

A DISCIPLINA “TEORIA QUÂNTICA DA INFORMAÇÃO”: EXPERIÊNCIA DE CRIAÇÃO E OFERECIMENTO NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA EPUSP

Alexandre Coutinho Lisboa – alexandrecl@usp.br

Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, nº 158

CEP 05508-900 – São Paulo – SP.

José Roberto Castilho Piqueira – piqueira@lac.usp.br

Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, nº 158

CEP 05508-900 – São Paulo – SP.

Resumo: *Este artigo trata da experiência de criação e oferecimento da disciplina “Teoria Quântica da Informação” no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Tendo em vista que Informação Quântica é um assunto de grande relevância e atualidade, com importantes desenvolvimentos, tanto teóricos como experimentais, e abordado em muitas universidades e centros de pesquisa em âmbito mundial, a implantação da disciplina vem atender à demanda de um curso que pudesse prover os alunos de pós-graduação em Engenharia Elétrica da EPUSP do ferramental básico teórico para que possam empreender estudos posteriores mais avançados, de acordo com seus interesses de pesquisa. Assuntos de natureza pedagógica, subjacentes a essa disciplina, como planejamento, conteúdo programático, estratégias de ensino e aprendizagem, bem como no que tange aos critérios de avaliação propostos aos alunos, são tratados em detalhe neste artigo.*

Palavras-chave: *Ensino em Engenharia, Pós-Graduação, Informação Quântica, Mecânica Quântica.*

1 INTRODUÇÃO

Após o estabelecimento das bases de uma teoria matemática abstrata da Informação pelo matemático e engenheiro eletricista norte-americano Claude Shannon em 1948, estudos posteriores, entre eles um trabalho do físico teuto-americano Rolf Landauer de 1961, começaram a chamar a atenção para o fato de que a informação é sempre armazenada, processada e transmitida por meios físicos e que, portanto, os conceitos de informação e computação podem ser formulados no contexto de teorias físicas, levando-se em conta não apenas a formulação matemática teórica, mas também resultados experimentais (BOUWMEESTER *et al.*, 2000).

Vários resultados recentes, tanto teóricos quanto experimentais, indicam que os efeitos quânticos podem ser utilizados para novos e revolucionários modos de processamento de informação, computação e comunicação, sendo que essas novas tecnologias quânticas estão nascendo em vários laboratórios. Nas últimas três décadas, diversas partículas quânticas têm

sido controladas e manipuladas com uma precisão até então sem precedentes. Novas técnicas experimentais tornam, agora, possível armazenar e processar informação codificada em sistemas quânticos, de sorte que, como resultado, temos agora um novo, emergente e fértil campo de pesquisa relacionado ao processamento de informação quântica, campo este de natureza interdisciplinar no sentido de promover uma síntese entre Mecânica Quântica, a Teoria da Informação e a Ciência da Computação, podendo não apenas lançar luz sobre questões de natureza teórica na Física, mas também dar gênese a novas e revolucionárias tecnologias a serem exploradas comercialmente pelas indústrias da computação e da comunicação (BOUWMEESTER *et al.*, 2000).

A título de exemplo, bastante em voga, tanto em meios acadêmicos como na mídia, discute-se a viabilidade da construção de computadores quânticos economicamente viáveis, que possam revolucionar efetivamente o processamento da informação, permitindo a execução de processamentos computacionais complexos de forma muito mais eficiente e rápida que os mais velozes e poderosos computadores clássicos existentes. Com efeito, a computação clássica, ao lidar apenas com bits que podem assumir somente valores lógicos “0” e “1”, não tira proveito das peculiaridades quânticas da natureza atômica e subatômica, caracterizadas pela superposição de estados quânticos e pelo fenômeno de emaranhamento quântico (“*quantum entanglement*”), uma forte correlação entre estados quânticos sem contrapartida na Física Clássica; fenômenos esses que se constituem em ingredientes chaves na computação e comunicação quânticas (BOUWMEESTER *et al.*, 2000), (KITAEV *et al.*, 2002) e (VEDRAL, 2007).

Neste contexto, decidiu-se criar, em 2008, uma nova disciplina de Pós-Graduação no elenco de disciplinas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, cuja finalidade fosse prover o ferramental teórico básico para o entendimento das principais questões relativas ao processamento quântico da informação, tratando principalmente as operações quânticas e a medida da informação, associadas a estados quânticos.

2 A FORMAÇÃO ACADÊMICA DO ENGENHEIRO ELETRICISTA E OS DESAFIOS TECNOLÓGICOS DA “ERA QUÂNTICA”

De modo geral, apenas algumas noções básicas de Física Moderna são normalmente vistas nos cursos de Física Geral ministrados nos ciclos básicos das graduações em Engenharia Elétrica, que, via de regra, abordam apenas rudimentos de Relatividade Restrita, e um “*overview*” de Física Quântica, no qual se dá mais ênfase ao primeiro momento da Teoria Quântica, ou seja, são os conteúdos geralmente abordados: a hipótese de Planck de quantização da emissão de radiação de corpo negro (1900); o efeito fotoelétrico (1905); a hipótese de Bohr sobre a estrutura atômica, promovendo uma explicação sobre a estabilidade atômica, com a consequente adequação aos resultados empíricos sobre o espectro do átomo de hidrogênio através da quantização do momento angular, levando a níveis permitidos de energia discretizados (1913); o espalhamento Compton (1923); a teoria de de Broglie de dualidade partícula-onda para o elétron (1924); noções sobre o Princípio de Incerteza de Heisenberg (1927); e, por fim, um tratamento bastante elementar da equação de Schrödinger (1926), derivando-se soluções ondulatórias para a versão unidimensional e independente do tempo da mesma, aplicando-a em problemas de poços de potencial (SERWAY, 1992), (NUSSENZVEIG, 1998). Outros conteúdos eventualmente tratados em cursos de Física Geral (especialmente aqueles em cursos de Física Geral ministrados no quarto semestre) sob o rótulo de “Física Moderna” só podem restringir-se, no máximo, a um nível de divulgação científica.

É oportuno destacar aqui, valendo-se do ensejo, que, embora o livro-texto de Serway (1992) seja bastante popular no Brasil para cursos de “Física Moderna” para engenheiros, possa se julgar que o livro-texto de Nussenzveig (1998), entretanto, constituir-se-ia em melhor referência bibliográfica para cursos de “Física Geral IV”, uma vez que trata a Física Quântica, por exemplo, com bem mais profundidade, ainda que visando uma primeira exposição para alunos de segundo ano de cursos de graduação em Ciências Exatas.

Tendo em vista os conteúdos de Física tradicionalmente ensinados nas escolas de Engenharia do país, pode-se dizer que a estrutura curricular da graduação em Engenharia Elétrica é tal que o estudante toma contato direto e mais aprofundado apenas com uma Física oriunda da segunda metade do século XIX: o Eletromagnetismo Clássico na forma estabelecida por Maxwell, e, entretanto, está-se formando engenheiros que devem estar aptos para lidar com os desafios tecnológicos do século XXI, sendo que, muitos dentre eles, engenheiros eletricitas, eletrônicos e de computação haverão de se defrontar com tecnologias fortemente baseadas em conhecimentos avançados de Mecânica Quântica, especialmente naqueles que dizem respeito ao processamento de Informação Quântica e/ou Computação Quântica.

No tocante à graduação em Engenharia Elétrica, uma possível proposta para modernizar sua estrutura curricular, de modo a torná-la mais alinhada e comprometida com as fortes e crescentes demandas em conhecimentos mais avançados em Física e Matemática, seria a criação de uma modalidade de “Engenharia Científica”, a qual coexistiria com as graduações tradicionais, mas, no entanto, melhor atendendo a um segmento dos alunos com grande potencial e pendor para a pesquisa científica (PIQUEIRA, 2009).

Não obstante, dada a constatação de que a Teoria Quântica da Informação já é uma área bastante desenvolvida nas principais universidades do mundo, bem como em escolas de engenharia notórias pela excelência em ensino e pesquisa, sendo que, ademais, no Brasil, já há grupos de pesquisa com intensa atividade nessa linha, e com algumas teses de doutoramento já defendidas, julgou-se assaz importante iniciar concretamente o estudo dessa área no Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica da USP, efetivando-se, para tanto, a criação e o oferecimento de uma disciplina que fornecesse aos alunos os conceitos teóricos básicos subjacentes à Teoria Quântica da Informação.

3 A DISCIPLINA “PTC-5609 - TEORIA QUÂNTICA DA INFORMAÇÃO”: SUA INSERÇÃO NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA EPUSP E SEU PLANEJAMENTO

Tendo sido oferecida já duas vezes, em 2009 e em 2010, pelo Prof. José Roberto Castilho Piqueira, para grupos de cerca de cinco a dez alunos, a disciplina “PTC-5609 – Teoria Quântica da Informação” estruturou-se com base no livro-texto de Vedral (2007), alcançando boa aceitação desde então.

Não se pode falar, a rigor, da existência de um projeto pedagógico que norteie o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da EPUSP, pois o Programa é caracterizado por uma grande quantidade de disciplinas (atualmente há cerca de cento e setenta disciplinas cadastradas), divididas em cinco Áreas de Concentração, a saber, Engenharia de Sistemas, Microeletrônica, Sistemas de Potência, Sistemas Digitais e Sistemas Eletrônicos, constituindo-se, pois, em um grande e diversificado elenco de disciplinas, o qual abrange tanto aquelas disciplinas mais fundamentais, por assim dizer, como aquelas mais específicas e aprofundadas, de modo a cobrir uma extensa gama de tópicos de interesse às várias linhas de pesquisa que são desenvolvidas na Poli-Elétrica.

Assim, mais adequado do que se pensar em termos de inserção e aderência de uma dada disciplina de pós-graduação em um projeto pedagógico (ABREU & MASETTO, 1990), deve-

se pensar aqui em um contexto de pesquisa, para o qual a disciplina “PTC5609 – Teoria Quântica da Informação” é adequada. Com efeito, o curso tem como público-alvo, por assim dizer, alunos da pós-graduação da EPUSP atuando principalmente nas áreas de Computação e Controle, permitindo aos mesmos iniciarem-se posteriormente em estudos mais avançados, de acordo com seus interesses de pesquisa.

3.1 Pré-requisitos

No elenco das disciplinas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da EPUSP, “PTC-5007 – Matemática Aplicada à Engenharia de Sistemas” é uma disciplina de caráter eminentemente matemático, a qual fornece ao aluno de pós-graduação em Engenharia Elétrica conceitos fundamentais de Análise Funcional, a saber, espaços métricos, sequências de Cauchy, completude de espaços, espaços normados, espaços de Banach, espaços com produto interno, espaços de Hilbert, polinômios de Legendre, Hermite e Laguerre e funcionais em espaços de Hilbert. Tendo como referência bibliográfica principal o livro-texto clássico de Kreyszig (1989), essa disciplina contribui significativamente no sentido de dotar o aluno de pós-graduação em Engenharia Elétrica de conhecimentos matemáticos, muitas vezes ausentes em seu *background*, em função da própria formação obtida nos cursos de graduação em Engenharia, os quais, no entanto, são de grande relevância para várias áreas de pesquisa como Controle Robusto, Controle H_∞ , Controle Não-Linear, Processamento de Sinais, Controle Quântico, Informação e Computação Quânticas, entre outras.

Embora seja desejável cursar primeiramente “PTC-5007”, tradicionalmente oferecida no período imediatamente anterior ao oferecimento de “PTC-5609”, não há pré-requisitos formais para a matrícula na disciplina “PTC-5609 – Teoria Quântica da Informação”. Com efeito, uma vez que o aluno disponha de conhecimentos básicos em Álgebra Linear, a disciplina tenta sanar, na medida do possível, eventuais lacunas de conceitos teóricos básicos de Análise Funcional necessários em Mecânica Quântica, em paralelo à introdução da mesma, nas suas primeiras aulas, desenvolvendo o formalismo matemático abstrato padrão da teoria moderna, na notação devida a Dirac, o qual pode ser encontrado em qualquer texto moderno de Mecânica Quântica, como, por exemplo, em (SAKURAI, 1994). Destarte, o curso inicia-se com discussões de caráter geral sobre Informação Quântica, a diferença conceitual de estados físicos na Mecânica Clássica e na Mecânica Quântica, para, em seguida, prosseguir com a introdução dos construtos teóricos básicos, os quais serão empregadas ao longo de todo o curso, a saber, a descrição de estados quânticos por vetores duais (“*kets*” e “*bras*”) definidos no Espaço de Hilbert (espaço vetorial sobre o corpo dos números complexos, completo, normado e dotado de produto interno), princípio de superposição de estados, bases, amplitudes de probabilidade, transições e conservação de probabilidades, probabilidades associadas à medição, operador densidade de probabilidades, etc.

3.2 Estruturação e conteúdo programático da disciplina

Tendo como referência bibliográfica básica o livro-texto de Vedral (2007), os conteúdos abordados na disciplina PTC-5609 – Teoria Quântica da Informação, em ordem cronológica de exposição, podem ser apreciados a seguir.

1. Discussão breve de natureza geral sobre a disciplina.
2. Fundamentos da Física Clássica, Espaço de Estados e Equações de Movimento, em contraste com os fundamentos da Física Quântica.
3. Conceitos de Informação Clássica, a Informação de acordo com Shannon, a Entropia de Shannon, Entropia Relativa, Entropia Conjunta, Entropia Condicional, Informação Mútua e Capacidade de um canal clássico.
4. Formalismo matemático básico da Mecânica Quântica: a Notação de Dirac, Vetores Duais, Produto Interno, Espaço de Hilbert,

Representação de Estados Quânticos, Superposição, Bases no Espaço de Hilbert; Base de Hadamard e o conceito de Bit Quântico - *qubit*. 5. Medidas Projetivas, Operações e Operadores, Operadores Unitários, Autovalores e Autovetores de um Operador, Decomposição Espectral de um Operador, Operadores Hermiteanos, Operadores Normais e Produto Tensorial. 6. Exemplo de aplicação e ilustração de conceitos: o “Interferômetro de Mach-Zenders”; Digressão sobre aspectos teóricos, interpretativos e fenomenológicos da Mecânica Quântica, o “Paradoxo EPR”, o fenômeno de Emaranhamento Quântico (“*Quantum Entanglement*”), a Desigualdade de Bell e a Não-Localidade. 7. Postulados da Mecânica Quântica: Evolução Unitária, Medida Quântica e a Ação da Medida; Estados Mistos, Operador Densidade e a não possibilidade de copiar Estados Quânticos: o “*Non-Cloning Theorem*”. 8. Conceitos de Criptografia Clássica versus Criptografia Quântica e o Protocolo “BB84”; Traço e Traço Parcial do Operador Densidade e suas propriedades. 9. Valores Médios de Medidas Projetivas, a Decomposição de Schmidt, Medidas Generalizadas e Mapas CP. 10. Noções de Comunicação com *Entanglement*, Matrizes de Pauli, Código Denso e “Teletransporte” de um Estado Quântico. 11. Definições de Informação Quântica e a Entropia de von Neumann; Fidelidade e Discriminação de Helstrom; Compressão de Dados Clássicos versus Compressão de Dados Quânticos e desenvolvimento do conceito de Compressão Quântica. 12. Entropia de Observação, Entropia Condicional e Informação Mútua Quânticas e Entropia Relativa Quântica.

3.3 Estratégias e avaliação na disciplina

De acordo com a conceituação de Abreu e Masetto (1990), pode-se dizer que as estratégias pedagógicas empregadas na disciplina “PTC-5609 – Teoria Quântica da Informação” baseiam-se no binômio “Aulas Expositivas e Ensino por Projeto”. Com efeito, dadas as características do curso, bem como o número total de aulas disponíveis em um período (em um total de três) no calendário anual do Programa de Pós-Graduação da EPUSP, é mister que os conteúdos sejam transmitidos aos alunos por meio de aulas expositivas, cuidadosamente planejadas de antemão, conforme apresentado na seção anterior, aproveitando-se de modo efetivo todas as aulas semanais definidas pelo cronograma da Escola. Pode-se cogitar, entretanto, a idéia de implementar um melhoramento futuro adicional às supracitadas estratégias pedagógicas, o qual ainda não pôde ser levado a cabo nos dois oferecimentos da disciplina até então, que consistiria em convidar palestrantes especialistas em tópicos de interesse à mesma, como também eventualmente organizar seminários entre os alunos. Deve ser ressaltado aqui, no entanto, que tais expedientes adequar-se-iam melhor ao planejamento da disciplina, se pudessem ser realizados em horários extras, à parte às aulas, em virtude da extensão e da complexidade do conteúdo programático, e do número limitado de aulas disponíveis ao longo de um período do calendário de pós-graduação da EPUSP.

Com relação à questão das avaliações, julgou-se mais adequado, não obstante, ao invés de aplicar avaliações tradicionais pautadas em provas e/ou listas de exercícios, implementar uma avaliação na forma de um trabalho temático, a ser feito individualmente por cada aluno, para o qual ele ou ela deveria, de posse dos conteúdos aprendidos ao longo do curso, propor de livre escolha um problema que gostaria de atacar, e o qual envolvesse conceitos de Informação Quântica, estando, pois, coerente e aderente com relação ao conteúdo da disciplina.

Após a definição do tema do trabalho, ao final do primeiro terço do curso, os alunos dedicaram-se a desenvolvê-lo, produzindo um esboço inicial, e, por fim, entregando a versão final dele na última aula do curso. Todas essas três etapas foram mediadas e supervisionadas pelo docente responsável pela disciplina, de modo que se estabeleceu efetivamente um eficiente processo de feedback no tocante à avaliação dos alunos e da disciplina propriamente

dita, bem como na orientação da condução e da elaboração dos trabalhos. Naturalmente, tal ensejo fomentou aos alunos, ademais, a leitura de outros textos sobre o assunto, como também a busca de artigos e outras referências na vasta literatura técnica existente de Informação Quântica.

Tal abordagem mostrou-se não apenas mais produtiva no que se concerne ao aprendizado, mas também catalisadora do espírito criativo dos estudantes, os quais, em sua grande maioria, demonstraram forte interesse pelos conteúdos ministrados, possibilitando a elaboração de trabalhos de qualidade, alguns dos quais, ao final do curso, reescritos adequadamente na forma de artigo e submetidos a periódicos internacionais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Criada e oferecida pelo Prof. José Roberto Castilho Piqueira do Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PTC-EPUSP), tendo em vista interesses pessoais de pesquisa, bem como a inegável relevância do assunto em questão, a disciplina PTC-5609 – Teoria Quântica da Informação veio a constituir-se em um importante curso de formação básica em tópicos de Mecânica Quântica aplicados ao processamento e à medida da informação em sistemas quânticos, possibilitando os alunos de pós-graduação em Engenharia Elétrica da EPUSP tomarem um primeiro contato, em muitos casos, não apenas com o formalismo matemático básico da Mecânica Quântica, mas também com importantes conceitos científicos e técnicos de grande atualidade, situados na vanguarda do conhecimento, como *qubits*, emaranhamento quântico (“*quantum entanglement*”), noções de criptografia quântica, comunicação com *entanglement*, códigos densos, teletransporte de estados quânticos, etc, o que abre uma ampla gama de linhas de pesquisa possíveis em nível de pós-graduação, além de fomentar de forma efetiva o engajamento de alunos interessados em grupos de pesquisa versando sobre tópicos que envolvam, direta ou indiretamente, Informação Quântica.

Trata-se, pois, de um importante passo dado na Escola no afã de inseri-la em tal pesquisa de ponta. Espera-se futuramente que interações entre outras Unidades da USP, em especial o Instituto de Física da USP (IFUSP), bem como com outras Escolas de Engenharia de outras universidades brasileiras e estrangeiras, possam ser estabelecidas, promovendo um frutífero e enriquecedor intercâmbio de grande valia, tanto para docentes, pesquisadores, alunos de pós-graduação e de iniciação científica, quanto para as Instituições envolvidas no processo.

Agradecimentos

Alexandre Coutinho Lisboa deseja agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro, e aos Professores José Aquiles Baesso Grimoni e Osvaldo Shigueru Nakao pelos valiosos conhecimentos transmitidos ao longo da disciplina “PEA5900 – Tecnologia de Ensino de Engenharia”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Maria Celia de; MASETTO, Marcos Tarciso. **O Professor Universitário em Aula**. 8. ed. São Paulo: Mg Ed. Associados, 1990. 130 p.

BOUWMEESTER, Dirk; EKERT, Artur K.; ZEILINGER, Anton (Ed.). **The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation**. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2000. 314 p.

KITAEV, Alexei Yu.; SHEN, Alexander H.; VYALYI, Mikhail N. **Classical and Quantum Computation**. Providence, RI: AMS, 2002. 272 p. (Graduate Studies in Mathematics).

KREYSZIG, Erwin. **Introductory Functional Analysis with Applications**. USA: John Wiley & Sons, 1989. 704 p. (Wiley Classics Library).

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica, V.4: Ótica, Relatividade, Física Quântica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 437 p.

PIQUEIRA, José Roberto Castilho. **"Pensando a Escola Politécnica"**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <Docentes, Alunos e Funcionários da EPUSP>. em: 30 nov. 2009.

SAKURAI, Jun J. **Modern Quantum Mechanics**. Revised Edition. USA: Addison Wesley, 1994. 502 p.

SERWAY, Raymond A. **Física 4: Física Moderna, Relatividade, Física Atômica e Nuclear**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1992. 288 p.

VEDRAL, Vlatko. **Introduction to Quantum Information Science**. New York, USA: Oxford University Press, 2007. 196 p. (Oxford Graduate Texts).

EXPERIENCE OF CREATING AND OFFERING THE COURSE "QUANTUM THEORY OF INFORMATION" IN THE ELECTRICAL ENGINEERING GRADUATE PROGRAM OF THE POLYTECHNIC SCHOOL OF THE UNIVERSITY OF SÃO PAULO

***Abstract:** This paper deals with the experience of creating and offering the course "Quantum Theory of Information" in the Electrical Engineering Graduate Program of the Polytechnic School of the University of São Paulo (EPUSP). Taking into account that Quantum Information is a subject of great relevance and contemporaneity, with important developments, both theoretical and experimental, being carried out in many universities and research centers around the world, the implementation of the above mentioned discipline is intended to fulfill the need for a course that could provide the basic theoretical tools for graduate students in Electrical Engineering at EPUSP, in order to enable them to undertake further studies of more advanced nature, according to their own research interests. Pedagogical issues regarding this discipline, such as planning, programmatic content, teaching and learning strategies, as well the evaluation criteria proposed for the students, are treated in detail in this paper.*

***Key-words:** Engineering Education, Graduate Studies, Quantum Information, Quantum Mechanics.*