre com prótons polarizados*. 04/11/1976. Tese (Doutorado em Física). UFRGS. Orientação: Theodor August Johannes Maris e Gerhard Jacob.

6 - Claudio Schneider. *Efeitos de distorção em espalhamento quase-livre com prótons polarizados*. 19/12/1978. Tese (Doutorado em Física). UFRGS. Orientação: Theodor A. J. Maris e Gerhard Jacob.

A3 – ORIENTAÇÕES DE JORGE ANDRÉ SWIECA

ORIENTAÇÕES MESTRADO

1 - Sueli Maria Marino. *Comportamento assintótico de comutadores em teorias não relativísticas*. 1968. Dissertação (Mestrado em Física). USP. Orientação: Jorge A. Swieca.

2 - Marcelo Otávio Caminha Gomes. *Equações de Ondas Relativísticas*. 1969. USP. Orientação: Jorge A. Swieca.

3 - Josif Frenkel. *Limite de Bjorken e comutadores a tempos iguais*. 1970. Dissertação (Mestrado em Física). USP. Orientação: Jorge A. Swieca.

4 - Gil da Costa Marques. *Teoria de campos com métrica indefinida* (Contribuição a teoria quântica de campos com massas complexas). 1972. Dissertação (Mestrado em Física). USP. Orientação: Jorge A. Swieca.

5 - Valério Kurak. *Transformações conforme na teoria quântica de campos*. 1975. Dissertação (Mestrado em Física). PUC, Rio de Janeiro. Orientação: Jorge A. Swieca.

6 - Eduardo Cantera Marino. *Carga topológica fracionária e infinitude da ação*. 1978. Dissertação (Mestrado em Física). PUC, Rio de Janeiro. Orientação: Jorge A. Swieca.

7 - Luiz Victorio Belvedere. *Um estudo sobre a eletrodinâmica quântica em duas dimensões*. 1978. Dissertação (Mestrado em Física). PUC, Rio de Janeiro. Orientação: Jorge A. Swieca.

ORIENTAÇÕES DOUTORADO

1 - Klaus Stefan Tausk. *A medida na mecânica quântica*. 1967. Tese (Doutorado em Física). USP. Orientação: Jorge A. Swieca.

2 - Henrique Fleming. *Quebra Espontânea de Simetria*. 1969. Tese (Doutorado em Física). USP. Orientação: Jorge A. Swieca.

3 - Valério Kurak. *Matrizes-S exatas de alguns modelos da teoria quântica de campos*. 1979. Tese (Doutorado em Física). 1979. PUC, Rio de Janeiro. Orientação: Jorge A. Swieca.

4 - Eduardo Cantera Marino. *Formulação integral funcional para teorias de campo com estatística generalizada e quebra espontânea de simetria*. 1980. Tese (Doutorado em Física). PUC, Rio de Janeiro. Orientação: Jorge A. Swieca.

A4 – ENTREVISTA COM J.M.F. BASSALO

Entrevistado: Prof. Dr. JOSÉ MARIA FILARDO BASSALO

Entrevistador: Walker Lins

Residência atual do entrevistado: Belém - PA, Brasil.

Dias dos diálogos: de 19 a 31 de agosto 2017.

Meio: *e-mail* e telefonemas.

Em entrevista realizada sobre a temática desta tese, o Prof. Dr. José M. F. Bassalo, aposentado como professor titular do departamento de física da UFPA, assim se reporta:

“Prezado Walker,

[...] informo-lhe que em eletrodinâmica quântica apenas lecionei a disciplina no curso de graduação em física da UFPA e das notas de aula desse Curso de Graduação, em dois semestres, resultaram nos livros: *Eletrodinâmica Clássica* [Livraria da Física, 2007 (primeira e segunda edições)] e *Eletrodinâmica Quântica* (Livraria da Física, 2006).

Entre os meus alunos destaco o professor Marcelo Otavio Caminha Gomes, USP, que foi meu aluno no CEPC (em Belém) e colega na Universidade de Brasília, orientando de Swieca e se especializou em Teoria Quântica de Campos.

Quanto ao livro LEITE LOPES, J. *Introdução a eletrodinâmica quântica*. CBPF/CNPq. DH-001-92. Rio de Janeiro, 1992, informo-lhe que a importância desse livro (primeiro como Notas de Aulas do CBPF) decorre do fato de que ele abriu as portas para os físicos brasileiros (Marcelo Gomes, Henrique Fleming, certamente o saudoso Swieca, Luciano Videira e outros) estudarem a QED. Eu mesmo estudei esse livro (editado pela Trillas, 1977) para escrever as Notas de Aulas do Curso que dei na UFPA (hoje transformado em livro) sobre a Eletrodinâmica Quântica.

Conversaremos mais na próxima quarta-feira.

Gostei muito de nossa conversa e que me deu a convicção de ser você um divulgador da Física Brasileira. Parabéns e continue com esse belo trabalho. Veja se você consegue obter a minha resenha (sobre o livro do Leite Lopes) e dela, prepare um texto sobre a minha pequena participação nessa sua Tese de Doutorado. Ele poderá ser completado por intermédio da troca de e-mails ou mesmo de telefonemas.

Veja a referência do livro usado pelo saudoso Swieca em seu Curso na USP sobre Mecânica Quântica, em 1968: A. S. Davydov, *Quantum Mechanics*, Pergamon Press, 1965.

Abraço do sempre amigo,
Bassalo”

FIM DA ENTREVISTA

A5 – ENTREVISTA COM G. JACOB

Entrevistado: Prof. Dr. Gerhard Jacob

Entrevistador: Walker Lins

Residência atual do entrevistado: Porto Alegre - RS, Brasil.

Dias dos diálogos: de 07 a 25 de agosto de 2017.

Meio: *e-mail*.

Em entrevista realizada sobre a temática desta tese, o Prof. Dr. Jacob Gerhard, aposentado como professor titular da UFRGS, na qual foi reitor no período 1988-1990, assim se reporta:

“Prezado Walker,

Não entendo muito bem a ideia de abordar a história da QED no Brasil, separando-a do restante da Física de altas energias, pois não creio que seja simples fazer essa separação dentro da Física Teórica. Em todo o caso, vou tentar atender a teu pedido, na ordem de teu e-mail.

Partindo da hipótese de que as massas de elétron e múon são de origem puramente eletromagnética, essas partículas têm massa nula na ausência de interação eletromagnética; “ligando” a interação eletromagnética, deverá ser possível calcular a relação de massas entre elétron e muon (não existe unidade de massa). Esse é o problema que Maris colocou e que deu origem aos trabalhos na área. O problema em si está em aberto até hoje, assim como não é claro se a hipótese inicial é correta (mas é muito plausível).

Li teu trabalho sobre laser¹²⁷. Como convivi com a história de Sergio Porto e UNICAMP, apreciei-o. Aí se pode escrever a história, pois há um começo bem definido, formaram-se grupos de pesquisa, tanto na UNICAMP como aqui.

Deves saber que estou há quase 40 anos fora do Instituto de Física e da Física, em administração científico-acadêmica. Perguntei se há alguém no Instituto ainda trabalhando em EDQ, ou que esteja familiarizado com os detalhes dos trabalhos de Maris sobre razões entre massas dos férmions, com o seguinte resultado: dos trabalhos de Maris participaram principalmente os coautores, entre eles Bernardo Liberman (aposentado) que fez sua Tese de doutorado em EDQ sob orientação de Maris em 1971; e, em 2000, Bardo Bodmann (atualmente professor do departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS) que publicou com Maris um trabalho relacionado. Afora estes, não creio que outros professores do IFUFRGS estejam a par da história do tema das massas em EDQ.

Em assuntos ligados à EDQ, houve e há gente com publicações no Instituto de Física da UFRGS, como Horacio Girotti (aposentado), Dimiter Hadjimichef e Magno Machado.

127 Referindo-se a *Contribuição do físico Brasileiro Sergio Porto para as aplicações do laser e sua introdução no Brasil* disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172010000300015> >.

Na área de partículas, alta energia, há um grupo forte liderado por Maria Beatriz Gay Ducati; alguns trabalhos estão relacionados com a área geral de Teoria Quântica de Campos. Creio que mais informações sobre alguma atividade em EDQ no IFUFRGS possam obter com ela. Os endereços de e-mail das pessoas mencionadas que ainda estejam ativas no IFUFRGS podem encontrar no *site* do Instituto de Física.

Não tive acesso ao artigo do WRESZINSKI que menciona [referindo-se a WRESZINSKI, 2006], mas encontrei outro, dele, 80 anos de Swieca, mas nesse não se menciona a discussão (ou as discussões) com Maris. Honestamente, como conheci Swieca relativamente bem, ponho em dúvida que tenha sido tão radical, acho que eventuais discordâncias (não como “adversários”, sic), não foram tão sérias assim. Que uma cordialidade/amizade existiu, isso sim. Mas também, acho que é irrelevante para a história da EDQ.

Artigos de Maris deve haver na Biblioteca da Física aí, que se constituem essencialmente no que se fez aqui em QED.

Além disso, podem verificar que minha contribuição em EDQ é marginal. Não orientei estudantes na área e colaborei em dois ou três artigos, nada mais do que isso (minha área foi Física Nuclear Teórica).

Como se trata de pesquisa básica, fundamental, não vejo aplicações práticas dos resultados, certamente não proximamente. Quando falo em pesquisa fundamental, é preciso ter em conta a natureza do problema (repito) que Maris colocou, e que deu origem aos trabalhos na área. O problema em si está aberto até hoje.

Minha experiência no Niels Bohr Institute durante o ano em que lá estive (1961/62) foi excelente: mantive contato com físicos de todo o mundo que lá estiveram nesse período, orientei um estudante de doutorado sueco, publiquei com um físico de expressão na época, e ouvi seminários dos físicos mais em evidência. Inclusive troquei algumas palavras com o próprio Niels Bohr.

É impossível falar sobre meus contatos com colegas pelo Brasil afora, pois foram inúmeros, incontáveis, pois meu relacionamento com todos sempre foi excelente, não lembro de ter tido alguma briga, ou mesmo discussão mais áspera, com qualquer de meus colegas; a grande maioria sempre foi de amigos.

O contato de Maris com Swieca foi ocasional, não creio que tenha havido uma discussão mais profunda entre ambos [ainda referindo-se a WRESZINSKI, 2006]; se assim não fosse, Maris teria feito um agradecimento em um de seus trabalhos (ele era muito cioso em ser absolutamente correto em referências e créditos a discussões em seus trabalhos).

Grande Abraço e boa sorte,
Gerhard”.

FIM DA ENTREVISTA

A6 – ENTREVISTA COM C.A.A. DE CARVALHO FILHO

Entrevistado: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO ARAGÃO DE CARVALHO FILHO

Entrevistador: Walker Lins

Residência atual do entrevistado: Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

Dia do diálogo: 03 de outubro de 2018.

Meio: oral, por telefonema.

Em entrevista realizada sobre a temática desta tese, o físico Prof. Dr. Carlos Alberto Aragão de Carvalho Filho, que foi Diretor de Desenvolvimento Científico-Tecnológico da FINEP (2005 - 2007), Presidente do CNPq (2010 - 2011), Professor Titular do Instituto de Física da UFRJ, aposentado no ano de 2016, sendo atualmente (2018) Consultor Técnico da Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade da Marinha do Brasil, declarou:

“Caro Walker,

O que me motivou a escolher, nos idos da década de 1970, a Teoria Quântica de Campos (TQC) como área de pesquisa (na PUC, de 1982 a 1993, e na UFRJ, de 1994 a 2016) foi o fato de ter sido, a partir de 1974, aluno de Jorge André Swieca, um grande especialista no tema, reconhecido internacionalmente.

Eu o tive como Professor de Mecânica Quântica III (MQ III), disciplina obrigatória do curso de mestrado em física da PUC/RJ. Swieca lecionava a partir de notas pessoais, que pouco consultava durante as aulas. Eu registrei essas aulas em um caderno, que guardei por um bom tempo e consultava com frequência, mas que infelizmente se perdeu.

Tive meu primeiro contato direto com a TQC ainda no mestrado da PUC, em curso também ministrado por Swieca, que seguia o roteiro do livro do Mandl¹²⁸, apresentando a TQC desde primeiros princípios (elétrons, fótons, campo eletromagnético etc.) até cálculos perturbativos da Eletrodinâmica Quântica (EDQ).

Swieca era um professor com ótima didática. Graças as suas aulas, tinha-se acesso a TQC em abordagem original, que exibia um formalismo abrangente, aplicável a vários outros campos da física (mecânica estatística, física da matéria condensada etc.). Essa abrangência ficou ainda mais caracterizada com a evolução das teorias de campos em presença de temperatura e densidade finitas (teoria quântica estatística de campos) e de suas respectivas aplicações.

Swieca viajou para os Estados Unidos, para um período sabático, em 1975. Eu o reencontrei em 1976, quando trabalhava em minha tese de mestrado na PUC/RJ, cujo título era *Fenômenos Tricríticos na Mistura He³-He⁴*, sob a orientação de Samuel

128 Referindo-se ao livro *Introduction to quantum field theory*. F. MANDL, Interscience, New York-London, 1959.

MacDowell¹²⁹. Samuel acabara de sofrer grave acidente de carro e teve que retornar aos Estados Unidos. Com isso, o problema de pesquisa da minha tese ficou pendente, aguardando uma solução.

Procurei Swieca e relatei o problema, que consistia em calcular gráficos de Feynman até a ordem de dois *loops*, cálculo bastante trabalhoso. Ele, com boa vontade, interesse e presteza (apenas um dia) apresentou uma alternativa que utilizava o teorema ótico para reduzir o problema a um simples cálculo de espaço de fases.

Era uma solução criativa e que simplificava bastante os cálculos. Fiquei sabendo, mais tarde, que a técnica sugerida por Swieca era usada para reduzir cálculos em ordens mais altas de teoria de perturbação a expressões em ordens inferiores. Até hoje não sei se ele já sabia disso ou se deu-se conta pensando no problema de um dia para o outro.

Em 1979, quando já fazia o doutorado em física na Princeton University, com a tese intitulada *Instantons and Fermion Densities*, sob a orientação de Curtis G. Callan Jr.¹³⁰, fui à Escola de Verão em Cargèse¹³¹. Lá estive pela última vez com Swieca. Na Escola, o conceituado físico Jürg Fröhlich¹³², em sua palestra, citou-o como um dos precursores do *Mecanismo de Higgs*, fruto do amplo conhecimento que Swieca adquirira sobre quebra espontânea de simetrias, entre outros tópicos.

Soube do falecimento de Swieca ainda no exterior, em 1980, por carta de meu amigo e colega de turma Paulo Murilo de Castro Oliveira. Foi um grande choque naquele momento, eu percebi que desaparecia um dos melhores físicos do País, criativo, original e com profundo conhecimento.

Como você citou o artigo de Walter Wreszinski¹³³, que também fala da atuação de Swieca enquanto físico e seus debates com T. Maris, posso afirmar que Swieca aliava

129 Referindo-se ao físico brasileiro Samuel Wallace MacDowell, especializado em física de partículas, que nasceu em 1929, na cidade de São Lourenço, Pernambuco, radicado e atuante nos EUA; *fellow* da Sociedade Americana de Física, membro da Academia de Ciências de Nova York e da Academia Brasileira de Ciências.

130 Referindo-se ao físico teórico estadunidense Curtis Gove Callan Jr. (1942 -) especializado em Física de Partículas Elementares, TQC e outras áreas, tendo entre as suas pesquisas de maior divulgação a que trata da invariância de escala (equação de Callan-Symanzik) publicada em C. G. Callan, Jr., *Broken Scale Invariance in Scalar Field Theory*. *Phys. Rev. D* **2**, 1541–1547 (1970). Callan foi eleito, em 2008, membro da Academia Brasileira de Ciências e presidente da American Physical Society no ano de 2010.

131 Referindo-se ao evento Escola de Verão de Física de Partículas e Campos, realizada em Cargèse, França, no ano de 1979.

132 Referindo-se ao físico suíço Jürg Martin Fröhlich (1946-) especializado em TQC e ganhador de vários prêmios pelo reconhecimento do mérito nessa área da física de partículas elementares.

133 O entrevistador, refere-se a WRESZINSKI, W. F. *Escola Swieca, Swieca e o Debate Científico*. IFUSP, 2006.

o rigor presente nos trabalhos de bons físicos matemáticos, como Walter, a uma diferenciada intuição física do fenômeno em análise.

Bosonização, simetrias e modelos bidimensionais em EDQ foram áreas da TQC de grande interesse de Swieca, nas quais ele se destacou e obteve reconhecimento dos pares internacionais que compunham, à época, a comunidade de físicos especializados em TQC.

Conheci os dois livros de Leite Lopes¹³⁴, que você cita, intitulados (1) *Introdução à eletrodinâmica quântica* e (2) *Gauge Field Theories: An Introduction*. Leite Lopes tinha uma boa didática. Depois, outros físicos vieram a escrever sobre TQC e suas aplicações, como por exemplo, os ex-alunos de Swieca, Marcelo O. C. Gomes (de Mestrado) e Eduardo C. Marino (de Mestrado e Doutorado), pessoas próximas dele. João Barcelos Neto também escreveu um livro sobre TQC. Todos esses colegas certamente foram influenciados por sua obra.”

FIM DA ENTREVISTA

134 Referindo-se aos livros LOPES, J. L. *Introdução à eletrodinâmica quântica*. CBPF/CNPq. DH-001-92. Rio de Janeiro, 1960.; e LOPES, J. L. *Gauge field theories: an introduction*. Oxford: Pergamon Press, 1981.

A7 – ENTREVISTA COM W.F. WRESZINSKI

Entrevistado: Prof. Dr. Walter Felipe Wreszinski

Entrevistador: Walker Lins

Residência atual do entrevistado: São Paulo - SP, Brasil.

Dias dos diálogos: entre 25 de outubro e 04 de novembro de 2018.

Meio: *e-mail*.

Em entrevista realizada sobre a temática desta tese, o Prof. Dr. Walter Felipe Wreszinski, aposentado como professor titular da USP, que exerceu a docência de 1974 a 2009 assim declara:

“Caro Walker:

De fato, pouco tenho a adicionar ao artigo que escrevi na RBEF sobre Swieca (*J. A. Swieca faria 80 anos*), a não ser recordações pessoais de seminários que assisti proferidos por Maris e Swieca sobre EDQ em São Paulo [...]

Obrigado pelo e-mail e pelas observações. Estou muito surpreso com a sua referência a *Escola Swieca, Swieca e o debate científico*, de minha autoria, [...]

A ligação entre Maris e Swieca foi centrada no tema da quebra de simetria, e o comentário mais interessante de Swieca sobre o trabalho de Maris nesse setor é, na minha opinião, a observação na página 192 do seu trabalho magnífico sobre a EDQ em Duas Dimensões, com John Lowenstein (*Annals of Physics* vol. 68, 172-195 (1971)), sobre o "*total breakdown of Noether's theorem, a mechanism proposed by Maris et al...*"

Creio que o motivo da trajetória de Swieca, passando pela PUC, é eminentemente pessoal e, portanto, não é de interesse geral. Trata-se apenas de uma opinião.

Trabalhei em muitos campos de pesquisa até hoje. Fui fazer o meu doutorado na ETH¹³⁵ Zurich em 1970 após ter escrito um trabalho em TQC sob orientação de J. Lowenstein e J. A. Swieca, baseado no trabalho seminal deles, que citei no penúltimo e-mail.

Com relação a alunos, nunca lecionei TQC, quem o fez foi o Prof. Marcelo Gomes, no IFUSP.

Um abraço e boa tese.

Walter.”

FIM DA ENTREVISTA

135 ETH Edigennoessische Technische Hochschule (Instituto Federal de Tecnologia) sediado em Zurique na Suíça. Nessa instituição W. Wreszinski obteve o título de doutor, com a tese intitulada *Fluctuations in some mean field models in quantum statistical mechanics*, no ano de 1973, sob a orientação do físico suíço Klaus Hepp (1936 -) especialista em TQC.