

**RESUMEN DEL PLAN DE ESTUDIOS POR MATERIAS Y ASIGNATURAS**

**CUADRO 2 – OPCIÓN A**

<b>ESTRUCTURA DEL PLAN DE ESTUDIOS POR MATERIAS MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGIA e INGENIERIA CUANTICAS</b>					
<b>MATERIA</b>	<b>ASIGNATURA</b>	<b>EC TS</b>	<b>Tipo</b>	<b>Curso</b>	<b>Cu atr</b>
<b>Introducción a las Tecnologías Cuánticas y su Metodología / Introduction to quantum technologies and methodologies</b>	Tecnologías e ingeniería cuánticas / <i>Quantum technologies and engineering</i>	6	0	1	1
	<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>	6			
<b>Física Cuántica/ Quantum Physics</b>	Mecánica cuántica matricial/ <i>Matrix quantum mechanics</i>	3	0	1	1
	Mecánica cuántica de ondas/ <i>Wave quantum mechanics</i>	3	0	1	1
	<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>	6			
<b>Optica Cuántica/ Quantum optics</b>	Óptica electromagnética y fotónica/ <i>Electromagnetic optics and photonics</i>	3	0	1	1
	Óptica cuántica/ <i>Quantum optics</i>	6	0	1	2
	<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>	9			
<b>Computación Cuántica/ Quantum computing</b>	Computación cuántica/ <i>Quantum computing</i>	6	0	1	1
	Laboratorio de computación cuántica/ <i>Laboratory on quantum computing</i>	6	0	1	2
	<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>	12			
<b>Sensores cuánticos y metrología cuántica/ Quantum sensing and Quantum metrology</b>	Sensores y sistemas clásicos de instrumentación/ <i>Sensors and classical measurement instrumentation systems.</i>	3	0	1	1
	Sensores cuánticos/ <i>Quantum sensing</i>	3	0	1	2
	Metrología cuántica/ <i>Quantum metrology</i>	3	0	1	2
	<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>	9			
<b>Información y comunicaciones cuánticas/ Quantum information and communications</b>	Información y comunicaciones pre-cuánticas/ <i>Pre-quantum information and communication</i>	3	0	1	1
	Información y comunicaciones cuánticas/ <i>Quantum information and communication</i>	6	0	1	2
	<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>	9			
<b>Internet cuántica y</b>	Sistemas de redes de ordenadores seguros/ <i>Secure computer network systems</i>	3	0	1	1

<b>criptografía cuántica/ Quantum internet and quantum cryptography</b>	Internet cuántica y criptografía cuántica/ <i>Quantum internet and quantum cryptography</i>	6	0	1	2
	<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>	9			
<b>Optativas/Electivas (se escogen 18 ECTS)</b>	<b>Asignatura</b>	3	OP	2	1
	Control Cuántico/ <i>Quantum control</i>	3	OP	2	1
	Matemáticas para mecánica cuántica/ <i>Mathematics for quantum mechanics</i>	3	OP	2	1
	Fundamentos matemáticos de la información y tecnologías cuánticas/ <i>Mathematical foundation for quantum information and technologies</i>	3	OP	2	1
	Teoría de la información de longitud finita para sistemas cuánticos/ <i>Finite-length information theory for quantum systems</i>	3	OP	2	1
	Redes neuronales cuánticas/ <i>Quantum neural networks</i>	3	OP	2	1
	Aprendizaje automático cuántico/ <i>Quantum machine learning</i>	3	OP	2	1
	Lógica cuántica y procesamiento de información/ <i>Quantum logic and information processing</i>	3	OP	2	1
	Radares cuánticos/ <i>Quantum radars</i>	3	OP	2	1
	Materiales cuánticos/ <i>Quantum materials</i>	3	OP	2	1
	Transporte cuántico y nanodispositivos/ <i>Quantum transport and nanodevices</i>	3	OP	2	1
	Dispositivos nanoelectrónicos/ <i>Nanoelectronic devices</i>	3	OP	2	1
	Detectores ópticos cuánticos/ <i>Quantum optical detectors</i>	3	OP	2	1
	Sistemas cuánticos abiertos/ <i>Quantum open systems</i>	3	OP	2	1
	Teoría de perturbaciones dependiente del tiempo/ <i>Time-dependent perturbation theory</i>	3	OP	2	1
	Métodos numéricos para mecánica cuántica/ <i>Numerical methods for quantum mechanics</i>	3	OP	2	1
	Implementaciones de estado sólido de tecnologías cuánticas/ <i>Solid-state implementation of quantum technologies</i>	3	OP	2	1
	Nanofotónica cuántica/ <i>Quantum nanophotonics</i>	3	OP	2	1
	Fenómenos emergentes en materia cuántica/ <i>Emergent phenomena in quantum matter</i>	3	OP	2	1
	Aplicaciones de la computación cuántica a sectores industriales y económicos/ <i>Applications</i>	3	OP	2	1

	<i>of quantum computer to industrial and economic sectors</i>				
	Tecnologías cuánticas e ingeniería aeroespacial/ Quantum technologies and aerospace engineering	3	OP	2	1
<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>		18			
<b>Prácticas externas/ Internships</b>	Prácticas externas/ <i>Internships</i>	12	OP	2	1
<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>		12			
<b>TRABAJO FIN DE MÁSTER/ MASTER THESIS</b>	Trabajo fin de máster/ <i>Master thesis</i>	12	TFM	2	1
<b>TOTAL ECTS MATERIA</b>		12			

## CONTENIDOS DE LAS ASIGNATURAS

<b>MATERIA 1</b>				
Denominación: <b>Introducción a las Tecnologías Cuánticas y su Metodología /Introduction to quantum technologies and methodologies</b>				
<b>Listado de Asignaturas de la materia</b>				
<b>Asignatura</b>	<b>Créditos</b>	<b>Cuatrim</b>	<b>Carácter</b>	<b>Idioma</b>
Tecnologías e Ingeniería cuánticas / <i>Quantum technologies and engineering</i>	6	1	O	Inglés
<b>Descripción de contenidos</b>				
<p><b>Temas comunes a las asignaturas:</b>            No aplica al haber una única asignatura.</p> <p><b>Temas específicos de cada asignatura:</b>  <u>Tecnologías e Ingeniería Cuánticas.-</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evolución histórica de las tecnologías cuánticas</li> <li>- Revolución Cuántica 2.0</li> <li>- Tecnologías cuánticas aplicadas a la computación</li> <li>- Tecnologías cuánticas aplicadas a la comunicación</li> <li>- Tecnologías cuánticas aplicadas a la información y criptografía</li> <li>- Tecnologías cuánticas aplicadas a la metrología</li> <li>- Tecnologías cuánticas aplicadas al desarrollo de nuevos sensores</li> <li>- Tecnologías cuánticas aplicadas al desarrollo de nuevos materiales</li> <li>- Tecnologías cuánticas aplicadas al mundo financiero</li> <li>- Tecnologías cuánticas aplicadas al espacio</li> <li>- Aspectos éticos de las tecnologías cuánticas</li> <li>- Metodologías de investigación en el campo de las tecnologías cuánticas</li> </ul> <p><b>Contents common to all courses:</b>  <i>It does not apply, since there is only one course.</i></p> <p><b>Contents specific to each course:</b>  <u>Quantum Technologies and Engineering.-</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Historical evolution of quantum technologies</i></li> <li>- <i>Quantum Revolution 2.0</i></li> <li>- <i>Quantum Technologies and computation</i></li> <li>- <i>Quantum Technologies and communications</i></li> <li>- <i>Quantum Technologies applied to information and cryptography</i></li> <li>- <i>Quantum Technologies and metrology</i></li> <li>- <i>Quantum Technologies and sensing</i></li> <li>- <i>Quantum Technologies and new materials</i></li> <li>- <i>Quantum Technologies and finance</i></li> <li>- <i>Quantum Technologies and space</i></li> <li>- <i>Ethical aspects of Quantum Technologies</i></li> <li>- <i>Research methodologies in the field of Quantum Technologies.</i></li> </ul>				

## MATERIA 2

Denominación: **Física Cuántica/Quantum Physics**

### Listado de Asignaturas de la materia

Asignatura	Créditos	Cuatrim	Carácter	Idioma
Mecánica cuántica matricial/ <i>Matrix quantum mechanics</i>	3	1	O	Inglés
Mecánica cuántica de ondas/ <i>Wave quantum mechanics</i>	3	1	O	Inglés

### Descripción de contenidos

#### Temas comunes a las asignaturas:

- Postulados de la mecánica cuántica
- Estado cuántico. Espacio de estados.
- Magnitudes y operadores. Autovalores y autoestados.
- Proceso de medida.
- Entrelazamiento cuántico.

#### Temas específicos de cada asignatura:

##### Mecánica cuántica matricial:

- Espacios vectoriales de dimension finita. Bras y Kets. Producto escalar. Base del espacio. Ortogonalidad, ortonormalidad y completitud. Descomposiciones y proyecciones.
- Operadores. Representaciones de operadores en una base del espacio vectorial. Autovalores y autovectores. Operador adjunto. Operadores hermíticos, unitarios y normales. Proyectores. Conmutadores. Productor tensorial.
- Postulados de la mecánica cuántica. Espacio de estados. Operadores y magnitudes físicas. Medida y observables cuánticos. Evolución temporal del estado cuántico.
- Estados puros y estados mezcla. Ejemplos de estados cuánticos bidimensionales: qubits; estados de Bell. Entrelazado cuántico.

##### Mecánica cuántica de ondas

- Ecuación de Schrödinger. Función de onda. Interpretación probabilística.
- Magnitudes físicas y operadores en forma diferencial. Autovalores y autoestados. Base del espacio de estados. Relación con la formulación matricial.
- Evolución temporal del estado cuántico.
- Problemas independientes del tiempo. Estados ligados y no ligados. Partículas libres.
- Sistemas unidimensionales: oscilador armónico; barreras y pozos cuánticos. Efecto túnel.
- Sistemas periódicos. Teorema de Bloch. Modelo de Kronig-Penney. Teoría de bandas para sólidos. Electrones y huecos.
- Metales y aislantes. Semiconductores.
- Superconductividad.

#### **Contents common to all courses:**

- *Postulates of Quantum Mechanics.*
- *Quantum state. Space of quantum states.*
- *Physical magnitudes and operators. Eigenvalues and Eigenstates.*

- Quantum measurement.
- Quantum entanglement.

**Contents specific to each course:**

Matrix quantum mechanics:

- Finite vector spaces. Bras and kets. Inner product. Basis of the space. Orthogonality, orthonormality and completeness. Decompositions.
- Operators. Representations of operators on a space basis. Eigenvalues and eigenvectors. Adjoint operator. Hermitian, unitary and normal operator. Projector operators, Commutators. Tensor products
- Postulates of quantum mechanics. Space of states. Operators and physical observables. Quantum measurement and uncertainties. Evolution of the quantum state.
- Pure and mixed states. Examples of 2D quantum states: qubits; Bell states. Quantum entanglement.

Wave quantum mechanics:

- Schrodinger's equation. Wave function. Probabilistic interpretation.
- Physical magnitudes and operators in differential form. Eigenvalues and eigenstates. Basis of the space of states. Relation to matrix formulation.
- Time evolution of the wave function.
- Time independent problems. Bound and scattering states. Free quantum particle.
- One dimensional systems: harmonic oscillator; quantum barriers and wells. Quantum tunneling.
- Periodic systems. Bloch theorem. Kronig-Penney model. Band theory of solids. Holes and electrons.
- Metals and insulators. Semiconductors.
- Superconductivity.

### MATERIA 3

Denominación: **Optica Cuántica/Quantum optics**

#### Listado de Asignaturas de la materia

Asignatura	Créditos	Cuatrim	Carácter	Idioma
Óptica electromagnética y fotónica/ <i>Electromagnetic optics and photonics</i>	3	1	O	Inglés
Óptica cuántica/ <i>Quantum optics</i>	6	2	O	Inglés

#### Descripción de contenidos

##### Temas comunes a las asignaturas:

- Ecuaciones de Maxwell.
- Ondas electromagnéticas.
- Láseres.

##### Temas específicos de cada asignatura:

###### Óptica electromagnética y fotónica:

- Ondas electromagnéticas: superposición, reflexión, refracción, difracción, interferencia, polarización.
- Propagación de la luz en el vacío.
- Propagación de la luz en guías de onda y fibra ópticas.
- Modelo semi-clásico de interacción luz-materia. Absorción y emisión estimulada y espontánea.
- Láseres. Propiedades de la emisión laser: coherencia espectral y espacial. Tipos de laser (gas, estado sólido, semiconductor, cascada cuántica, fibra óptica). Láseres pulsados.
- Fotodetectores. Respuesta y ruido. Límites de detección. Detección heterodina.
- Fotodiodos, fotomultiplicadores, CCDs, contadores de fotones.

###### Óptica cuántica:

- Control de átomos con luz: transiciones atómicas, vectores y estados de Bloch.
- Fotones y tecnologías cuánticas: fotones en cavidades y libres; estados cuantizados de luz (estados Fock y coherentes); estados comprimidos; metrología cuántica con estados fotónicos.
- Interacción de átomos y qubits con luz cuantizada: modelo de Jaynes-Cummings; interacción en el espacio libre; ruido cuántico; decaimiento radiativo; generación de estados de la luz por átomos (emisión láser y de fotón único).
- Introducción a sistemas ópticos cuánticos: electrodinámica cuántica de cavidades y circuitos. Iones atrapados.
- Computación cuántica con sistemas ópticos: puertas controladas por modos fotónicos; computación cuántica con iones atrapados; computación cuántica con estados fotónicos.
- Aplicaciones de óptica cuántica: comunicación cuántica por un solo fotón; transparencia inducida electromagnéticamente; pinzas ópticas y atrapamiento óptico; redes cuánticas de conjuntos atómicos.

##### Contents common to all courses:

- *Maxwell's equations.*
- *Electromagnetic waves.*

- Lasers.

**Contents specific to each course:**

Electromagnetic optics and photonics:

- Electromagnetic waves: superposition, reflection, refraction, diffraction, interference and polarization.
- Propagation of EM waves in free space, waveguides and optical fibers.
- Semi-classical model for light-matter interaction. Absorption, Spontaneous emission and stimulated emission.
- Lasers. Properties of laser light: spectral and spatial coherence. Laser types (gas, solid state, semiconductor, quantum cascade, optical fiber, etc). Pulsed lasers.
- Photodetectors. Responsivity and noise. Detection limits. Heterodyne detection.
- Photodiodes, photomultipliers, CCDs, photon counters.

Quantum optics:

- Control of atoms with light: atomic transitions; Bloch vectors and states.
- Photons for quantum technologies: photons in cavities and free space; quantum states of light (Fock and coherent states); squeezed states; quantum metrology with photon states.
- Interaction of atoms and qubits with quantum light: Jaynes-Cummings model; interaction of atoms with photons in free space; quantum noise; radiative decay; generation of quantum states of light by atoms (laser and single-photon emission)
- Introduction to quantum optical systems: quantum electrodynamics (QED) for cavities and circuits. Trapped ions.
- Quantum computation with quantum optical systems: quantum gates mediated by photonic modes; trapped ion quantum computing; quantum computing with photon states.
- Application of quantum optics: single photon for quantum communications; electromagnetically induced transparency; optical tweezers and optical trapping; atomic ensembles for quantum networks.



<b>MATERIA 4</b>				
Denominación: <b>Computación Cuántica/Quantum Computing</b>				
<b>Listado de Asignaturas de la materia</b>				
<b>Asignatura</b>	<b>Créditos</b>	<b>Cuatrim</b>	<b>Carácter</b>	<b>Idioma</b>
Computación Cuántica/ <i>Quantum computing</i>	6	1	O	Inglés
Laboratorio de Computación Cuántica/ <i>Laboratory on quantum computing</i>	6	2	O	Inglés
<b>Descripción de contenidos</b>				
<p><b>Temas comunes a las asignaturas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elementos de computación cuántica: qubits y multiqubits.</li> <li>- Puertas y circuitos cuánticos.</li> <li>- Algoritmos cuánticos.</li> </ul> <p><b>Temas específicos de cada asignatura:</b></p> <p><u>Computación cuántica:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elementos de computación clásica: bits y memoria, circuitos, cables y puertas (1-bit, 2-bit, n-bits). Complejidad (NP vs P).</li> <li>- Elementos de computación cuántica: qubits y multiqubits. Teorema de no-clonación. Estados entrelazados. Estados y desigualdades de Bell.</li> <li>- Puertas cuánticas (Hadamard, Pauli, CNOT, SWAP, etc.)</li> <li>- Circuitos cuánticos.</li> <li>- Teorema de Solovay-Kitaev</li> <li>- Algoritmos cuánticos. Algoritmos de Deutsch y Deutsch-Jozsa. Algoritmo de búsqueda Grover. Algoritmo de factorización de Shor. Transformada de Fourier cuántica.</li> <li>- Simulación de sistemas cuánticos.</li> <li>- Posibles implementaciones del futuro computador cuántico (iones atrapados, superconductores, redes de puntos cuánticos, cavidades ópticas QED, etc.)</li> </ul> <p><u>Laboratorio de computación cuántica:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Introducción a Python y a IBM Qiskit.</li> <li>- Creación de código para resolver distintos proyectos de computación cuántica. Entre los problemas a atacar (lista no exclusiva ni ordenada) se encuentran: 1) desigualdades de Bell; 2) generación cuántica de números aleatorios; 3) codificado superdenso; 4) teleportación cuántica; 5) algoritmo de búsqueda de Grover; 6) algoritmo de factorización de Shor; 7) algoritmo HHL para sistemas lineales; 8) transformada de Fourier cuántica; 9) distribución cuántica de llaves.</li> </ul> <p><b>Contents common to all courses:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Elements of quantum computation: qubits and multiqubits.</i></li> <li>- <i>Quantum gates and circuits.</i></li> <li>- <i>Quantum algorithms.</i></li> </ul>				

**Contents specific to each course:**

Quantum computing:

- Elements of classical computing: bits and memory, circuits, wires and gates (1-bit, 2-bit, n-bits). Complexity (NP vs P).
- Elements of quantum computation: qubits and multiqubits. No-cloning theorem. Entangled states. Bell states and Bell's inequalities.
- Quantum gates (Hadamard, Pauli, CNOT, SWAP, etc.)
- Quantum circuits.
- Solovay-Kitaev theorem.
- Quantum algorithms. Deutsch and Deutsch-Joza algorithms. Grover's search algorithm. Quantum Fourier transform. Shor's factorization algorithm.
- Simulation of quantum systems.
- Possible implementations of a future quantum computer (trapped ions, superconductors, quantum dot arrays, optical cavities QED, etc.)

Laboratory on quantum computing:

- Introduction to Python and IBM Qiskit.
- Generation of code to address several important problems in quantum computation. Among these problems students will study (non-exclusive list): 1) Bell inequalities; 2) quantum generation of random numbers; 3) superdense coding; 4) quantum teleportation; 5) Grover's search algorithm; 6) Shor's integer factorization algorithm; 7) HHL algorithm for linear systems; 8) quantum Fourier transform; 9) quantum key distribution.

<b>MATERIA 5</b>				
Denominación: <b>Sensores cuánticos y metrología cuántica/Quantum sensing and quantum metrology</b>				
<b>Listado de Asignaturas de la materia</b>				
<b>Asignatura</b>	<b>Créditos</b>	<b>Cuatrim</b>	<b>Carácter</b>	<b>Idioma</b>
Sensores y sistemas clásicos de instrumentación /Sensors and classical measurement instrumentation systems	3	1	O	Inglés
Metrología cuántica/Quantum metrology	3	2	O	Inglés
Sensores cuánticos/Quantum sensing	3	2	O	Inglés
<b>Descripción de contenidos</b>				
<p><b>Temas comunes a las asignaturas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensores e instrumentos-de medida.</li> <li>- Límites físicos (clásicos y cuánticos) de los procesos de medida.</li> </ul> <p><b>Temas específicos de cada asignatura:</b></p> <p><u>Sensores y Sistemas Clásicos de instrumentación .-</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Revisión de los componentes fundamentales de un sistema de instrumentación de medida: sensores, acondicionamiento de la señal, muestreo, adquisición de datos.</li> <li>- Límites clásicos impuestos por la Física en la resolución y precisión de medidas. Influencia de los esquemas de acondicionamiento y adquisición de datos en la resolución y precisión de las medidas: ruido termodinámico (térmico) y ruido de cuantización (shot)</li> <li>- Sistemas de instrumentación avanzados</li> </ul> <p><u>Metrología cuántica.-</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fundamentos: proceso de estimación y estimadores. Información de Fisher y límite de Cramer-Rao clásicos y cuánticos. Límite cuántico standard, entrelazado y límite de Heisenberg. Comparación con los límites clásicos.</li> <li>- Problema de estimación de fase. Esquemas para la generación de estados cuánticos sensibles a la fase (estados coherentes, estados comprimidos ("squeezed"), etc.)</li> <li>- Protocolos de estimación adaptativa. Metrología cuántica multiparamétrica.</li> <li>- Metrología cuántica y los estándares de medida. Definición del segundo: relojes atómicos. Definición del voltio: unión Josephson. Definición del amperio: efecto túnel cuántico.</li> </ul> <p><u>Sensores cuánticos.-</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Introducción y ejemplos de sensores cuánticos.</li> <li>- Relojes cuánticos y aplicaciones: geodesia, navegación, etc.</li> <li>- Medidas cuánticas de campos eléctricos y magnéticos, medidas de temperatura y presión.</li> <li>- Sensores cuánticos superconductores. Medida de campos magnéticos con SQUID. Contaje de fotones con SNSPD.</li> </ul> <p><b>Contents common to all courses:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Sensors and measurement instrumentation</li> <li>Quantum and classical limits associated to measurement processes.</li> </ul>				

**Contents specific to each course:**

Sensors and Classical Instrumentation Systems.-

- Review of components of measurement instrumentation systems: sensors, data conditioning, sampling, data acquisition.
- Classical limits of measurement resolution and precision. Influence of conditioning and data acquisition schemes on measurement resolution and precision: thermodynamic (thermal) and quantization (shot) noises.

Quantum Metrology.-

- Fundamentals: Estimation process and estimators. Classical and quantum Fisher information and Cramer-Rao. Standard quantum limit, entanglement and Heisenberg limit.
- Phase estimation problem. Schemes for the generation of phase sensitive quantum states (coherent states, squeezed states, etc.)
- Adaptive estimation protocols. Multiparameter quantum metrology.
- Quantum metrology and measure standards. Definition of second: atomic clocks. Definition of volt: Josephson junctions. Definition of ampere: quantum tunneling.

Quantum sensing.-

- Introduction and examples of quantum sensors.
- Atomic clocks and applications to geodesics, navigation, etc.
- Quantum measurement of electric and magnetic fields. Quantum measurement of temperature and pressure.
- Superconducting quantum sensors. Measurement of magnetic fields with SQUIDs. Photon counting with SNSPD.

## MATERIA 6

Denominación: **Información y comunicaciones cuánticas/Quantum information and communications**

### Listado de Asignaturas de la materia

Asignatura	Créditos	Cuatrim	Carácter	Idioma
Información y Comunicaciones pre-cuánticas/ <i>Pre-quantum information and communication</i>	3	1	O	Inglés
Información y Comunicaciones cuánticas/ <i>Quantum information and communication</i>	6	2	O	Inglés

### Descripción de contenidos

#### Temas comunes a las asignaturas:

- Teoría de la información
- Teoría de la comunicación
- Sistemas de comunicaciones
- Efecto del ruido en sistemas de comunicaciones

#### Temas específicos de cada asignatura:

##### Información y Comunicaciones clásicas-pre-cuánticas

- Evolución histórica de los elementos fundamentales y el modelado probabilístico de sistemas de comunicaciones pre-cuánticos
- Nueva teoría de la información: medidas de información, límites de la teoría de Shannon, información cuántica.
- Evolución de las técnicas de modulación, codificación y decodificación de sistemas pre-cuánticos a cuánticos.

##### Información y Comunicaciones cuánticas.-

- Información cuántica y sus medidas (entropía conjunta e información mutua).
- Canales cuánticos. Ruido cuántico. Representación de Kraus de canales cuánticos.
- Transmisión de información clásica en canales cuánticos. Capacidad de Holevo.
- Transmisión de información cuántica sobre canales cuánticos. Capacidad cuántica. Entrelazamiento. Corrección de errores cuánticos.
- Sistemas de comunicaciones cuánticos. Sistemas de comunicación óptica (detección óptica, contaje de fotones).
- Teoría de decisión cuántica. Análisis y optimización de un sistema de comunicaciones cuántico con estados puros. Medidas SRM ("squared-root measurements").
- Modulaciones cuánticas (OOK, BPSK, QAM, PSK y PPM). Comunicaciones cuánticas con estados comprimidos ("squeezed states").

#### **Contents common to all courses:**

- *Information theory*
- *Communication theory*
- *Communication systems*
- *Noise and communication systems*

**Contents specific to each course:**

Pre-quantum information and communication.-

- Evolution of the elements and probabilistic modeling of pre-quantum communication systems.
- Modern information theory: information measures, limits of Shannon's theory and quantum information.
- Evolution from pre-quantum to quantum communication systems of techniques for data modulation, coding and decoding.

Quantum information and communication.-

- Quantum information measures (joint entropy and mutual information).
- Quantum channels. Quantum noise. Kraus representation of quantum channels.
- Transmission of classical information over quantum channels. Holevo's capacity.
- Transmission of quantum information over quantum channels. Quantum capacity. Entanglement. Quantum error correction.
- Quantum communication systems. Optical communication systems (optical detection, photon counting).
- Quantum decision theory. Analysis and optimization of a quantum communication system with pure states. Squared-root measurements (SRM).
- Quantum modulations (OOK, BPSK, QAM, PSK and PPM). Quantum communications with squeezed states.

**MATERIA 7**

Denominación: **Internet cuántica y criptografía cuántica/Quantum internet and quantum cryptography**

**Listado de Asignaturas de la materia**

Asignatura	Créditos	Cuatrim	Carácter	Idioma
Sistemas de redes de ordenadores seguros/ <i>Secure computer network systems</i>	3	1	O	Inglés
Internet cuántica y criptografía cuántica cuántica/ <i>Quantum internet and quantum cryptography</i>	6	2	O	Inglés

**Descripción de contenidos**

**Temas comunes a las asignaturas:**

- Sistemas de redes de comunicaciones e Internet
- Evolución de arquitecturas de sistemas de protocolos
- Evolución de la ciberseguridad en redes de comunicaciones

**Temas específicos de cada asignatura:**

Sistemas de Redes de Ordenadores Seguros.-

- Arquitectura y protocolos de los sistemas de redes de ordenadores
- Despliegue y configuración de un sistema de redes de ordenadores
- Riesgos de seguridad en sistemas de redes de ordenadores
- Despliegue de soluciones ciberseguras
- Ciberseguridad en redes de ordenadores

Internet cuántica y criptografía cuántica.-

- Fundamentos cuánticos de la Internet cuántica
- Redes cuánticas: sistemas finales, líneas de comunicación, conmutadores y encaminadores
- Arquitectura de protocolos en redes cuánticas
- Internet cuántica
- Fundamentos y aplicaciones de la criptografía cuántica: distribución de claves
- Criptografía post cuántica
- Aplicaciones de la Internet cuántica

**Contents common to all courses:**

- *Communication networks systems and Internet*
- *Evolution of the architecture of protocol systems*
- *Evolution of cybersecurity in communication networks*

**Contents specific to each course:**

Secure Computer Network Systems.-

- *Systems and protocols of computer network systems*
- *Deployment and setup of computer network systems*
- *Security risks in computer network systems*

- *Deployment of cybersecure solutions*
- *Cybersecurity in computer network systems*

Quantum Internet and Quantum Cryptography

- *Quantum foundations of the Quantum Internet*
- *Quantum networks: end systems, communication lines, switches and routers*
- *Protocol architecture in quantum networks*
- *Quantum Internet*
- *Fundamentals and applications of quantum cryptography: key distribution*
- *Post-quantum cryptography*
- *Applications of the quantum Internet*

**MATERIA 8**

Denominación: **Optativas/Electives**

**Listado de Asignaturas de la materia**

Asignatura	Créditos	Cuatrim	Carácter	Idioma
Control Cuántico/ <i>Quantum control</i>	3	OP	2	1
Matemáticas para mecánica cuántica/ <i>Mathematics for quantum mechanics</i>	3	OP	2	1
Fundamentos matemáticos de la información y tecnologías cuánticas/ <i>Mathematical foundations of quantum information and technologies</i>	3	OP	2	1
Teoría de la información de longitud finita para sistemas cuánticos/ <i>Finite-length information theory for quantum systems</i>	3	OP	2	1
Redes neuronales cuánticas/ <i>Quantum neural networks</i>	3	OP	2	1
Aprendizaje automático cuántico/ <i>Quantum machine learning</i>	3	OP	2	1
Lógica cuántica y procesamiento de información/ <i>Quantum logic and information processing</i>	3	OP	2	1
Radars cuánticos/ <i>Quantum radar</i>	3	OP	2	1
Materiales cuánticos/ <i>Quantum materials</i>	3	OP	2	1
Transporte cuántico y nanodispositivos/ <i>Quantum transport and nanodevices</i>	3	OP	2	1
Dispositivos nanoelectrónicos/ <i>Nanoelectronic devices</i>	3	OP	2	1
Detectores ópticos cuánticos/ <i>Quantum optical detectors</i>	3	OP	2	1
Sistemas cuánticos abiertos/ <i>Open quantum systems</i>	3	OP	2	1



Teoría de perturbaciones dependiente del tiempo/ <i>Time-dependent perturbation theory</i>	3	OP	2	1
Métodos numéricos para mecánica cuántica/ <i>Numerical methods for quantum mechanics</i>	3	OP	2	1
Implementaciones de estado sólido de tecnologías cuánticas/ <i>Solid-state implementations of quantum technologies</i>	3	OP	2	1
Nanofotónica cuántica/ <i>Quantum nanophotonics</i>	3	OP	2	1
Fenómenos emergentes en materia cuántica/ <i>Emergent phenomena in quantum matter</i>	3	OP	2	1
Aplicaciones de la computación cuántica a sectores industriales y económicos/ <i>Applications of quantum computing to industrial and economic sectors</i>	3	OP	2	1
Tecnologías cuánticas e ingeniería aeroespacial/ <i>Quantum technologies and aerospace engineering</i>	3	OP	2	1
<b>Descripción de contenidos</b>				
<b>Temas comunes a las asignaturas:</b>				
No aplica. Se agrupan juntas al ser optativas.				
<b>Temas específicos de cada asignatura:</b>				
<u>Control cuántico.</u> - Teoría de control. Sistemas de control bilineales. Métodos variacionales. Control con ligaduras. Control estado-a-estado. Adiabaticidad. Control de subespacios. Control paramétrico. Método de Krotov. Aplicaciones: control molecular; RMN, trampas iónicas.				
<u>Matemáticas para mecánica cuántica.</u> - Espacios de Hilbert. Operadores y estados. Relaciones de conmutación y anticonmutación. Dimensiones finitas e infinitas. Medida y espectro. Simetrías. Evolución temporal de sistemas cuánticos. Ecuación de Schrödinger.				
<u>Fundamentos matemáticos de Información y Tecnologías Cuánticas.</u> - Estados cuánticos y medida. Matriz de densidad. Evolución cuántica. Canales cuánticos. Entrelazado cuántico y no-localidad.				
<u>Teoría de la información de longitud finita en sistemas cuánticos.</u> - Límites de rendimiento: codificación aleatoria; teoría de decisión óptima. Análisis asintótico: problema de codificación de canales; desviaciones grandes y exponentes de error; teorema central del límite y tasas de codificación de segundo orden. Evaluación de límites de rendimiento. Aplicaciones: canales con ruido Gaussiano y canales ópticos.				

Redes neuronales cuánticas.- introducción a las redes neuronales: perceptrones multicapa y propagación inversa. Modelos híbridos clásico-cuánticos: circuitos cuánticos paramétricos; funciones de pérdida y tareas de aprendizaje; optimización paramétrica. Redes neuronales cuánticas: modelos cuánticos para el perceptron; propagación inversa en redes cuánticas; tareas de aprendizaje clásicas y cuánticas.

Aprendizaje automático cuántico.- Fundamentos de aprendizaje automático. Tratamiento de grandes conjuntos de datos. Aprendizaje supervisado: regresión clásica y cuántica (HHL); máquinas de soporte vectorial clásicas y cuánticas ("kernels"); redes neuronales clásicas y cuánticas. Aprendizaje no-supervisado: reducción de dimensiones clásica y cuántica (descomposición en valores principales & autocodificadores); agrupaciones. Aprendizaje reforzado clásico y cuántico.

Lógica cuántica y el procesado de información.- Fundamentos de lógica cuántica. Aplicaciones al procesado de información. Implementación en computadores cuánticos.

Radars cuánticos.- Teoría del radar clásico: ecuaciones básicas; papel del ruido; interferencias de radar; sección eficaz de radar. Teoría del radar cuántico: sensibilidad y resistencia a la interferencia; sensores cuánticos de "standoff"; realizaciones físicas del radar cuántico; sección eficaz del radar cuántico.

Materiales cuánticos.- Magnetismo. Materiales multi-ferroicos. Sistemas de spin. Superconductividad. Técnicas experimentales de caracterización de sistemas cuánticos. Materiales cuánticos más importantes (óxidos complejos, sistemas moleculares y orgánicos; superconductores basados en hierro, etc.)

Transporte cuántico y nanodispositivos.- descripción semi-clásica del transporte electrónico. Ecuación de difusión-deriva en el límite de pequeños desplazamientos libres. Cierres de máxima entropía. Aplicación a sistemas de baja dimensión: grafeno y nanotiras de grafeno. Transporte cuántico, ecuaciones de Wigner y funciones de Green fuera del equilibrio.

Dispositivos nanoelectrónicos.- Dispositivos nanoelectrónicos y mecánica cuántica. Técnicas de fabricación. Dispositivos nanoelectrónicos basados en nanotubos de carbón. Electrónica basada en grafeno. Lógica nanoeléctrica y procesado de información. Sensores nanoelectrónicos y redes de sensores. Electrónica molecular.

Detectores ópticos cuánticos.- Pozos cuánticos y detectores de cascada cuánticos. Fotodetectores basados en puntos cuánticos para radiación infrarroja y ultravioleta. Células solares de punto cuántico. Integración de detectores cuánticos en circuitos fotónicos. Metasuperficies y detectores cuánticos. Papel de las nanoestructuras para aumentar la eficiencia de detectores y celdas solares.

Sistemas cuánticos abiertos.- Disipación markoviana. Termodinámica cuántica (calor, trabajo, temperatura, termalización y entropía). Leyes y principios de la termodinámica cuántica. Máquinas térmicas: ciclos de Otto y Diesel. Refrigeradores y motores cuánticos. Implementación física.

Teoría de perturbaciones dependientes del tiempo.- Perturbaciones constantes y sinusoidales. Acoplamiento entre estados discretos: fórmula de Rabi. Interacción de un átomo con una onda electromagnética. Acoplamiento con estados del espectro continuo. Regla de oro de Fermi.

Métodos numéricos para mecánica cuántica.- Propagadores de Schrödinger: Runge-Kutta, métodos de "splitting"; Chebyshev; métodos variacionales. Estado de producto de matrices. Grupo de renormalización para la matriz de densidad. Monte Carlo. Aprendizaje automático.

Implementaciones de estado sólido de tecnologías cuánticas.- Puntos cuánticos. Semiconductores. Circuitos cuánticos superconductores. Moléculas magnéticas. Sistemas híbridos.

Nanofotónica cuántica.- Fotónica no-lineal. Técnicas de nanofabricación. Interferometría clásica y cuántica. Circuitos fotónicos integrados. Resonadores ópticos y cavidades fotónicas. Optomecánica. Plasmónica y metamateriales. Centros de color y emisores de fotón único. QED macroscópica. Nanofotónica cuántica en una y dos dimensiones.

Fenómenos emergentes en materia cuántica.- Introducción a las correlaciones altas: líquidos de Fermi y de no-Fermi; Modelos de Hubbard y física de Mott; separación de carga de spin y líquidos de Luttinger; efecto Kondo; fases de simetría rota; materiales con altas correlaciones. Materiales topológicos cuánticos: grafeno y materiales de Dirac; aislantes topológicos y semimetales; superconductividad topológica. Desorden y localización. Aplicaciones de materia cuántica.

Aplicaciones de la computación cuántica a contextos industriales y económicos.- Optimización clásica y cuántica: aplicaciones a finanzas (seguimiento de índices, optimización de portafolios, etc.); aplicaciones a logística (empaquetado, distribución,..). Algoritmos clásicos y cuánticos para la simulación estadística: aplicación a la simulación de activos financieros y productos derivados.; estimación de riesgos. Algoritmos cuánticos para optimización, simulación y aprendizaje automático.

Tecnologías cuánticas e ingeniería aeroespacial.- Introducción al entorno del espacio y los sistemas espaciales (montaje, integración, pruebas). Sistemas de comunicación cuántica aeroespacial: emisores y receptores. Montaje y técnicas experimentales de sistemas aeroespaciales cuánticos: adquisición, apuntado y seguimiento en el espacio; distribución cuántica de llaves, entrelazado y teleportación.

**Contents common to all courses:**

*Does not apply. These courses are grouped together only because of their elective nature.*

**Contents specific to each course:**

Quantum control.- *Control theory. Bilinear control systems. State-to-state control. Adiabaticity. Variational methods. Subspace control. Parametric control. Krotov method. Applications: molecular control; RMN, ion traps.*

Mathematics for quantum mechanics.- *Hilbert spaces. Operators and states. Commutation and anti-commutation relations. Finite vs infinite dimensions. Measurement and spectrum. Symmetries. Temporal evolution of quantum systems. Schrödinger's equation.*

Mathematical foundations of Quantum Information and Technologies.- *Quantum states and measurement. Density matrix. Quantum evolution. Quantum channels. Quantum entanglement. Nonlocality.*

Finite length information theory for quantum systems.- *Performance bounds: random coding; optimal decision theory. Asymptotic analysis: channel coding problem; large deviations and error exponents; central limit theorem and second order coding rates.*

Quantum neural networks.- *Introduction to neural networks: multilayer perceptrons and reverse propagation. Classical-quantum hybrid models: parametric quantum circuits; loss functions and learning tasks; classical neural networks for parameter optimization. Quantum neural networks (QNN): quantum models for perceptrons; backpropagation; QNN for classical and quantum learning tasks.*

Quantum machine learning.- *Basics of machine learning. Large data sets. Supervised learning: classical and quantum (HHL algorithm) regression; classical and quantum vector support machines (kernel methods); classical and quantum neural networks. Unsupervised learning: classical and quantum dimensionality reduction (principal value decomposition; autoencoders); clustering. Classical and quantum reinforcement learning.*

Quantum logic for information processing.- *Fundamentals of quantum logic. Applications to information processing. Implementations on quantum computers.*

Quantum radar.- *Classical radar theory: concepts, basic equations; role of noise; radar jamming; radar cross section. Quantum radar theory: jamming robustness and*

*sensitivity; standoff quantum sensors; physical realization of a quantum radar; quantum radar cross section.*

*Quantum materials.- Magnetism. Multiferroics. Spin systems. Superconductivity. Experimental techniques for the characterization of quantum systems. Quantum materials (complex oxides, organic and molecular systems; iron-based superconductors,...)*

*Quantum transport and nanodevices.- semiclassical model for electronic transport. Drift-diffusion equation for small mean free path. Maximum entropy closures. Application to low dimensional systems: graphene and graphene nanoribbons. Quantum transport via Wigner equations and non-equilibrium Green functions.*

*Nanoelectronic devices.- Nanoelectronic devices and quantum mechanics. Fabrication techniques. Nanoelectronic devices based on carbon nanotubes. Graphene electronics. Nanoelectronic logic and information processing. Nanoelectronic sensors and sensor arrays. Molecular electronics.*

*Quantum optical detectors.- Quantum well and quantum cascade detectors. Photodetectors based on quantum dots for IR and UV detection. Quantum dot solar cells. Integration of quantum detectors in photonic circuits. Metasurfaces for quantum detectors. Use of nanostructures to boost efficiency of quantum detectors and solar cells.*

*Quantum open systems.- Markovian dissipation. Quantum thermodynamics (heat, work, temperature, thermalization and entropy). Laws and principles of quantum thermodynamics. Thermal machines: Otto and Diesel cycles. Quantum refrigerators and engines. Physical implementation.*

*Time-dependent perturbation theory.- Constant and sinusoidal perturbations. Coupling between discrete states: Rabi's formula. Interaction of an atom with an electromagnetic wave. Coupling with continuum spectrum states: Fermi's Golden rule.*

*Numerical methods for quantum mechanics.- Schrodinger's propagators: Runge-Kutta; split operator method; Chebyshev; variational methods. Matrix product state (MPS). Density matrix renormalization group (DMRG). Monte Carlo. Machine learning.*

*Solid-state implementation of quantum technologies.- Quantum dots. Semiconductors. Quantum superconductor circuits. Magnetic molecules. Hybrid systems.*

*Quantum nanophotonics.- Nonlinear photonics. Nanofabrication techniques. Classical and quantum interferometry. Integrated photonic circuits. Optical resonators and photonic cavities. Optomechanics. Plasmonics and metamaterials. Color centers and*

*single photon emitters. Macroscopic QED. Quantum nanophotonics in one and two dimensions.*

*Emergent phenomena in quantum matter.- introduction to strong correlations: Fermi vs. non-Fermi liquids; Hubbard models and Mott physics; spin-charge separation and Luttinger liquids; Kondo effect; materials with strong correlations. Topological quantum matter: graphene and Dirac materials; topological insulators and semimetals; topological superconductivity. Disorder and localization. Applications of quantum matter.*

*Applications of quantum computing to economic and industrial sectors.- classical and quantum optimization: applications to finance (index tracking, portfolio optimization,...); applications to logistics (routing, packaging, ...). Classical and quantum algorithms for statistical simulations: applications to the simulation of financial assets and derivative products. Risk assessment. Quantum algorithms for optimization, simulation and machine learning.*

*Quantum Technologies and Aerospace Engineering.- Introduction to the space environment and space systems (setup, integration and testing). Aerospace quantum telecommunication systems (emitters and receivers). Setup and experimental techniques of quantum aerospace systems: acquisition, pointing and tracking (APT) in space; quantum key distribution, entanglement and teleportation.*

<b>MATERIA 10</b>				
Denominación: <b>Prácticas Externas/Internships</b>				
<b>Listado de Asignaturas de la materia</b>				
<b>Asignatura</b>	<b>Créditos</b>	<b>Cuatrim</b>	<b>Carácter</b>	<b>Idioma</b>
Prácticas externas/ <i>Internships</i>	12	3	OP	Castellano/Inglés
<b>Descripción de contenidos</b>				
<p><b>Temas comunes a las asignaturas:</b>            No aplica al ser una asignatura única.</p> <p><b>Temas específicos de cada asignatura:</b>  <u>Prácticas externas.-</u>  <i>Prácticas llevadas a cabo por los estudiantes en empresas privadas o en centros de investigación públicos o privados de reconocido prestigio en temas relacionados con las tecnologías cuánticas, tanto en lo que tiene que ver con su investigación, diseño, desarrollo o implantación.</i></p> <p><b>Contents common to all courses:</b>  <i>Does not apply since there is only one course.</i></p> <p><b>Contents specific to each course:</b>  <u>Internships.- student can enroll in an</u> <i>internship to be done in either a private company or a public/private research laboratory working in the field of quantum technologies. During them, students may be involved in research, design, development or deployment of quantum technologies in various sectors of industrial and/or economic interest.</i></p>				

## MATERIA 9

Denominación: **Trabajo Fin de Master / Master Thesis**

### Listado de Asignaturas de la materia

Asignatura	Créditos	Cuatrim	Carácter	Idioma
Trabajo Fin de Master / Master Thesis	12	1	O	Inglés

### Descripción de contenidos

El trabajo de Fin de Máster será realizado por el estudiante de forma individual y se organizará en torno a una aplicación o desarrollo específico de una tecnología cuántica en el contexto de un problema o desafío científico o ingenieril.

Se organizará anualmente una oferta suficientemente amplia de TFM's en el ámbito de las tecnologías cuánticas a realizar en los departamentos de la UC3M involucrados en el mismo, en el CSIC, así como en aquellas empresas o centros de investigación que establezcan una relación formal con el máster a este efecto. Lo/as alumno/as de segundo año del master podrán solicitar aquellos TFM's que más se alineen con su interés particular, siendo adjudicados los mismos en razón del expediente académico obtenido en el primer curso. Será posible también la realización de TFM's fuera de este esquema de adjudicación previa aprobación del/a director/a de la titulación de un proyecto del ámbito de las tecnologías cuánticas diseñado y pre-acordado por un/a alumno/a junto a un/a tutor/a.

Una vez adjudicado el TFM, se proporcionará al alumno/a orientación y seguimiento del mismo.

Entre las tareas que comprende esta actividad por parte del estudiante se contemplan:

- Recopilación y análisis de información relativa al Trabajo Fin de Máster
- Desarrollo del Trabajo Fin de Máster
- Elaboración de la Memoria
- Defensa individual del Trabajo Fin de Máster

*The Master's Thesis is organized around a specific application or development of a quantum technology carried out by the student individually in the context of a scientific or engineering problem or challenge.*

*A list containing a sufficiently large number of projects deemed suitable for a Master Thesis will be collected and made known to the students every year. These projects could be carried out either in any of the UC3M Departments involved in the program, at CSIC or at private companies or research centers that agree with the program directorship to serve as hosts. Students will be able to elect among these projects according to their preferences and interest. Projects will finally be awarded in the order dictated by the students' academic performance of the previous year. In addition, specific projects proposed by a student-tutor tandem may also be allowed if specifically approved by the director of the program. All students will be provided with guidance and follow-up sessions throughout the Master Thesis.*

*Among the tasks to carry out by the student it is included:*

- *Compilation and analysis of information related to the Master's Thesis*
- *Development of Master's Thesis*
- *Preparation of the Final Document*
- *Individual defense of the Master's Thesis*