

# Análisis del curso

## EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales

### Comisión *ad-hoc* de la Escuela de Ingeniería Electrónica:

Ing. Miguel Hernández Rivera, M.Sc., MAE  
Ing. José Alberto Díaz García, MAE  
Dr. -Ing. Johan Carvajal Godínez

Ing. Francisco Navarro Henríquez, M.Sc., MBA  
Dr.-Ing. José Pablo Alvarado Moya  
Dr.-Ing. Jorge Castro Godínez

### Expertos consultados:

Dr.-Ing. Pablo Mendoza Ponce

## 1. Contenido del curso

La propuesta de modificación del plan 2100, Licenciatura en Ingeniería en Computadores, propone eliminar el curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales, impartido por la Escuela de Ingeniería Electrónica (EIE). Sin embargo, los contenidos del curso se redistribuirían en 1 curso que sería administrado por el Área Académica de Ingeniería en Computadores (CE) (ver oficio CE-164-2021): CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores, un curso nuevo, teórico-práctico, de 4h en clase por semana y 4 créditos, el cual asumiría la mayor parte de los contenidos del curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales.

El curso propuesto, CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores, no solo duplica la mayoría del contenido del curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales, sino que además toma la mayor parte del contenido del programa del curso EL-3307 Diseño lógico y contenido del curso EL-4314 Arquitectura de Computadoras I, como se ilustra en la Figura 1.

## 1. Antecedentes

### Impacto al objeto de estudio

El objeto de estudio del plan 2100 será (lo resaltado no corresponde al original):

*La Ingeniería en Computadores estudia la **especificación, diseño, implementación y verificación** de soluciones, que integran componentes de alto y bajo nivel tanto de software como de hardware.*

1. Descripción de unidades funcionales (combinacional y secuencial) y sus herramientas .
  - Técnicas simplificación de circuitos.
  - FU combinacional.
    - Decodificador.
    - Multiplexor.
    - Aritméticos. EL-3307 Diseño Lógico
    - Triestado. Lógico
  - FU secuencial.
    - FF.
    - Contador.
    - FSM.
2. Principios de diseño de CPU.
  - CISC.
  - Von Neumann. EL-4314 Arquitectura de Computadoras I
  - Harvard.
  - CISC vs RISC.
  - Arquitectura Load/Store.
  - Arquitectura Registro-Memoria.
  - Set de instrucciones comerciales.
3. Diseño unicyclo, multiciclo.
  - Arquitectura microprocesador unicyclo.
  - Arquitectura microprocesador multiciclo .
4. Introducción a pipelining. EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales
  - Descripción.
  - Riesgos y dependencias.

Figura 1. Contenidos del curso propuesto CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores y su relación con cursos código EL.

La especificación, diseño, implementación y verificación de sistemas de hardware en Ingeniería en Computadores demanda conocimientos sólidos y amplios, tanto teóricos como prácticos, sobre los circuitos electrónicos digitales, particularmente sobre hardware computacional, como se detalla en el documento *Computing Curricula 2020* [CC2020] (específicamente en la sección 3.2.4, y particularmente ilustrado en la Figura 3.2 de dicho documento). Dichos conocimientos fundamentales se cubren ya como parte del curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales del plan 2100 de Licenciatura en Ingeniería en Computadores. La fusión propuesta de dos cursos, EL-3307 Diseño Lógico y EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales, limitará la profundidad y amplitud con la que dichos temas podrán ser abordados. Esto, a su vez, limitará la capacidad de los egresados del programa para implementar sistemas digitales reales complejos, lo cual va en detrimento del objeto de estudio de CE. Además, se incumpliría con la cantidad de horas sugeridas por contenido, de acuerdo con IEEE/ACM.

Tabla 1. Distribución actual y propuesta de los cursos con contenido relacionado a EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales.

Semestre	Plan actual	Modificación propuesta
1	MA-1403 Matemática Discreta CE-1102 Taller de Programación	MA-1403 Matemática Discreta CE-1102 Fundamentos de Sistemas Computacionales
5	EL-3307 Diseño Lógico	CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores CE-3201 Taller de Diseño Digital
6	EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales CE-3201 Taller de Diseño Digital	CE-4301 Arquitectura de Computadores I
7	CE-4301 Arquitectura de Computadores I	CE-4302 Arquitectura de Computadores II
8	CE-4302 Arquitectura de Computadores II	

## Perfil Académico Profesional

El perfil académico profesional presentado en la propuesta es confuso (ver encuesta realizada a expertos en el área disciplinar de la EIE) y de él no se deriva ninguna justificación de cambio.

## Contexto internacional

El contenido del curso eliminado forma parte del área de conocimiento “CE-DIG Digital Design” en el “cuerpo de conocimiento” sugerido por el documento *Computer Engineering Curricula 2016* [CE2016] y no forma parte del área de conocimiento “CE-CAO Computer Architecture and Organization”, como el nombre del curso CE-XXXX propuesto lo hace pensar. Por otra parte, el área de conocimiento CD-DIG es propuesto por IEEE/ACM como un área con “50 core hours” [CE2016]. La eliminación de los cursos EL-3307 Diseño Lógico y EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales, y su fusión en uno solo, CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores, no permitirá abarcar los contenidos actuales del curso EL-3310 con la extensión sugerida por IEEE/ACM.

En universidades alrededor del mundo, este es un curso que es impartido por departamentos de ingeniería eléctrica/electrónica a los planes de estudio de ingeniería en computadores y es un curso compartido entre ambos programas.

## 2. Observaciones

En cuanto a la propuesta de eliminar el curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales y sus implicaciones, esta comisión hace las siguientes observaciones:

1. Contenidos del área disciplinar de la Escuela de Ingeniería Electrónica
  - a. Estas intenciones por parte de CE violentan los acuerdos del Consejo de Docencia, como se detalla en el oficio ViDa-450-2018, de que: “el área disciplinar corresponde de manera exclusiva a las escuelas”.

## 2. Traslape de contenidos y duplicación de temas

- a. El oficio CE-164-2021 cita que, “En el documento 'Informe de Evaluación del Programa' emitido por la Agencia Acreditadora de Programas de Ingeniería y de Arquitectura (AAPIA) en el año 2018 para el Proceso de Acreditación del Programa Licenciatura Ingeniería en Computadores, se indica textualmente en la página 15: [...] *tratar de evitar temas repetidos, como tópicos tratados en el curso Matemática Discreta y que luego se repiten en Diseño Lógico [...]*”.
- b. Por otra parte, es importante notar que, en contradicción a lo citado en el oficio CE-164-2021, la propuesta de modificación del programa 2100 sí presenta traslapes mayores en contenidos. Por ejemplo, el actual curso CE-4301 Arquitectura de Computadores I ya cubre los temas de diseño del set de instrucciones y *pipelining*, como lo muestra la Figura 2.
- c. Este traslape denota un trabajo descuidado y que desconoce las recomendaciones establecidas por entes internacionales, como IEEE/ACM, y la forma en que universidades alrededor del mundo ofertan un programa de diseño digital para programas de Ingeniería Eléctrica/Electrónica y de Ingeniería en Computadores.

### CE-4301 Arquitectura de Computadores I

1. Introducción al diseño de computadores
  - a. Historia de los computadores.
  - b. Tendencias industriales.
  - c. Organización de Computadores vrs Arquitectura de computadores.
  - d. Ley de Amdahl.
  - e. Taxonomía de Flynn
2. Diseño del set de instrucciones
  - a. Arquitectura Load/Store.
  - b. Arquitectura Registro-Memoria.
  - c. Arquitecturas comerciales.
  - d. Codificación.
  - e. Direccinamiento.
  - f. Endianness.
  - g. Alineamiento de memoria.
3. Pipelining
  - a. Estrategias de segmentación y pipelining.
  - b. Riesgos estructurales.
  - c. Riesgo de dependencia de datos.
  - d. Riesgos de control.
4. Otras técnicas de paralelismo
  - a. Arquitectura superescalares.
  - b. Predicción de saltos.
  - c. Ejecución fuera de orden.
  - d. Estructuras de unidades funcionales.
  - e. Calendarización estática y dinámica.
  - f. Introducción a VLIW.
5. Diseño de la jerarquía de memoria
  - a. Jerarquía de memoria en un computador.
  - b. Memoria principal.
  - c. Memoria caché.
  - d. Coherencia de caché.
  - e. Caché avanzado.
  - f. Modo real y modo protegido.
  - g. Memoria virtual y paginación.
  - h. Traducción de direcciones.

### CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores

1. Descripción de unidades funcionales (combinacional y secuencial) y sus herramientas .
  - Técnicas simplificación de circuitos.
  - FU combinacional.
    - Decodificador.
    - Multiplexor.
    - Aritméticos.
    - Triestado.
  - FU secuencial.
    - FF.
    - Contador.
    - FSM.
2. Principios de diseño de CPU.
  - CISC.
  - Von Neumann.
  - Harvard.
  - CISC vs RISC.
  - Arquitectura Load/Store.
  - Arquitectura Registro-Memoria.
  - Set de instrucciones comerciales.
3. Diseño uniclo, multiclo.
  - Arquitectura microprocesador uniclo.
  - Arquitectura microprocesador multiclo .
4. Introducción a pipelining.
  - Descripción.
  - Riesgos y dependencias.

Figura 2. Traslape de contenidos entre el curso propuesto CE-XXXX y CE-4301.

### 3. Enfoque del curso

- a. La propuesta del curso CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura en Computadores es la de un curso teórico-práctico, a diferencia del actual curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales que se define como teórico.
- b. Con un incremento significativo en la cantidad de contenidos, no es comprensible para esta comisión como tantos contenidos se podrán cubrir con suficiente amplitud y profundidad, debido a que son fundamentales para los siguientes cursos, y a la vez proveer experiencias prácticas significativas, propias de un curso teórico-práctico.
- c. Por otra parte, dentro de la malla curricular se espera que el curso CE-3201 Taller de Diseño Digital se curse en el mismo semestre que CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores. Mientras se avanzan con los primeros contenidos teóricos del curso CE-XXXX, ¿cómo limitará esto el avance en el curso CE-3201 Taller de Diseño Digital, el cual es completamente práctico? ¿De qué manera no se trasladarán las actividades prácticas que se esperan en el curso CE-XXXX con las de CE-3201? En un caso hipotético, un estudiante podría matricular ambos cursos, abandonar CE-XXXX y no contar entonces con los fundamentos teóricos necesarios para continuar con CE-3201. Es importante resaltar que IEEE/ACM
- d. Además, de los objetivos del curso CE-XXXX y su relación con los contenidos, se infiere que solamente los contenidos 3 y 4 se estarían cubriendo de forma significativa, dejando de lado conceptos fundamentales del contenido 1 para el diseño de sistemas digitales.
- e. Además, la propuesta del programa CE-XXXX carece de asignación de semanas o distribución temporal de los contenidos, lo cual no permite establecer una estimación de la profundidad con la que los contenidos del curso se impartirían potencialmente.
- f. La Escuela de Ingeniería Electrónica actualmente oferta el curso EL-3313 Taller de Diseño Digital que cubre los contenidos del curso CE-3201 Taller de Diseño Digital. Por lo tanto, el curso CE-3201 debe ser remplazado por EL-3313, dado que los contenidos del curso forman parte del área disciplinar de la Escuela de Ingeniería Electrónica.

### 4. Diseño Digital vs. Organización y Arquitectura de Computadores

- a. IEEE/ACM son claros al definir qué unidades de conocimiento pertenecen a “CE-DIG Digital Design” y cuales a “CE-CAO Computer Architecture and Organization”. La propuesta del curso CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores demuestran un claro desconocimiento de estas recomendaciones.
- b. De acuerdo con el documento *Observaciones en procesos de acreditación sobre el plan de estudios del Programa de Ingeniería en Computadores, en particular sobre los cursos de código EL*, compartido por la comisión del Área Académica de Ingeniería en Computadores, se cita que “en el Informe de Evaluación del Programa elaborado el 14 de octubre de 2021, en la sección 1.2 referente a la orientación del plan de estudios, se transcribe lo siguiente: [...] *aunque la orientación del plan de estudios es explícita, el diseño del pensum de este Programa analizado aún requiere el lograr una **correspondencia completa** en la definición de su estructura curricular, la cual está definida por la Association for Computing Machinery (ACM) y por la IEEE Computer Society.*” La propuesta de modificación planteada para el curso EL-3307 Diseño Lógico, así como para todos los cursos del área de Electrónica, aleja significativamente al programa 2100 de las recomendaciones de IEEE/ACM y de las observaciones del ente acreditador (AAPIA), como la misma Área Académica de

Ingeniería en Computadores lo ha compartido, y por lo tanto no contribuye a la **correspondencia directa** ya solicitada.

- c. En el mismo document se cita: *“La orientación del programa debe ser pertinentes con la concepción universal de la disciplina “Computer Engineering”, establecida en la Guía para el Diseño Curricular de la ACM/IEEE. Esta guía establece que esta Ingeniería es una disciplina que envuelve la ciencias y tecnología de diseño, construcción, implementación y mantenimiento de componentes de hardware y software para equipos controlados por sistemas de cómputo y redes de dispositivos inteligentes. [...]”*. El fuerte debilitando de los cursos prácticos del área de Electrónica, así como la fusión de cursos teóricos, y su consecuente debilitamiento al querer acaparar muchos contenidos en poco tiempo, limitará significativamente que **la teoría guíe a la práctica**, como IEEE/ACM insistentemente recomienda debe enfocarse el desarrollo en ingeniería.
- d. La distribución propuesta por IEEE/ACM ya es seguida por los cursos que la Escuela de Ingeniería Electrónica oferta y que son actualmente parte del programa 2100 de la Licenciatura en Ingeniería en Computadores, como se ilustra en la Figura 2. Estos cursos son: EL-3307 Diseño Lógico y EL-3313 Taller de Diseño Digital, para CE-DIG, y EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales y EL-4314 Arquitectura de Computadoras I, para CE-CAO.

CE-CAO	Computer Architecture and Organization [60 core hours]		CE-DIG	Digital Design [50 core hours]	
CE-CAO-1	History and overview [1]		CE-DIG-1	History and overview [1]	
CE-CAO-2	Relevant tools, standards and/or engineering constraints [1]		CE-DIG-2	Relevant tools, standards, and/or engineering constraints [2]	
CE-CAO-3	Instruction set architecture [10]		CE-DIG-3	Number systems and data encoding [3]	
CE-CAO-4	Measuring performance [3]	EL-3310	CE-DIG-4	Boolean algebra applications [3]	EL-3307
CE-CAO-5	Computer arithmetic [3]		CE-DIG-5	Basic logic circuits [6]	
CE-CAO-6	Processor organization [10]		CE-DIG-6	Modular design of combinational circuits [8]	
CE-CAO-7	Memory system organization and architectures [9]		CE-DIG-7	Modular design of sequential circuits [9]	
CE-CAO-8	Input/Output interfacing and communication [7]		CE-DIG-8	Control and datapath design [9]	
CE-CAO-9	Peripheral subsystems [7]		CE-DIG-9	Design with programmable logic [4]	
CE-CAO-10	Multi/Many-core architectures [5]	EL-4314	CE-DIG-10	System design constraints [5]	EL-3313
CE-CAO-11	Distributed system architectures [4]		CE-DIG-11	Fault models, testing, and design for testability	

Figura 4. Distribución de los temas de las unidades de conocimiento CE-DIG y CE-CAO en los cursos actuales con código EL.

## 5. Requisitos presupuestarios

- a. Aun cuando, en repetidas ocasiones, la comisión *ad-hoc* de la Escuela de Ingeniería Electrónica ha solicitado información sobre el impacto presupuestario que los cambios propuestos en la reforma curricular del plan 2100 tendría, aún no se cuenta con estimaciones. Contratación de personal, equipamiento, espacio físico, entre otros, serán necesarios. Con la entrada en vigencia del artículo 13 del título IV de la Ley 9635 Fortalecimiento de las Finanzas Públicas, se predicen fuertes restricciones presupuestarias para los siguientes 10 años que impedirían, o al menos dificultarían, la realización de los cambios propuestos.

### 3. Propuesta para CE

Considerando que

1. La Escuela de Ingeniería Electrónica cuenta con expertos en los temas de diseño digital y organización y arquitectura de computadores, con postgrados a nivel de maestría y doctorado en temas relacionados a los contenidos disciplinares de estas áreas y a los cursos que se imparten actualmente para los programas de Ingeniería Electrónica e Ingeniería en Computadores. Estos expertos cuentan con abundante experiencia en la aplicación de ingeniería del contenido del curso existente EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales, lo que se demuestra con publicaciones y proyectos de investigación en la academia y con colaboración de la industria.
2. La propuesta de modificación del plan 2100 de Licenciatura en Ingeniería en Computadores propone eliminar el curso EL-3307 Diseño Lógico pero lo reemplaza con uno nuevo, CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores, que absorbe los contenidos de EL-3307 y los del curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales, convirtiendo CE-XXXX en un curso con excesiva cantidad de contenidos, que no prevé la distribución de tiempo y que en consecuencia tendrá una cobertura muy superficial de la materia para un curso fundamental para el programa de Ingeniería en Computadores. Adicionalmente, el nombre del curso es incoherente con las definiciones ampliamente aceptadas por la comunidad profesional (IEEE/ACM), académica y científica.
3. No existe una justificación formal y rigurosa que sustente una replicación innecesaria de cursos en la institución.

Como expertos en la materia, la comisión ad-hoc de la Escuela de Ingeniería Electrónica propone:

1. Rechazar la eliminación del curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales del plan 2100 de Licenciatura en Ingeniería en Computadores.
2. Rechazar la propuesta de creación del curso CE-XXXX Fundamentos de Arquitectura de Computadores, puesto que claramente trasladará contenidos del área disciplinar de la Escuela de Ingeniería Electrónica a cursos CE.
3. Mantener el curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales como actualmente se imparte para el programa de Ingeniería en Computadores por parte de la Escuela de Ingeniería Electrónica.
4. Iniciar un proceso de revisión y actualización de los contenidos y metodologías impartidos en el curso EL-3310 Diseño de Sistemas Digitales, considerando observaciones provenientes del Área Académica de Ingeniería en Computadores.

Adicionalmente, enfatizamos que todos los cursos asociados a áreas disciplinares de la Escuela de Ingeniería Electrónica, y en este caso particular a las áreas de diseño digital y organización y arquitectura de computadoras, deben tener código EL, a saber:

- Taller de Diseño Digital
- Arquitectura de Computadores I
- Arquitectura de Computadores II

## 4. Bibliografía

[CC2020] IEEE/ACM. *Computing Curricula 2020 CC2020. Paradigms for Global Computing Education*. ACM/IEEE-CS. Diciembre, 2020.

[CE2004] Joined Task Force on Computer Engineering Curricula. *Computer Engineering Curricula 2004 CE2004 Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Engineering*, ACM/IEEE. Diciembre, 2004.

[CE2016] Joined Task Force on Computer Engineering Curricula. *Computer Engineering Curricula 2016 CE2016 Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Engineering*, ACM/IEEE. Diciembre, 2016.