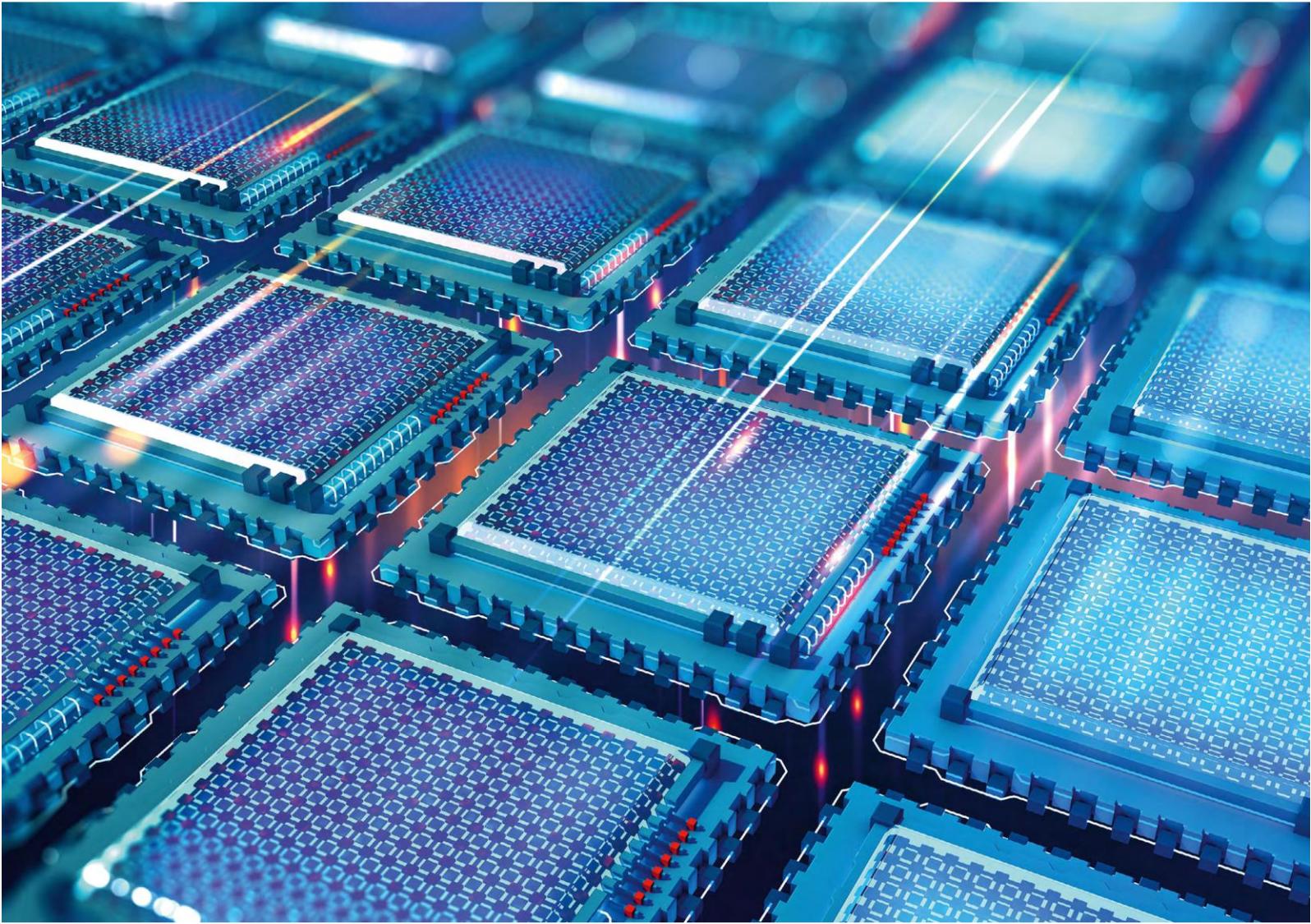


Funded by the
European Union



QUANTUM
FLAGSHIP



Marco de competencias para las tecnologías cuánticas

Elaborado por Franziska Greinert y Rainer Müller

Versión 1.0 (Mayo 2021)

Traducido al español por **AMETIC**

Ameti^c
LA VOZ DE LA INDUSTRIA DIGITAL

aniversario **50**
1973 - 2023



Este marco forma parte de un proyecto que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud de un acuerdo de subvención.

No 951787.



© Unión Europea, 2021

La política de reutilización de los documentos de la Comisión Europea se aplica mediante la Decisión 2011/833/UE de la Comisión, de 12 de diciembre de 2011, relativa a la reutilización de los documentos de la Comisión (DO L 330 de 14.12.2011, p. 39).

A menos que se indique lo contrario, la reutilización de este documento está autorizada bajo la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Esto significa que se permite la reutilización, siempre que se otorgue el crédito apropiado y se indique cualquier cambio.

La traducción al español ha sido realizada por AMETIC.

Versión 1.0 (mayo de 2021) compilada por Franziska Greinert y Rainer Müller

QTEdu: Acción de coordinación y apoyo a la educación en tecnología cuántica del emblemático europeo de la tecnología cuántica

Foto de portada: ©Siarhei – stock.adobe.com

Resumen y estructura general

Cómo utilizar el marco de competencias	5
1. CONCEPTOS DE FÍSICA CUÁNTICA	7
1.1. CONCEPTOS BÁSICOS	7
1.2. FORMALISMOS MATEMÁTICOS	7
1.3. DINÁMICA DE LA QUBITS	8
2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS	9
2.1. LA FÍSICA ATÓMICA COMO BASE PARA LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS	9
2.2. ÓPTICA CUÁNTICA COMO BASE PARA LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS	9
2.3. FÍSICA DE ESTADO SÓLIDO COMO BASE PARA LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS	9
3. TECNOLOGÍAS HABILITADORAS	10
3.1. TECNOLOGÍAS ÓPTICAS	10
3.2. TECNOLOGÍAS DE ESTADO SÓLIDO	10
3.3. TECNOLOGÍAS DE LABORATORIO	10
3.4. CONTROL EXPERIMENTAL	10
4. HARDWARE PARA ORDENADORES CUÁNTICOS Y SENSORES	11
4.1. DISPOSITIVOS SUPERCONDUCTORES	11
4.2. DISPOSITIVOS DE BASE SPIN	11
4.3. ÁTOMOS E IONES NEUTRALES	11
4.4. CONCEPTOS EMERGENTES SOBRE QUBITS	11
4.5. SISTEMAS FOTÓNICOS	11
4.6. HARDWARE PARA LA INICIALIZACIÓN, MANIPULACIÓN Y LECTURA DE QUBITS	11
4.7. USO DE PLATAFORMAS HARDWARE PARA COMPUTACIÓN CUÁNTICA	11
5. COMPUTACIÓN Y SIMULACIÓN CUÁNTICA	12
5.1. PUERTAS CUÁNTICAS	12
5.2. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN CUÁNTICOS Y HERRAMIENTAS	12
5.3. ALGORITMOS CUÁNTICOS Y TÉCNICAS DE COMPUTACIÓN	12
5.4. ERRORES DE CONEXIÓN CUÁNTICOS	12
5.5. SIMULACIÓN CUÁNTICA	12
6. SENSORES CUÁNTICOS Y METROLOGÍA	13
6.1. SENSORES DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	13
6.2. SENSORES DE TEMPERATURA, PARTÍCULAS Y PRESIÓN	13
6.3. DETECCIÓN INERCIAL Y GRAVITATORIO	13
6.4. IMAGEN CUÁNTICA	13
6.5. RELOJES ATÓMICOS	13
6.6. CAMPOS DE APLICACIÓN PARA LOS SENSORES CUÁNTICOS	13

6.7.	INTEGRACIÓN DE SENSORES Y DETECCIÓN HÍBRIDA	14
7.	COMUNICACIÓN CUANTICA	15
7.1.	CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA	15
7.2.	REDES CUÁNTICAS	15
7.3.	INFRAESTRUCTURA PARA LA COMUNICACIÓN CUÁNTICA	15
7.4.	HARDWARE PARA LA COMUNICACIÓN CUÁNTICA	15
8.	COMPETENCIAS PRÁCTICAS Y HABILIDADES BLANDAS	16
8.1.	COMPETENCIAS PRÁCTICAS/EXPERIMENTALES	16
8.2.	PROGRAMACIÓN CLÁSICA	16
8.3.	COMPETENCIAS DE GESTIÓN Y LIDERAZGO	16
8.4.	CONOCIMIENTO DE PROCESOS INDUSTRIALES	16
8.5.	CONEXIÓN DE LAS TQ CON APLICACIONES Y CASOS DE USO	16
8.6.	COMPETENCIAS DOCENTES Y DE DIVULGACIÓN	16
8.7.	COMPETENCIAS EN CREACIÓN DE REDES Y DE COMUNICACIÓN	16
8.8.	INVESTIGACIÓN ÉTICA, INVESTIGACIÓN RESPONSABLE E INNOVACIÓN	16
8.9.	CONOCIMIENTO DE PROPIEDAD INTELECTUAL, ESTANDARIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN	16

Cómo utilizar el marco de competencias

El Marco Europeo de Competencias para las Tecnologías Cuánticas tiene como objetivo trazar el panorama de las posibles competencias y habilidades en Tecnologías Cuánticas. Ha sido elaborado por el CSA QTedu para facilitar la planificación y el diseño de proyectos de educación y formación en tecnologías cuánticas.

El marco de competencias consta de siete campos principales. Estos esbozan la estructura general de las tecnologías cuánticas:

1. CONCEPTOS DE FÍSICA CUÁNTICA

Cada uno de estos campos principales tiene varios subcampos, p. ej.:

- 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS
- 1.2 FORMALISMOS MATEMÁTICOS
- 1.3 DINÁMICAS DE LOS QUBITS

En la primera página de este documento se muestran los campos y subcampos principales en un esquema gráfico. Para cada subcampo hay una página adicional con más detalles:

- 1.1. CONCEPTOS BÁSICOS
 - Superposición, interferencia
 - Evolución temporal unitaria
 - Ecuación de Schrödinger
 - Cuantificación de la energía, estados ligados
 - Tunelización

Dependiendo del público al que se dirija, cada agente educativo ofrecerá un nivel diferente de profundidad y dificultad. Para reflejar esto, el Marco de Competencias tiene una dimensión adicional que no se muestra en los gráficos. Para cada entrada, se puede especificar un nivel de competencia: de A1 (Conocimiento) a C2 (Innovación). Este esquema se desarrolló para el Marco de Referencia Europeo de las Lenguas; también se utiliza, por ejemplo, en el marco de trabajo europeo DigCompEdu para las competencias digitales. El uso de niveles de competencia facilita la adaptación de la educación y la formación a las necesidades de los grupos destinatarios.

A1 Conciencia

A2 Exploración

B1 Integración

B2 *Expertise*

C1 Liderazgo

C2 Innovación



El marco de competencias ha sido elaborado por el equipo de QTedu con un enfoque bottom-up. Entre el verano de 2020 y la primavera de 2021 realizamos un estudio Delphi de tres rondas con muchos participantes de la comunidad de TQ. Los resultados se completaron mediante entrevistas a expertos en cada subcampo.

Las tecnologías cuánticas evolucionan rápidamente. Se desarrollarán nuevas tecnologías y otras perderán importancia. El Marco de Competencias tendrá que adaptarse en consecuencia. Así pues, el Marco de Competencias es un documento vivo que se actualizará periódicamente. Se aceptan sugerencias de adiciones y correcciones en cualquier momento.

1. CONCEPTOS DE FÍSICA CUÁNTICA

1.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Superposición, interferencia

Evolución temporal unitaria

Ecuación de Schrödinger

Cuantización de la energía, estados ligados

Tunelización

Medición cuántica

Carácter estadístico de la física cuántica

Dinámica de medición (reducción del estado)

Teorema de no clonación, información de estado incompleta a partir de la medición

Principio de Heisenberg, complementariedad

Decoherencia

Ejemplos sencillos de decoherencia (relajación, desfase, pérdida de fotones)

Decoherencia y acoplamiento al entorno

Enredo/no-localidad

Desigualdades de Bell

Estados de Bell

Teleportación cuántica, codificación superdense

1.2. FORMALISMOS MATEMÁTICOS

Fundamentos matemáticos

Álgebra lineal

(Lineal) ecuaciones diferenciales

Estadística Topología

Combinatoria

Espacio de estados, notación bra-ket

Operadores, vectores propios, valores propios

Comunicación, anticomunicación

Estados cuánticos puros y mixtos

Función de onda

Matriz de densidad

Teoría perturbacional

Estados fotónicos/QED

Estados coherentes

Estados de fotón único

Sistemas cuánticos de muchos cuerpos

Principio de Pauli, fermiones, bosones

Cuantificación de campos

Sistemas compuestos

Sistemas cuánticos abiertos



Ecuación maestra de Lindblad

1.3. DINÁMICA DE LA QUBITS

Dinámicas de los sistemas de dos niveles

Ecuaciones de Bloch

Precesión de Larmor

Oscilaciones de Rabi

Desfase relajación

Sistemas de alto nivel (qudits)

Manipulación qubits

Esfera de Bloch

Manipulación de qubits con pulsos

Descripción matemática de la rotación de los qubits

2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

2.1. LA FÍSICA ATÓMICA COMO BASE PARA LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

- Transiciones hiperfinas y otras transiciones
- Niveles electrónicos y transiciones prohibidas
- Efecto Zeeman, efecto Stark
- Estado Rydberg
- Niveles vibracionales o rotacionales en moléculas
- Gases degenerados cuánticos y estadística cuántica

2.2. ÓPTICA CUÁNTICA COMO BASE PARA LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

- Interacciones de los fotones con los átomos y la materia
- Polarización de los grados de libertad
 - Esfera de Poincaré
- Agrupamiento, antiagrupamiento, estados comprimidos
- Aprendizaje automático cuántico

2.3. FÍSICA DE ESTADO SÓLIDO COMO BASE PARA LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

- Propiedades de estado sólido
 - Estructura de bandas
 - Transporte eléctrico
 - Propiedades ópticas
 - Semiconductores
- Superconductividad
 - Efecto Josephson
 - Dispositivos SQUID
- Nanoestructuras
 - Electrón de gas 2D
 - Puntos cuánticos
 - Nanocables
- Ciencia de materiales
 - Ciencia de superficies
- Fenómenos mesoscópicos
- Efectos topológicos



3. TECNOLOGÍAS HABILITADORAS

3.1. TECNOLOGÍAS ÓPTICAS

Óptica clásica

Láser

Fuentes de fotones individuales

Fuentes de fotones enredados

Sistemas de opto-electrónica y opto-mecánica

Detector de fotón único

Fotónica, fibras

3.2. TECNOLOGÍAS DE ESTADO SÓLIDO

Micro- y nanoelectrónica

SQIDs

3.3. TECNOLOGÍAS DE LABORATORIO

Tecnología de vacío

Criogenia

Electrónica

Microondas, tecnología RF

Enfriamiento láser

Estabilización láser

Análisis de ruido

Técnicas de protección

Tecnología de salas blancas

Micro- y nano estructuración

3.4. CONTROL EXPERIMENTAL

Software

Hardware

Algoritmos de control cuánticos

4. HARDWARE PARA ORDENADORES CUÁNTICOS Y SENSORES

4.1. DISPOSITIVOS SUPERCONDUCTORES

Tipos de qubits superconductores: charge, flux, transmon, fluxonium
Uniones Josephson para metrología

4.2. DISPOSITIVOS DE BASE SPIN

Centro NV
Puntos cuánticos semiconductores

4.3. ÁTOMOS E IONES NEUTRALES

Trampa iónica
Átomos de Rydberg
Gases cuánticos fríos
Red óptica

4.4. CONCEPTOS EMERGENTES SOBRE QUBITS

Qubits topológicos
Qubits spin-moleculares

4.5. SISTEMAS FOTÓNICOS

Redes ópticas lineales
Circuitos fotónicos integrados
Técnicas de muestreo bosónico

4.6. HARDWARE PARA LA INICIALIZACIÓN, MANIPULACIÓN Y LECTURA DE QUBITS

Microondas
Láseres
Resonadores (ej. Indicadores y puertas de qubits superconductores)
Conmutadores, desfasadores, retardadores

4.7. USO DE PLATAFORMAS HARDWARE PARA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Criterios de DiVicenzo
Limitaciones NISQ
Limitaciones específicas de plataforma
Integración, empaquetado y escalado
Evaluación corporativa
Middleware
Integración con hardware clásico

5. COMPUTACIÓN Y SIMULACIÓN CUÁNTICA

5.1. PUERTAS CUÁNTICAS

Puertas de qubit individuales
Dos o más puertas de qubit

5.2. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN CUÁNTICOS Y HERRAMIENTAS

Plataformas gráficas
Competencias de desarrollo de software
Lenguajes de programación

5.3. ALGORITMOS CUÁNTICOS Y TÉCNICAS DE COMPUTACIÓN

Algoritmo de Shor, búsqueda de subgrupos ocultos
Algoritmo de Grover, amplificación de amplitud
Algoritmos de optimización cuánticos
Aprendizaje automático cuántico
Herramientas
 Transformador de Fourier cuántico
 Estimación cuántica de fases
 Algoritmo de álgebra lineal cuántico
 Caminata cuántica
 Comercio electrónico
Otros algoritmos: visión general del zoo de algoritmos cuánticos

5.4. ERRORES DE CONEXIÓN CUÁNTICOS

Mecanismo de decoherencia física (desacoplamiento dinámico)
Mitigación de error
Código de corrección de errores cuánticos

5.5. SIMULACIÓN CUÁNTICA

Simuladores digitales cuánticos
Simuladores analógicos cuánticos y temple cuántico

6. SENSORES CUÁNTICOS Y METROLOGÍA

6.1. SENSORES DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Sensores de centro NV

Sensores de átomos Rydberg

Magnetómetros atómicos, OPM

Sensores superconductores (nanocables, uniones superconductores, detectores de inductancia cinética)

6.2. SENSORES DE TEMPERATURA, PARTÍCULAS Y PRESIÓN

Sensores basados en qubits de espín

Espectroscopia de precisión de gases sensores

Sensores optomecánicos

6.3. DETECCIÓN INERCIAL Y GRAVITATORIO

Sensores microelectromecánicos (MEMS)

Interferómetros atómicos

Sensores rotativos de nanopartículas

6.4. IMAGEN CUÁNTICA

Imágenes fantasmas, tomografía

Cámaras de fotón único, cámaras con ruido de subdisparo

Radar cuántico, LiDAR cuántico

6.5. RELOJES ATÓMICOS

Relojes de microondas

Relojes de fuente atómica

Relojes CPT

Relojes ópticos

Relojes de iones atrapados

Átomos neutros en redes ópticas

Relojes de lógica cuántica

Relojes nucleares

Relojes atómicos transportables

6.6. CAMPOS DE APLICACIÓN PARA LOS SENSORES CUÁNTICOS

Metrología a nivel cuántico

Definición de las unidades del SI

Medicina y biología molecular

Detección magnética de señales neuronales y cardíacas

Formación de imágenes (p. ej., células vivas)



Diagnóstico por microondas

Recursos naturales, ingeniería civil y vigilancia terrestre

Ingeniería civil

Prospecciones bajo tierra

Monitorización de Infraestructuras

Prospección de recursos naturales

Prevención de peligros naturales

Vigilancia de la Tierra

Transporte y navegación

Cronometraje preciso y detección de posición

Control en procesos industriales

Inspección en microelectrónica

Cronometraje y sincronización ultraprecisa

6.7. INTEGRACIÓN DE SENSORES Y DETECCIÓN HÍBRIDA

7. COMUNICACIÓN CUÁNTICA

7.1. CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA

Distribución de claves cuánticas

Autenticación segura, firmas digitales, almacenamiento seguro

Aplicación a casos de uso

Transacciones financieras

Registros sanitarios

Protección de infraestructuras críticas

Administración electrónica

Comercio electrónico

7.2. REDES CUÁNTICAS

Internet cuántico

Redes de sensores y relojes

7.3. INFRAESTRUCTURA PARA LA COMUNICACIÓN CUÁNTICA

Sistemas basados en fibra

Comunicación en el espacio libre

Sistemas por satélite

7.4. HARDWARE PARA LA COMUNICACIÓN CUÁNTICA

Generadores cuánticos de números aleatorios

Memoria cuántica, interfaces, conmutadores

Repetidores

Nodos finales

8. COMPETENCIAS PRÁCTICAS Y HABILIDADES BLANDAS

8.1. COMPETENCIAS PRÁCTICAS/EXPERIMENTALES

8.2. PROGRAMACIÓN CLÁSICA

- Lenguajes de programación
- Algoritmos clásicos
- Complejidad de clases
- Criptografía clásica
- Criptografía postcuántica

8.3. COMPETENCIAS DE GESTIÓN Y LIDERAZGO

- Visión general, potencia y limitaciones
- Impacto económico de las TQ
- Emprendimiento
- Diseño y desarrollo de proyectos

8.4. CONOCIMIENTO DE PROCESOS INDUSTRIALES

8.5. CONEXIÓN DE LAS TQ CON APLICACIONES Y CASOS DE USO

- Conocimientos en los campos de casos de uso
- Asignación de casos de uso a algoritmos cuánticos
- Reconocimiento de la ventaja cuántica
- Aplicación de la teoría de la complejidad

8.6. COMPETENCIAS DOCENTES Y DE DIVULGACIÓN

8.7. COMPETENCIAS EN CREACIÓN DE REDES Y DE COMUNICACIÓN

- Comunicación con expertos en los campos de aplicación
- Comunicación con los clientes

8.8. INVESTIGACIÓN ÉTICA, INVESTIGACIÓN RESPONSABLE E INNOVACIÓN

8.9. CONOCIMIENTO DE PROPIEDAD INTELECTUAL, ESTANDARIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN