

Asignatura: **Sistemas Ciberfísicos**

Código: 10-09816

RTF

8

Semestre: Noveno

- Ingeniería en Computación

Carga Horaria

80

Bloque: Tecnologías Aplicadas

Horas de Práctica

48

Departamento: Computación

Correlativas:

- Sistemas de Control 2

Contenido Sintético:

- Introducción a los sistemas ciberfísicos.
- Elementos de computación y de comunicación.
- Protocolos de comunicación en sistemas ciberfísicos.
- Internet de las cosas (IoT).
- Control y automatización.
- Interacción humano-máquina.
- Robótica y movilidad.
- Seguridad y privacidad.

Competencias Genéricas:

- CG1: Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.
- CG2: Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos).
- CG3: Gestionar -planificar, ejecutar y controlar- proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos).
- CG4: Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en ingeniería.
- CG5: Contribuir a la generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.
- CG10: Actuar con espíritu emprendedor.

Aprobado por HCD: 1042-HCD-2023

RES: Fecha: 27/11/2023

Competencias Específicas para la carrera de Ingeniería en Computación:

- CE4.3: Analizar, diseñar, programar, implementar, probar, depurar y evaluar hardware y software para sistemas de computación de propósitos específicos.
- CE4.4: Analizar, diseñar, programar, implementar, probar, depurar y evaluar hardware y software para sistemas de computación de propósitos generales.
- CE4.10 Analizar, interpretar, modelar, diseñar interfaces humano-máquina en sistemas de software y software-hardware optimizando la experiencia de usuario.
- CE4.11 Analizar, proyectar y desarrollar proyectos de software y sistemas conjuntos de hardware y software haciendo uso de conceptos, métodos y herramientas de gestión de proyectos, ingeniería de software, elicitación, análisis, especificación y validación de requerimiento.
- CE7.2.6 Diseñar circuitos impresos que integren componentes electrónicos y periféricos en un sistema embebido.
- CE7.2.7 Comprender, configurar y utilizar los protocolos de comunicación utilizados en sistemas embebidos.
- CE7.3.4: Diseñar y desarrollar sistemas que impliquen el uso de sensores y actuadores.
- CE7.3.6: Implementar, operar y mantener Sistemas Computarizados de automatización y control y sistemas conjuntos de hardware y software.

Presentación

La asignatura “Sistemas Ciberfísicos” pertenece al último año del plan de estudio de Ingeniería en Computación, situándose en el primer cuatrimestre del mismo como una materia integradora del trayecto recorrido por el estudiante. Este espacio curricular busca desarrollar la capacidad de aplicar de forma práctica conocimientos en áreas afines al software, el hardware y las comunicaciones en soluciones innovadoras que den respuesta a problemáticas actuales.

Los Sistemas Ciberfísicos (Cyber-Physical Systems o CPS, por sus siglas en inglés) son sistemas integrados que combinan componentes computacionales, comunicación y control con elementos físicos del mundo real. Los CPS permiten que los dispositivos y sistemas físicos se conecten, interactúen y se controlen a través de la computación y la comunicación, lo que los hace altamente inteligentes y adaptables. Estos sistemas pueden ser encontrados en una amplia variedad de aplicaciones, desde la industria manufacturera y la salud hasta el transporte y la energía:

- *Industria 4.0*: Los CPS son un pilar clave de la Industria 4.0, la cuarta revolución industrial. Son esenciales para la automatización de procesos industriales, el mantenimiento predictivo y la optimización de la producción.
- *IoT y Smart Cities*: Los dispositivos de Internet de las Cosas (Internet of Things o IoT, por sus siglas en inglés) y las ciudades inteligentes dependen de los CPS para la recopilación, análisis y toma de decisiones basadas en datos en tiempo real.
- *Salud y Medicina*: Los CPS se utilizan en dispositivos médicos avanzados, hospitales inteligentes y telemedicina para mejorar la atención médica y la calidad de vida.
- *Transporte Autónomo*: Los vehículos autónomos dependen de sistemas ciberfísicos para la navegación, el control y la toma de decisiones seguras.
- *Energía Sostenible*: Los CPS permiten una gestión eficiente y sostenible de la energía, incluyendo la generación distribuida y las redes eléctricas inteligentes.

El profesional de Ingeniería en Computación desempeña un papel esencial en el diseño, desarrollo y gestión de Sistemas Ciberfísicos. Su capacidad para integrar conocimientos en informática, comunicaciones y control le permite abordar desafíos críticos en la automatización industrial, la eficiencia energética, la atención médica avanzada y la movilidad inteligente entre otros. La creciente demanda de estos sistemas en la industria y la sociedad hace imperativo que los futuros profesionales en el campo de la Ingeniería en Computación transiten un curso dedicado a los sistemas ciberfísicos, que les brinde las herramientas necesarias para explorar y poner en práctica proyectos donde el mundo digital y el físico interactúen de forma innovadora y complementaria.

Contenidos

Unidad 1: Análisis de Sistemas Ciberfísicos

Origen de los Sistemas Ciberfísicos y su evolución. Importancia y aplicaciones de los Sistemas Ciberfísicos. Identificación de problemas y oportunidades en el mundo real.

Recopilación y análisis de datos relevantes. Especificación de requisitos funcionales y no funcionales. Análisis de procesos físicos y digitales en Sistemas Ciberfísicos. Documentación de resultados de análisis y especificaciones.

Unidad 2: Modelado de Sistemas Ciberfísicos

Modelado de componentes físicos y sus interacciones. Modelado de componentes lógicos y su integración. Uso de herramientas de simulación para Sistemas Ciberfísicos. Validación y verificación de modelos. Análisis de sensibilidad y escenarios de simulación. Interpretación de resultados de simulación. Documentación y presentación de modelos y resultados.

Unidad 3: Diseño de Sistemas Ciberfísicos

Diseño de arquitecturas para Sistemas Ciberfísicos. Selección de componentes y dispositivos adecuados. Integración de sensores y actuadores en el diseño. Definición de interfaces de comunicación. Elección de tecnologías de comunicación y protocolos. Diseño de sistemas de control y algoritmos. Planificación de la administración de energía y recursos. Evaluación de la escalabilidad y flexibilidad del diseño.

Unidad 4: Implementación de Sistemas Ciberfísicos

Programación de dispositivos y componentes. Desarrollo de software para Sistemas Ciberfísicos. Integración y ensamblaje de componentes. Implementación de algoritmos de control. Configuración de la comunicación entre dispositivos. Prototipado rápido y desarrollo iterativo de modelos. Pruebas unitarias y de integración. Monitoreo y gestión del sistema en tiempo real. Evaluación del desempeño y eficiencia del sistema.

Metodología de enseñanza

La asignatura se organiza mediante cuatro unidades didácticas que guían de forma progresiva al estudiante a través de las diferentes etapas necesarias para el desarrollo de los sistemas ciberfísicos: análisis, modelado, diseño e implementación. Cada unidad propone trabajar sobre una etapa durante un período de entre 3 y 5 semanas. La metodología de enseñanza propuesta integra el modelo de aula invertida, el aprendizaje basado en proyectos (ABP), el estudio de casos y el uso del aula virtual como complemento esencial a las clases semanales. Durante las clases presenciales se priorizará el aprendizaje a través del trabajo en grupos y la experimentación con diferentes tecnologías propuestas en las unidades, desarrollando algunos temas a través de exposiciones breves por parte del docente y del debate de diferentes casos de estudio moderados por el docente.

El curso propone al estudiante el desarrollo de un sistema ciberfísico, el cual es trabajado como proyecto de forma progresiva en cada una de las unidades didácticas del curso. Al finalizar cada unidad, el trabajo desarrollado por el estudiante es revisado y evaluado por el docente a los fines de poder continuar con la siguiente unidad.

La primera unidad consiste en una fase inicial de análisis que busca definir una solución a una problemática donde un sistema ciberfísico pueda ofrecer ventajas sobre soluciones tradicionales. En esta etapa se espera que el estudiante logre identificar las principales características de estos sistemas y pueda formular posibles soluciones basadas en estos a problemáticas actuales. Aun cuando ya existieran sistemas similares, se espera que el

estudiante pueda realizar un análisis propio y compararlo con las soluciones existentes, proponiendo mejoras o simplemente generando una propuesta independiente de las existentes. En una segunda etapa, se propone al estudiante modelar el sistema ciberfísico a través de diferentes herramientas que logren replicar su funcionamiento e interacción con la problemática bajo estudio. El uso de herramientas de simulación y/o emulación es trabajado para lograr este objetivo. En una tercera etapa el estudiante aborda el diseño del sistema considerando aspectos tecnológicos que la solución requiere y justificando sus decisiones. Este diseño es revisado y realimentado tanto por el docente como por sus pares, incentivando la colaboración y trabajo en grupo. Por último, la etapa final consiste en una demostración tecnológica del sistema a través de la implementación del mismo o de una parte. Dada la complejidad que estos sistemas pueden tener, esta etapa busca principalmente alcanzar la implementación de una prueba de concepto o eventualmente un prototipo del sistema.

Evaluación

La evaluación se estructura en base a un enfoque continuo e integrador, reflejando la naturaleza progresiva y acumulativa del aprendizaje basado en proyectos. La misma se organiza a través de la presentación de un informe de avance para cada una de las cuatro etapas de desarrollo del proyecto: análisis, modelado, diseño e implementación. Además de la presentación, cada informe estará acompañado de una exposición a cargo del estudiante del avance del proyecto la cual es realizada durante las clases presenciales donde se fomentará el debate y la participación del resto de los estudiantes. El informe y la exposición serán evaluados de manera conjunta en una escala de 1 a 10 como una actividad de Evaluación de Proyecto (EP), resultando en un total de cuatro evaluaciones, una por cada fase: EP1, EP2, EP3 y EP4. Estas actividades permiten evaluar la comprensión y aplicación de los conceptos principales, así como la progresión del proyecto.

El desarrollo de las competencias se evaluará de forma continua mediante rúbricas, construida en base a los resultados de aprendizaje propuestos.

Condiciones de aprobación

Condiciones de regularización

Para alcanzar la condición de regular, el estudiante debe cumplir las siguientes condiciones:

1. Asistir al menos al 80% de las clases.
2. Alcanzar una calificación no inferior a 4 (cuatro) en cada uno de Evaluaciones de Proyecto (EP).
3. Alcanzar el criterio de aceptación mínimo para los resultados de aprendizaje propuestos.

Condiciones de promoción

Para alcanzar la promoción, el alumno debe cumplir las siguientes condiciones:

1. Alcanzar la condición de alumno regular para lo cual se deben cumplir las condiciones indicadas al respecto.
2. Alcanzar una calificación no inferior a 7 (siete) en la última Evaluación de Proyecto (EP4).

Cumplidas estas condiciones, la nota final de promoción se calculará según la siguiente fórmula:

$$\text{Nota Final} = \text{redondear}(10\% \cdot \text{EP1} + 20\% \cdot \text{EP2} + 30\% \cdot \text{EP3} + 40\% \cdot \text{EP4})$$

Examen final

Estudiantes Regulares

Los estudiantes regulares deben rendir un examen equivalente a la última actividad de Evaluación Proyecto (EP4), la cual evaluará el grado de implementación de un sistema ciberfísico propuesto a través de una prueba de concepto o prototipo. El examen consistirá en la entrega de un informe de dicha actividad y la exposición oral del mismo en la fecha del final. La nota final se obtendrá considerando las calificaciones EP1, EP2 y EP3 obtenidas durante la cursada y la calificación de la actividad EP4 obtenida en la fecha del final a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Nota Final} = \text{redondear}(10\% \cdot \text{EP1} + 20\% \cdot \text{EP2} + 30\% \cdot \text{EP3} + 40\% \cdot \text{EP4})$$

Estudiantes Libres

Los estudiantes libres deben rendir un examen que comprende la evaluación de las cuatro diferentes fases para el desarrollo de un sistema ciberfísico correspondientes a las cuatro actividades indicadas como EP1, EP2, EP3 y EP4.

La Nota Final final para los estudiantes libres se obtendrá por la siguiente expresión:

$$\text{Nota Final} = \text{redondear}(10\% \cdot \text{EP1} + 20\% \cdot \text{EP2} + 30\% \cdot \text{EP3} + 40\% \cdot \text{EP4})$$

Actividades prácticas y de laboratorio

Las actividades prácticas y de laboratorio desempeñan un papel fundamental en el curso. Estas actividades se diseñan en consonancia con los objetivos específicos de cada unidad didáctica y se orientan hacia la aplicación práctica de los conceptos y herramientas aprendidos en el aula. A lo largo del curso, los estudiantes trabajarán en proyectos relacionados con sistemas ciberfísicos, lo que les brindará la oportunidad de adquirir experiencia práctica en el desarrollo de soluciones innovadoras.

En cada unidad, se presentarán diversas herramientas y tecnologías que los estudiantes deberán utilizar para avanzar en sus proyectos. Durante las clases presenciales, el docente utilizará ejemplos y casos prácticos para demostrar el uso adecuado de estas herramientas. Los estudiantes podrán replicar estos ejemplos en el entorno de laboratorio, lo que les permitirá familiarizarse con las tecnologías y ganar confianza en su aplicación. El aspecto más destacado de las actividades prácticas y de laboratorio es su integración en el proyecto central del curso. Los estudiantes aplicarán las herramientas y tecnologías aprendidas en clase a sus propios proyectos de sistemas ciberfísicos. Esto implica no sólo la comprensión teórica de los conceptos, sino también su aplicación en un contexto real.

Las actividades prácticas y de laboratorio permitirán a los estudiantes evaluar y ajustar sus proyectos a medida que avanzan en el curso. Podrán experimentar con diferentes enfoques y soluciones, lo que enriquecerá su comprensión y habilidades en la materia. Además, tendrán la oportunidad de colaborar con sus compañeros, lo que fomentará el aprendizaje cooperativo y la resolución conjunta de problemas.

Al finalizar cada actividad práctica, los estudiantes documentarán sus resultados y reflexionarán sobre las lecciones aprendidas. Esto les ayudará a mejorar continuamente sus proyectos y a mantener un registro detallado de su progreso a lo largo del curso.

Desagregado de competencias y resultados de aprendizaje

Los resultados de aprendizaje a promover en el desarrollo de la asignatura relacionados con los siguientes descriptores de Tecnologías Aplicadas (TA)

- Especificación, proyecto y Desarrollo de Software y Sistemas Conjuntos de Hardware y Software haciendo uso de conceptos, métodos y herramientas de gestión de proyectos, ingeniería de software, base de datos, experiencia del usuario, elicitación, análisis, especificación y validación de requerimiento.
- Proyecto, desarrollo, dirección, control, construcción, operación y mantenimiento de Sistemas de Procesamiento de Señales, Sistemas Embebidos y sus periféricos incluido en software de soporte, Sistemas Computarizados de automatización y control y Sistemas Conjuntos de Hardware y Software.

y con los siguientes descriptores de Ciencias y Tecnologías Complementarias (CTC)

- Identificación, formulación y resolución de problemas de ingeniería en computación.
- Concepción, diseño y desarrollo de proyectos de ingeniería en computación.
- Gestión, planificación, ejecución y control de proyectos de ingeniería en computación.
- Generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.
- Desarrollo de una actitud profesional emprendedora.

Los siguientes resultados de aprendizaje (RA) representan una amplia gama de habilidades y conocimientos relacionados con el desarrollo de sistemas ciberfísicos a través de sus diferentes etapas: análisis, modelado, diseño e implementación.

- RA1: Comprender los conceptos fundamentales de los sistemas ciberfísicos, incluyendo su definición, evolución histórica y aplicaciones en diversas industrias.
- RA2: Identificar problemas y oportunidades en el mundo real que pueden abordarse mediante la implementación de sistemas ciberfísicos.
- RA3: Realizar un análisis completo de un sistema ciberfísico propuesto, incluyendo la recopilación y análisis de datos relevantes, la especificación de requisitos funcionales y no funcionales, y la documentación de los resultados.
- RA4: Modelar componentes físicos y lógicos de un sistema ciberfísico, utilizando herramientas de simulación para representar su funcionamiento y sus interacciones.
- RA5: Validar y verificar modelos de sistemas ciberfísicos, así como analizar la sensibilidad de los mismos y evaluar escenarios de simulación.
- RA6: Diseñar arquitecturas para sistemas ciberfísicos, seleccionar componentes y dispositivos adecuados, e integrar sensores y actuadores en el diseño.

- RA7: Definir interfaces de comunicación, seleccionar tecnologías y protocolos de comunicación, y diseñar sistemas de control y algoritmos para sistemas ciberfísicos.
- RA8: Planificar la administración de energía y recursos en sistemas ciberfísicos, evaluando la escalabilidad y flexibilidad del diseño.
- RA9: Programar dispositivos y componentes, desarrollar software para sistemas ciberfísicos, integrar y ensamblar componentes, implementar algoritmos de control y configurar la comunicación entre dispositivos.
- RA10: Realizar pruebas unitarias y de integración, monitorear y gestionar sistemas ciberfísicos en tiempo real, y evaluar el desempeño y la eficiencia del sistema.
- RA11: Documentar de manera efectiva todas las etapas del desarrollo de un sistema ciberfísico, incluyendo análisis, modelado, diseño e implementación.
- RA12: Colaborar de manera efectiva en equipos de proyecto, fomentando el aprendizaje cooperativo y la resolución conjunta de problemas.

A continuación, se indican las competencias específicas asociadas a los resultados de aprendizaje relacionados con la carrera de Ingeniería en Computación.

Competencias Genéricas	Resultados de Aprendizaje
CG1: Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.	RA2, RA3, RA5, RA6: Estos resultados de aprendizaje se enfocan en la capacidad de identificar problemas en sistemas ciberfísicos, formular soluciones y resolver problemas relacionados con el diseño y desarrollo de estos sistemas..
CG2: Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos).	RA4, RA6, RA7, RA8, RA9: Estos resultados de aprendizaje se centran en la capacidad de concebir, diseñar y desarrollar proyectos de sistemas ciberfísicos, incluyendo la planificación de la arquitectura, la selección de componentes y la definición de interfaces.
CG3: Gestionar -planificar, ejecutar y controlar- proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos).	RA6, RA7, RA8, RA9, RA10: Estos resultados de aprendizaje se relacionan con la capacidad de gestionar proyectos de sistemas ciberfísicos, incluyendo la planificación, ejecución y control de las actividades relacionadas con el diseño, desarrollo e implementación de estos sistemas.
CG4: Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en ingeniería.	RA4, RA9: Estos resultados de aprendizaje se enfocan en la utilización efectiva de técnicas y herramientas de simulación, modelado y diseño en la ingeniería de sistemas ciberfísicos.
CG5: Contribuir a la generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.	RA1, RA2, RA3, RA5, RA6, RA7, RA9, RA11, RA13: Estos resultados de aprendizaje están directamente relacionados con la contribución a la generación de desarrollos tecnológicos e innovaciones tecnológicas en el campo de los sistemas ciberfísicos.
CG10: Actuar con espíritu emprendedor.	RA2, RA3, RA6, RA11, RA13: Estos resultados de aprendizaje se centran en la capacidad de actuar con espíritu emprendedor al identificar oportunidades, formular soluciones innovadoras y colaborar en proyectos relacionados con sistemas ciberfísicos.

Competencias Específicas (Ingeniería en Computación)	Resultados de Aprendizaje
CE4.3: Analizar, diseñar, programar, implementar, probar, depurar y evaluar hardware y software para sistemas de computación de propósitos específicos.	RA6, RA9: Estos resultados de aprendizaje se relacionan con la capacidad de programar, implementar y evaluar el software y hardware específico necesario para sistemas ciberfísicos.
CE4.4: Analizar, diseñar, programar, implementar, probar, depurar y evaluar hardware y software para sistemas de computación de propósitos generales.	RA6, RA9: Estos resultados de aprendizaje se centran en la capacidad de programar, implementar y evaluar el software y hardware de propósito general utilizado en sistemas ciberfísicos.
CE4.10 Analizar, interpretar, modelar, diseñar interfaces humano-máquina en sistemas de software y software-hardware optimizando la experiencia de usuario.	RA7, RA11: Estos resultados de aprendizaje se enfocan en la capacidad de diseñar interfaces humano-máquina efectivas y optimizar la experiencia del usuario en sistemas ciberfísicos.
CE4.11 Analizar, proyectar y desarrollar proyectos de software y sistemas conjuntos de hardware y software haciendo uso de conceptos, métodos y herramientas de gestión de proyectos, ingeniería de software, elicitación, análisis, especificación y validación de requerimiento.	RA2, RA3, RA6, RA7, RA8, RA9, RA10, RA11: Estos resultados de aprendizaje están directamente relacionados con la capacidad de analizar, proyectar y desarrollar proyectos de sistemas ciberfísicos, utilizando una amplia gama de conceptos y herramientas de ingeniería de software y gestión de proyectos.
CE7.2.6 Diseñar circuitos impresos que integren componentes electrónicos y periféricos en un sistema embebido.	RA6, RA9: Estos resultados de aprendizaje contribuyen al diseño de circuitos impresos y la integración de componentes electrónicos en sistemas ciberfísicos.
CE7.2.7 Comprender, configurar y utilizar los protocolos de comunicación utilizados en sistemas embebidos.	RA7, RA9: Estos resultados de aprendizaje se relacionan con la comprensión y configuración de protocolos de comunicación utilizados en sistemas ciberfísicos.
CE7.3.4: Diseñar y desarrollar sistemas que impliquen el uso de sensores y actuadores.	RA6, RA7, RA8, RA9, RA10: Estos resultados de aprendizaje están directamente relacionados con la capacidad de diseñar y desarrollar sistemas que involucran sensores y actuadores en sistemas ciberfísicos.
CE7.3.6: Implementar, operar y mantener Sistemas Computarizados de automatización y control y sistemas conjuntos de hardware y software.	RA9, RA10: Estos resultados de aprendizaje se centran en la implementación, operación y mantenimiento de sistemas computarizados de automatización y control, así como en sistemas ciberfísicos conjuntos de hardware y software.

Bibliografía

- Edward A. Lee & Sanjit A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach (Second Edition)*, MIT Press, ISBN 978-0-262-53381-2, 2017

- Taha, W. M., Taha, A. E. M., & Thunberg, J., *Cyber-Physical Systems: A Model-Based Approach*, Springer Nature, 2021