

**METODOLOGÍA DE DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS
EMBEBIDOS**

—Utilizando Herramientas Abiertas—

CARLOS IVÁN CAMARGO BAREÑO

ÍNDICE GENERAL

Índice general	I
1 Introducción	1
1.1. Estado de la Industria Electrónica en Colombia	4
1.2. El Conocimiento como Bien Público	7
1.3. Transferencia Tecnológica	10
2 Plan de Estudios Para la Enseñanza/Aprendizaje de Sistemas Embebidos	29
2.1. Introducción	29
2.2. La Iniciativa CDIO	45
2.3. Implementación del Plan de Estudios CDIO	49
2.4. Integración de las Habilidades CDIO al Plan de Estudios	54
2.5. Desarrollo de Métodos de Evaluación	67
2.6. Actividades	68
3 Diseño e implementación de tareas hardware	73
Bibliografía	75

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El gran avance de las técnicas de fabricación de circuitos integrados ha permitido que los sistemas digitales sean parte fundamental de la vida humana, facilitando las tareas cotidianas. Los niveles de integración actuales permiten construir sistemas cada vez más pequeños, veloces y de menor consumo de potencia, lo cual ha favorecido su difusión a casi todas las actividades humanas. A medida que se extiende el campo de aplicación de los sistemas digitales, lo hacen las exigencias de funcionamiento a ellos impuestas; nuevos retos en el diseño se presentan a medida que los sistemas embebidos se integran a las actividades humanas. Observando la tendencia actual de los sistemas electrónicos, se puede especular que el computador tal como se conoce actualmente desaparecerá [1], ya que estará en todas partes, ubicuo, interactuando con los seres humanos para realzar su mundo. Se pasará de un esquema en el que existe un computador para uno o varios usuarios (PC, mainframe) a uno en el que existan muchos computadores para un usuario. Estos computadores disponen de grandes capacidades de cálculo y de comunicación, pero a la vez, poseen un grado de integración tal que serán invisibles; para aclarar como se puede lograr esta invisibilidad, imagine que existen sistemas embebidos contruidos con técnicas de micro-fabricación y que son capaces de tomar su energía de fuentes alternas como la temperatura, la radiación solar, o a partir de fenómenos químicos; debido a su reducido tamaño, estos sistemas pueden integrarse a objetos o pintarse sobre ellos, de tal forma que no sean visibles ante los ojos humanos. Esta desaparición no solo será una consecuencia de la tecnología, sino de la psicología humana; cuando las personas asimilan perfectamente algo y se convierte en parte de la vida diaria no se es consciente de su existencia y utilización.

Esta situación ha dado origen a una industria gigantesca que proporciona dispositivos que satisfacen las nuevas necesidades humanas, el volumen de producción de este tipo de aplicaciones es tal, que el número de procesadores utilizados en ellas ha superado ampliamente a los procesadores utilizados en aplicaciones tradicionales (como estaciones de trabajo y computadores personales); en muchas áreas, los procesadores para aplicaciones específicas los han desplazado por completo (por ejemplo, puntos de venta, entretenimien-

to, asistentes personales, equipos de automatización, etc). Esto, unido a la saturación en el mercado tradicional de software, ha originado una migración de muchas compañías y profesionales al diseño de aplicaciones específicas, donde el sistema está diseñado para cumplir una función determinada.

Gracias a esta enorme y creciente demanda, la industria de los semiconductores presenta una gran dinámica en la creación de nuevos productos que facilitan el desarrollo de nuevas aplicaciones; a diario se crean nuevos dispositivos de consumo masivo como reproductores MP4, cámaras de video, teléfonos celulares que se superan en capacidad y funcionalidad al paso de cortos períodos de tiempo. Esto ha originado una disminución dramática en el costo de los dispositivos semiconductores necesarios para construir estos productos y, a su vez, un aumento en la funcionalidad de los mismos; esto, en respuesta a la necesidad de un número cada vez menor de componentes para implementar este tipo de aplicaciones. Por otro lado, se generó un cambio en la forma de suministrar información por parte de los fabricantes sobre la programación y funcionamiento de sus dispositivos, pasando de un esquema de confidencialidad a uno totalmente abierto donde se suministra todo lo necesario (manuales de programación, notas de aplicación, diseños de referencia y software de desarrollo) para entender y utilizar sus productos. Esta dinámica también se presenta en las herramientas de desarrollo necesarias para crear la funcionalidad deseada. Los sistemas propietarios se utilizan cada vez menos gracias a la oferta de entornos de desarrollo abiertos creados y mantenidos por una comunidad de desarrolladores que suministran sus conocimientos para el beneficio colectivo; fruto de esta tendencia se han creado aplicaciones tan importantes como el movimiento de software libre y de código abierto (FOSS por sus siglas en inglés), el sistema operativo Linux, y recientemente la plataforma para dispositivos móviles Android.

Todo lo anterior ha generado un clima adecuado para la creación de empresas que utilizan estas facilidades en el desarrollo de productos que puedan ser comercializados local o globalmente, y de esta forma contribuir a mejorar la calidad de vida de la sociedad. Un ejemplo de esto se puede observar en algunos países asiáticos, donde se fortaleció la industria manufacturera de dispositivos electrónicos hasta el punto de dar empleo a una gran cantidad de personas con diferentes niveles de formación y desplazar casi por completo la manufactura de este tipo de productos en el resto del mundo.

Desafortunadamente, la situación en países en vías de desarrollo como Colombia es totalmente diferente; el uso de tecnologías, metodologías de diseño y técnicas de fabricación obsoletas; falta de políticas gubernamentales que estimulen la transferencia real de tecnologías y del conocimiento asociado a ellas; la desconexión entre la academia con los problemas sociales del país y las necesidades de las empresas. Lo anterior ha sumido a la industria electrónica en un atraso de forma tal que depende por completo de productos manufacturados en el exterior, y la mayoría de empresas de base tecnológica se convierten en representantes de firmas extranjeras sin capacidad de creación local.

Los canales de transferencia tradicionales que se limitan a la compra de

equipo y a la capacitación para usarlo y mantenerlo en operación no suministra los conocimientos necesarios para que en el país se generen productos similares adaptados al entorno social, político y económico local. Por lo que es necesario crear metodologías de transferencia que permitan asimilar el conocimiento asociado y pueda ser aplicado por diferentes sectores de la sociedad para mejorar su calidad de vida.

Este trabajo propone una metodología para la transferencia tecnológica y de conocimientos que busca a partir de interacciones locales generar una absorción y asimilación global de los conocimientos necesarios para el diseño, construcción y comercialización de sistemas digitales que utilicen los últimos avances en la industria de los semiconductores. Esta metodología se aplicó inicialmente en una universidad consolidada¹ y en una empresa de base tecnológica *emQbit Ltda*, para formar una comunidad que se encargue de crear herramientas para la difusión de los conocimientos adquiridos durante el proceso de transferencia (recurso). El carácter de la comunidad y del conocimiento que utiliza/genera/mantiene/depura es totalmente abierto, y cualquiera que esté interesado puede utilizar/generar/mantener/depurar dicho recurso y ser miembro de esta comunidad; es decir, el conocimiento es considerado como un bien público y el acceso a él es un derecho que debe ser garantizado.

Sistemas Embebidos

En la actualidad, cada vez con más frecuencia, se notan signos de la invasión digital, por ejemplo, en el aumento de chips embebidos en los dispositivos que se utilizan a diario. Se ha demostrado [2] que una persona que vive en un país industrializado se ve confrontada con un promedio de 40 chips al día, de los cuales 5 son capaces de comunicarse en redes. Se estima que en la actualidad una persona está en contacto con cientos de estos chips, la mayoría de los cuales acceden a densas redes de información[3]. Muchos de estos artefactos toman la apariencia de objetos que se utilizan en la vida diaria (herramientas, vestuario, electrodomésticos, etc) pero son mejorados con sensores, actuadores, procesadores y software embebido. Una de las razones de la aparición de estos sistemas es económica; las industrias han visto como se muestran signos de recesión en los mercados tradicionales. Por lo tanto, buscan nuevos productos en los que pueden ser embebidos chips y software.

La aparición de los dispositivos digitales en las actividades humanas, es una consecuencia lógica de la evolución de las relaciones entre los usuarios y los sistemas digitales, los cuales se han caracterizado por una democratización de acceso a los equipos y una descentralización de la infraestructura subyacente. En los 90s la aparición de Internet permitió compartir recursos a través de un computador personal. Internet no es más que un paso adelante hacia la llegada de los sistemas de computación ubicua. La misma filosofía de simplificación y descentralización prevalece hasta hoy y conduce a una situación donde miles de dispositivos computacionales estarán disponibles

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia

para realizar tareas cotidianas y se compartirán recursos a través de redes más intrincadas que Internet.

¿Por qué los Sistemas Embebidos?

Mercado de los sistemas embebidos

Según BCC, inc.² el mercado de los sistemas embebidos es de \$92 billones de dólares y se estima que sea de \$112.5 billones en 2013, con una tasa compuesta de crecimiento anual (CAGR) del 4.1 %. El hardware embebido tuvo un valor de \$89.8 billones en 2008 y se espera que crezca a un CAGR del 4.1 % para alcanzar \$109.6 billones en 2013. El software embebido generó \$2.2 billones en 2008 y podrá aumentar a \$2.9 billones en 2013 para un CAGR del 5.6 %. Este estudio revela que USA, Canadá, y los países asiáticos dominan este creciente mercado.

Penetración de los sistemas embebidos

Más de un billón de dispositivos embebidos fueron vendidos en el 2004, siendo sus principales áreas de aplicación los computadores, las telecomunicaciones, consumo, automóviles, medicina, oficina, industria militar. Según BBC, inc. las ganancias en el 2009 son de aproximadamente 100.000 millones de dólares.

1.1. Estado de la Industria Electrónica en Colombia

En la actualidad Colombia atraviesa por una “crisis” a nivel de diseño de sistemas digitales, existe un atraso muy grande en esta área. Existen dos grandes responsables de esta situación; por un lado, las políticas de la mayoría de las industrias al no realizar inversión de capital en sus departamentos de I+D; por otro lado, algunas universidades no cuentan con programas actualizados que permitan explotar los avances realizados en las industrias electrónica y de semiconductores. La situación se agrava aún más al ver el estado de la relación entre la universidad y la industria, la cual no existe en algunos casos. Desde el punto de vista industrial los resultados obtenidos en la academia parten de entornos ideales y no se tienen en cuenta las características de los entornos industriales.

Apropiación de conocimiento y transferencia tecnológica

El estudio en [4] asegura que para que Colombia llegue a ser generador de productos tecnológicos, es necesario generar un conocimiento que permita esta transición. “Para que el conocimiento sea motor de desarrollo es necesario el traspaso desde sus creadores a la sociedad, mediante la conversión

²<http://www.bccresearch.com/>

a tecnologías que produzcan cambios radicales que incrementen la producción. Esa transmisión de tecnología generadora de crecimiento económico está influenciada por diversos factores: medio geográfico, leyes de propiedad industrial, costos laborales, nivel de ciencia y tecnología, religión, tipos de instituciones, resistencia a innovar, políticas de estado, guerras, factores demográficos, entre otros" [4].

Pero ¿cómo obtener este conocimiento? Arrow [5] afirma que la obtención de conocimiento puede efectuarse de varias formas: "aprender haciendo", "aprender usando", "aprender leyendo". Cuando una empresa decide transmitir su conocimiento disponible, lo hace en procesos de investigaciones conjuntas, en actividades de producción, y distribución, mercadeo, servicio y soporte operativo o riesgo compartido. También se presentan alianzas entre firmas como: contratos de I+D, acuerdos de licencias y licencias cruzadas. La conformación de estas asociaciones permite crear redes tecnológicas dominadas por países industrializados con sus respectivas empresas multinacionales monopolizando conocimiento [4].

El problema colombiano radica en que las empresas nacionales no adquieren el conocimiento necesario para innovar; de forma que puedan ser competitivas y puedan acceder a mercados internacionales ofreciendo nuevos productos de calidad y a precios competitivos, con efectos directos como: generación de empleos especializados, desarrollo tecnológico e industrial sostenido, ampliación del conocimiento nacional y disminución de la salida de divisas [4].

Según los estudios realizados por Martínez [4], con base en registros del Decreto 259/92, del Incomex, la importación de conocimiento no está siendo empleada con el propósito de utilizar tecnologías de punta que permitan efectuar innovaciones al interior de las empresas y de los sectores; las empresas nacionales se limitan a comprar un determinado dispositivo o equipo, sin tener el conocimiento para operarlo, hacerle mantenimiento, mejorarlo, ni mucho menos producirlo, por lo que se ven obligadas a contratar con el vendedor para dicho fin; esto indica, que la adquisición de tecnología no se realiza con base en un programa desarrollado de antemano, sino son una respuesta a cambios en el mercado, lo cual evidencia la inexistencia de programas de innovación encaminados a la disminución de la brecha tecnológica.

Situación de la industria electrónica en Colombia

La industria electrónica nacional no es ajena a las políticas que siguen las empresas nacionales en cuanto a la apropiación de tecnología; Colombia depende totalmente de economías más desarrolladas para el suministro de dispositivos electrónicos en diversas áreas (comunicaciones, entretenimiento, industria, medicina, etc). Mientras en otros sectores de la economía (Alimentos, textiles, bebidas) han pasado de ser consumidores a exportadores, y adquieren nuevas tecnologías para ser más competitivos, el sector electrónico del país ha reducido sus actividades de investigación y desarrollo hasta el punto de depender totalmente de productos externos, de los cuales, algunos son de baja calidad y no suplen los requerimientos del mercado local, pero son utilizados

porque son muy económicos.

En la actualidad la industria electrónica presenta una gran dinámica a nivel mundial [6]. La inversión de capital necesaria para el diseño de sistemas digitales es relativamente baja, gracias a la gran demanda originada y a la constante reducción de los costos asociados a los servicios de fabricación; adicionalmente, las herramientas de desarrollo necesarias para la programación y depuración de este tipo de sistemas son de libre distribución, lo que permite reducir de forma considerable la inversión en este ítem.

Según ASESEL³ en el 2001⁴ existían 154 empresas productoras de componentes y equipos de la cadena electrónica; dentro de los productos que la industria electrónica exporta se encuentran registrados: circuitos integrados, circuitos impresos, micro-estructuras, (no son fabricados en el país, son compradas en el exterior y vendidas nuevamente) instrumentos para medida y control, instrumentos y aparatos eléctricos o electrónicos. Según Proexport, el 91 % de las exportaciones son realizadas por Bogotá y los destinos se encuentran en países cercanos como Venezuela, Perú, Ecuador y USA. La producción durante el período 2000 - 2007 aumentó en un 4 % llegando a 936 mil millones de pesos, las exportaciones aumentaron en un 15 % llegando a 1093 mil millones de pesos y las importaciones subieron en un 18 % llegando a 13.262 mil millones en el mismo período de tiempo.

Causas del atraso tecnológico en Colombia

Estudios realizados en Colombia [7] [8] [9] y en otros países [10] [11] [4] identificaron los siguientes obstáculos para el desarrollo de la industria electrónica: deficientes relaciones universidad - empresa, pobre enfoque académico hacia la industria, baja calidad de los productos nacionales, falta de políticas gubernamentales, falta de cultura de investigación, reducida apropiación tecnológica, competencia con productos extranjeros, atraso tecnológico y limitado recurso humano con formación avanzada.

De los problemas expuestos anteriormente se pueden decir que los que más afecta al desarrollo de la industria electrónica en Colombia es el atraso tecnológico; no es posible ser competitivo en el mercado electrónico mundial con tecnologías y metodologías de diseño obsoletas. La culpa de este atraso tecnológico no es exclusiva de la industria, la falta de confiabilidad en los productos colombianos agrava este problema.

Otro actor que contribuye al retraso tecnológico es el sector académico; según el Sistema Nacional de Información Superior, durante los últimos 10 años se han abierto 230 programas relacionados con la industria electrónica, estos programas están repartidos entre programas de formación universitaria,

³Asociación de entidades del Sector Electrónico

⁴Desde este año no se ha realizado ningún estudio sobre la industria electrónica. Por otro lado, debido a que no existe un código para la clasificación industrial internacional uniforme (CIIU) específico para la industria electrónica, las empresas del sector electrónico se encuentran dispersas y la gran mayoría comparten la clasificación *no clasificadas previamente* (NCP), su estudio se dificulta. Adicionalmente, la industria electro-electrónica hace un aporte muy bajo al PIB y no tiene mayo peso en la industria nacional (fuente: ASESEL)

tecnológica terminal y técnica profesional. La mayoría de los centros de formación se encuentran ubicados en 3 departamentos: Bogotá, Antioquia y Valle [9]. El número de ingenieros graduados en un año es entre 2 y 8 veces mayor que en los países en vías de desarrollo y doce veces mayor que los que se gradúan en los países desarrollados MDAG99.

Por otro lado, en las universidades con poca consolidación, el contenido y metodologías de las asignaturas relacionadas directamente con la industria electrónica se encuentran desactualizados y fuera del contexto mundial; se utilizan metodologías de diseño antiguas en las que primaba la experiencia del diseñador, se realizan tareas manuales, repetitivas que pueden ser realizadas por herramientas de diseño moderno, hay poca experimentación y su estructuración y metodologías son anticuadas. Adicionalmente, muchos investigadores dedican sus estudios en proyectos que no aportan al desarrollo del país pero que les proporcionan más reconocimiento internacional. Otro problema radica en la falta de experiencia en el sector productivo por parte del personal académico, una componente importante del grupo de profesores nunca ha sido parte de un proceso productivo o de un proceso de desarrollo que tenga como fin la creación de un producto comercial, razón por la cual se evita la experimentación y se da más énfasis al análisis, siendo la simulación el último paso del proceso de análisis. Se puede decir que en Colombia se presenta una sobre-oferta de profesionales en el área electrónica, formados con programas desactualizados que no tienen en cuenta los avances tecnológicos y metodológicos; lo que explica la falta de ingenieros con altos niveles de formación y la escasa demanda de profesionales en el área.

1.2. El Conocimiento como Bien Público

Es indudable que el desarrollo tecnológico de un país se encuentra ligado al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes, y que para que en un país en vías de desarrollo se realice una transferencia tecnológica y de conocimientos asociados a la tecnología que se transfiere exitosos que permitan desarrollar productos similares, pero ajustados al contexto socio-económico local, es necesario que el país cuente con la capacidad de absorber las habilidades, técnicas, información y organización asociados. Esta absorción de conocimientos debe ser realizada por un gran número de personas y entidades para que la transferencia tenga un impacto significativo en la sociedad; para que esto suceda, este conocimiento debe ser considerado como un bien público, y como tal, el acceso a él, debe ser un derecho y por lo tanto, la sociedad debe garantizar los mecanismos de difusión para que llegue a los sectores interesados. De igual forma, es un deber de los sectores que utilizan este bien contribuir a su difusión, actualización, mejoramiento, y crecimiento. El conocimiento en esta propuesta se refiere a las ideas intangibles; información y datos en el que el conocimiento es expresado u obtenido, y como el entendimiento adquirido a través de la experiencia o estudio científico, académico o no académico.

Ostrom [12] propone dos variables generales para clasificar los diferentes tipos de bienes: *el nivel de exclusión* entendido como la dificultad para excluir el acceso a un recurso por parte de usuarios potenciales; y *el nivel de rivalidad* el cual se refiere al impacto que tiene el uso de un recurso por un individuo (o grupo) sobre el uso de otros usuarios. Ostrom, identifica cuatro tipos de bienes y/o servicios: *bienes públicos* bajo nivel de rivalidad y bajo nivel de exclusión; *bienes comunes* alto nivel de rivalidad y bajo nivel de exclusión; *club goods* bajo nivel de rivalidad y alto nivel de exclusión y *bienes privados* alto nivel de rivalidad y alto nivel de exclusión. El conocimiento es un recurso con un grado de rivalidad bajo, ya que no se afecta negativamente al aumentar el número de usuarios, lo que entonces deja la posibilidad de clasificarlo como un bien público o un bien tipo club (ver figura 1.1).

		Rivalidad	
		Rival	No rival
Exclusión	Exc.	Privado	Club
	No exc.	Common	Público

Figura 1.1: Clasificación general de los bienes. fuente: [12]

Idealmente, el conocimiento debería ser un bien público; esto es, no deberían existir restricciones para acceder a él; sin embargo, en la actualidad el acceso al conocimiento es restringido, ya sea por medio de patentes, derechos de propiedad intelectual (lo cual es muy común en el desarrollo de nuevos productos y tecnologías) o por que el acceso al conocimiento tiene un costo que no puede ser pagado por cualquier miembro de la sociedad. En Colombia el acceso a la educación técnica, tecnológica y superior es limitado, se tiene una cobertura del 37% ⁵. La escasez de cupos en los centros de formación públicos y los altos costos de las matrículas en las universidades privadas (con niveles de calidad similares) han convertido al conocimiento en un bien tipo club (en Colombia); afectando de forma considerable la cantidad de personal con las capacidades necesarias para absorber los conocimientos asociados a nuevas tecnologías; adicionalmente, según el ministerio de educación

⁵Según el observatorio de la universidad colombiana, esta cifra aumentó en los últimos años gracias a las matrículas del SENA

nacional, el 64 % de los matriculados cursan programas universitarios y solo el 24 % están en programas relacionados con ingeniería.

Otro tipo de fuentes de capacitación la suministra el Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico de la industria Electrónica e Informática (CIDEI), a través de tres cursos: Diseño digital empleando dispositivos lógicos programables; diseño de software embebido para microcontroladores ARM y diseño de circuitos impresos con normas internacionales IPC; sin embargo, el elevado costo de estos cursos genera una barrera en la obtención de este conocimiento por parte de los interesados.

Basados en el estado de la industria electrónica nacional y de la capacidad del país para la formación de personal calificado, se puede afirmar que el principal problema que presenta la industria electrónica nacional es la falta de conocimientos sobre procesos de diseño y fabricación, debido en parte a la fuerte exclusión que se tiene al acceso de la información relacionada con estos procesos, lo que se traduce en la incapacidad de producción local de productos que cumplan con los estándares internacionales. Para contribuir en la solución de este problema, este trabajo proporciona un recurso público basado en el conocimiento necesario para concebir, diseñar, implementar y operar sistemas digitales que utilicen tecnología de punta y métodos lógicos de diseño modernos proporcionando:

- Diseños de referencia de sistemas digitales funcionales que puedan ser utilizados en la generación de nuevos productos.
- Repositorios donde se puedan descargar los archivos necesarios para entender, reproducir y modificar estos diseños de referencia.
- Una lista de discusión que proporcione soporte sobre el proceso de diseño.
- Un programa académico que actualice los contenidos y la metodología de las asignaturas del área de electrónica digital.
- Documentación que puede ser utilizada por las empresas para capacitar a su personal.

Este recurso estará representado por: la información necesaria para entender, reproducir y modificar plataformas de desarrollo que pueden ser utilizadas para la creación de nuevos productos que den solución a problemas locales; la documentación necesaria para entender el proceso de diseño de un sistema digital complejo; una comunidad que crea/utiliza/mantiene el recurso; medios de comunicación y de almacenamiento para los proyectos existentes y facilidades que permitan la creación de nuevos proyectos. Cada uno de estos proyectos representa la aplicación de técnicas de diseño y de fabricación modernas de sistemas embebidos que pueden ser utilizados por los industriales y por la academia como herramientas de capacitación; su carácter público permite el acceso y uso por parte de cualquier interesado; proporcionando un canal de acceso al conocimiento sin restricciones.

Tomando como fuente de inspiración el movimiento de software libre y de código abierto (FOSS), se definió un concepto similar pero aplicado al desarrollo hardware, permitiendo la generación, distribución, estudio y modificación de plataformas físicas (placas de circuito impreso y dispositivos funcionales). Este nuevo concepto recibe el nombre de *hardware copyleft*, su principal objetivo es servir como canal para la transferencia del conocimiento necesario para diseñar y producir sistemas digitales a todo sector de la sociedad que esté interesado. Con esto, se pretende generar en el país los conocimientos necesarios para aumentar la oferta de productos tecnológicos producidos localmente, lo que se traducirá en un aumento de la oferta local de bienes y servicios relacionados con la manufactura de sistemas digitales, generando empleo para personas con diferentes niveles de formación.

1.3. Transferencia Tecnológica

La transferencia de tecnología ha introducido técnicas de alta productividad y en muchos casos cambios técnicos en países menos desarrollados que Colombia. La adquisición de tecnología foránea contribuye a mejorar la competitividad en los mercados locales e internacionales en estos países, en los que debe ser considerada como un proceso vital. Este proceso presenta problemas cuando se pierde capacidad de absorción por parte del país receptor y la renuencia del país que transfiere a suministrar el *know-how*. Por lo que es necesario que estos países promuevan sus capacidades tecnológicas con el fin de absorber las tecnologías foráneas de forma eficiente en función de sus necesidades locales y de esta forma generar un rápido proceso de industrialización. La transferencia de tecnología según Van Gigh [13] involucra la adquisición de “actividad inventiva” por parte de usuarios secundarios. Es decir, la transferencia tecnológica no involucra necesariamente maquinaria o dispositivos físicos; el conocimiento puede ser transferido a través de entrenamiento y educación, y puede incluir temas como manejo efectivo de procesos y cambios tecnológicos [14]. No debe confundirse la transferencia tecnológica con la apropiación de tecnología que se define como el proceso de interacción con la tecnología, la modificación de la forma como es usada y el marco social dentro del cual es usada.

La transferencia tecnológica es un proceso dinámico que debe ser re-evaluado periódicamente, requiere una infraestructura adecuada que involucra instituciones, centros de formación vocacional, técnica y administrativa, personal con diferentes especialidades y un entorno cultural adecuado. Es difícil que la tecnología desarrollada en un entorno determinado pueda ser transferida sin realizar modificaciones en la escala de producción y la adopción de productos al mercado local.

Tecnología

La tecnología es definida como el factor más significativo para mejorar la productividad, calidad y competitividad [15] y puede verse como un proce-

so de transformación de recursos que tiene como entrada recursos naturales, bienes, o productos semi-manufacturados y como salida se obtienen bienes consumibles de capital y semi-manufacturados. El *Technology Atlas team* identifica cuatro componentes de la tecnología [14] (ver figura 1.2):

- *Techno-ware* Relacionado con objetos: Herramientas, equipos, máquinas, vehículos, facilidades físicas, instrumentos, dispositivos y fábricas
- *Human-ware* Relacionado con personas: Habilidades en conocimiento experimental, sabiduría, creatividad, experiencia y competencia.
- *Info-ware* Relacionado con la información: Incluye todo tipo de documentación y datos acumulados relacionados con especificación de procesos, procedimientos, diseños, teorías, y observaciones.
- *orga-ware* Relacionado con la Organización: Acuerdos y alianzas necesarias para facilitar la integración de los componentes técnico, humano, y de información. Involucra asignación, sistematización, organización y redes de comunicación.

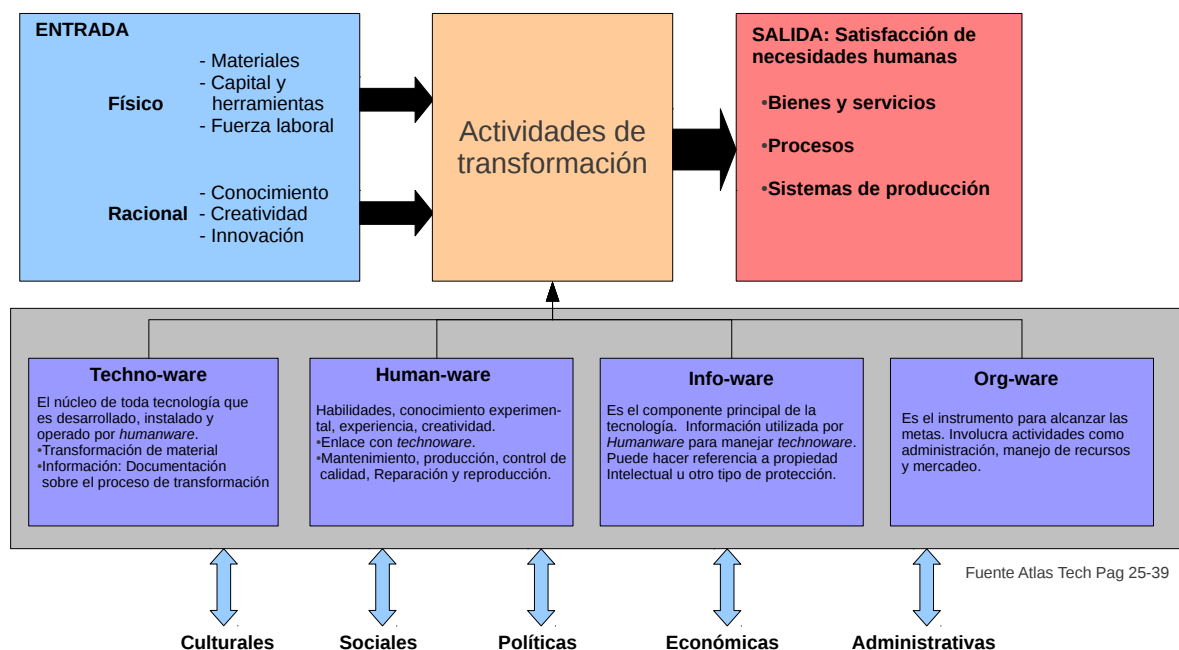


Figura 1.2: Modelo del proceso de transferencia de tecnología indicando la composición de los canales formales e informales

El uso efectivo de estos cuatro componentes requiere el cumplimiento de ciertas condiciones: el componente técnico requiere de personal con habilidades específicas; para mejorar la eficiencia del sistema, el componente humano necesita de adaptación y motivación; se debe actualizar el sector de la información a medida que la organización cambia para adaptarse a nuevas condiciones o requerimientos. **No es posible realizar operaciones de transformación ante la ausencia de uno de estos cuatro componentes.** La interacción de estos cuatro componentes puede ser resumida de la siguiente forma:

- *Tecnaware* constituye el núcleo de cualquier tecnología, es decir, una habilidad de transformación, y es desarrollada, instalada y operada por *humanware*.
- *Humanware* o las habilidades individuales representan el elemento clave de cualquier operación de transformación guiada por el *infoware*.
- *Infoware* almacena conocimiento acumulado para ahorrar tiempo en el aprendizaje individual. Es generado y utilizado por *humanware* para los procesos de toma de decisiones y operaciones.
- *Orgaware*, o el marco de trabajo administrativo, adquiere y administra el *tecnaware*, *humanware* e *infoware* con el fin de realizar la operación. *Orgaware* se compone de las actividades de planeación, organización, activación, motivación y control de operaciones.

La tecnología no está asociada a un sistema socio-económico abstracto; se encuentra fuertemente relacionada con un espectro amplio de las necesidades humanas, influenciadas por las condiciones físicas existentes o por factores culturales derivados de las especificidades históricas de diferentes grupos sociales [16].

Concepto de Transferencia Tecnológica

Odedra [17] define la transferencia tecnológica como el problema de transferencia de conocimiento (o know-how) sobre como funciona un determinado sistema, como operarlo y desarrollar sus aplicaciones, como mantenerlo y si es necesario, como producir sus componentes y montar un sistema similar. La transferencia tecnológica se considera exitosa cuando los receptores de la tecnología asimilan estos conceptos para suplir sus necesidades locales.

Según Jolly [18] la innovación tecnológica es entendida como un nuevo método, medio o capacidad del individuo para realizar una determinada actividad. El resultado de la transferencia tecnológica puede ser la aceptación de una práctica común en otros lugares, o la aplicación de una técnica diseñada para otro uso en la solución de problemas locales; debe distinguirse del proceso general de difusión de tecnología: un movimiento no planeado de artículos sociales y tecnológicos de un lugar a otro sin ningún esfuerzo centrado en la transferencia. La transferencia tecnológica incluye la difusión de conocimiento

científico y la preocupación por la transformación del conocimiento en innovaciones útiles. El conocimiento es lo que queda al final de un proceso documentado y difundido de forma apropiada. Para que la transferencia tecnológica sea exitosa es necesario transferir los componentes de la tecnología, es decir: los conocimientos técnicos, las habilidades humanas, la información y la estructura de la organización.

Tipos de Transferencia Tecnológica

La transferencia tecnológica se clasifica en [19] material, de diseño y de conocimientos:

- Transferencia material: Artefactos tecnológicos, materiales, productos finales, componentes y equipos.
- Transferencia de diseño: Diseños, proyectos y know-how para fabricar productos diseñados previamente (los productos son copiados para producirlos localmente).
- Transferencia de capacidades: Proporciona know-how y software no solo para fabricar componentes existentes, sino, innovar y adaptar tecnologías existentes para producir nuevos productos; y transferencia de material, diseño y capacidades
-

La transferencia de material no constituye una transferencia tecnológica real, ya que no genera el conocimiento necesario para transformarlos y generar nuevos productos que cumplan con las necesidades locales. La transferencia de diseños permite adquirir mayor conocimiento sobre la tecnología transferida, sin embargo, es necesario que el país receptor cuente con la plataforma tecnológica adecuada para absorber estos conocimientos, de lo contrario no se generarán nuevos productos y las actividades se limitarán al ensamblaje de productos pre-manufacturados. La transferencia de capacidades es ideal, ya que proporciona las herramientas necesarias para que la transferencia sea exitosa, está asociada a una transferencia de conocimiento, lo cual es vital para entender plenamente la tecnología, mejorando las habilidades de los profesionales del país receptor.

Canales para la Transferencia de Tecnología

Erdilek y Rapoport [20] clasifican los mecanismos en *formales e informales*:

- Formales: Acuerdos de licenciamiento, inversión extranjera, compañías conjuntas, acuerdos de cooperación en investigación y arreglos de producción conjunta

- Informales: no involucran acuerdos entre las partes y son difíciles de detectar y monitorear, por ejemplo: exportación de productos tecnológicos o bienes de capital; ingeniería inversa; intercambio de personal técnico y científico; conferencias de ciencia y tecnología; ferias y exposiciones; educación y entrenamiento realizado por extranjeros; visitas comerciales; literatura abierta (artículos, revistas, libros técnicos) y espionaje industrial.

Adicionalmente, existe una división basada en la naturaleza de la institución que proporciona los recursos para que se realice la transferencia, la institución puede ser de carácter: *abierta* o *privada*:

- Abierta: La tecnología y el conocimiento son considerados bienes públicos, no existen restricciones para acceder a la información necesaria para adquirir, usar y transformar estos conocimientos en productos comerciales, y su éxito radica en obtener la máxima difusión posible para que los usuarios de este conocimiento mejoren el material existente y contribuyan con experiencias personales.
- Privada: La tecnología y el conocimiento se genera para fines privados, la utilización de este conocimiento esta sometida a acuerdos comerciales, no es posible entender las bases de la tecnología, por lo que no se pueden generar productos derivados

A continuación se realiza una descripción de los canales más utilizados para la transferencia de tecnología y conocimiento en países en vías de desarrollo ([15] [17] [21] [10]) indicando en cada caso sus ventajas, limitaciones y desventajas.

- **Adquisición de IT** La adquisición de equipo ha sido uno de los mecanismos de transferencia más importantes para los países en desarrollo; la experiencia de países que lograron un rápido desarrollo económico e industrial muestra que la adquisición de una gran cantidad de tecnología foránea jugó un papel importante en este proceso. Sin embargo, si la compra de equipo no está unida a la transferencia de los conocimientos asociados a dicha tecnología, solo se adquiere el conocimiento necesario para utilizar estas máquinas, y por lo tanto, no se puede fabricar una máquina similar. Sin embargo, este conocimiento sobre el sistema puede ayudar a concienciarse sobre la importancia de la tecnología e impulsar la formación de capital humano.

En el campo de aplicación de la industria electrónica, las grandes multinacionales dominan el mercado de software y hardware y hacen que sea imposible el ingreso de pequeñas compañías locales, lo que se traduce en que el mantenimiento y servicios asociados al hardware, así como los ajustes de software, sean realizados por los proveedores de las multinacionales y en muy pocos casos los usuarios de esta tecnología adquieren

habilidades para sostener el equipo. La transferencia se realiza a subsidiarias de las multinacionales, con lo que la transferencia es poca.

- **Educación y Entrenamiento** Educar a las personas a través de cursos y entrenamiento en el país y enviándolas al extranjero para otros estudios es una forma de adquirir know-how sobre nuevas tecnologías, o tecnologías que no se utilizan en el país de origen. Muchas instituciones ofrecen carreras en ingeniería electrónica, ciencias de la computación y afines, algunas de ellas utilizan modelos pedagógicos utilizados en países desarrollados, los que no han sido adaptados plenamente a la infraestructura tecnológica local, y no es raro encontrar estudiantes que no están satisfechos con su profesión al finalizar los cursos[17]. La transferencia tecnológica no ocurre cuando estudiantes formados en el exterior no pueden aplicar sus conocimientos en su país de origen, por lo que es necesario crear políticas que definan que áreas de estudio son prioritarias para el país.

Las multinacionales también ofrecen cursos de capacitación, sin embargo, se limitan al uso de sus productos, creando dependencia hacia sus herramientas. Adicionalmente, existen centros privados de capacitación que ofrecen cursos para el manejo de paquetes y lenguajes de programación; estos centros aprovechan la falta de centros de enseñanza tecnológica y personal calificado para cobrar altas sumas de dinero, lo cual limita el acceso. Programas académicos inapropiados, acceso limitado a libros y computadores, falta de facilidades para capacitación, reduce la efectividad de la educación y capacitación como canal para la transferencia tecnológica.

- **Asistencia Técnica** La ventaja de contratar consultores externos radica en el ahorro de tiempo y dinero, ya que, utilizar personal local implicaría un gran esfuerzo y posiblemente se tendrían que asumir errores costosos en el proceso; sin embargo, no es bueno confiar a consultores externos la responsabilidad de construir habilidades locales, ya que reduce el desarrollo de estas habilidades, especialmente, la del personal encargado de manejar proyectos. En algunas ocasiones los consultores no están familiarizados con las condiciones y requerimientos locales, con lo que diseñan soluciones que no se ajustan a las necesidades, lo que significa que el sistema es sub-utilizado y la transferencia de tecnología es poca. La falta de personal calificado hace que los consultores se encarguen de todas las tareas del proyecto, lo que aumenta su carga de trabajo y disminuye la posibilidad de entrenamiento de personal local[17].

En algunas ocasiones los consultores son representantes de grandes multinacionales y todas sus acciones están dirigidas a aumentar la dependencia con los productos generados por dichas transnacionales y a ignorar de forma sistemática opciones que pueden ayudar a la transferencia de conocimiento, llegando hasta el punto de influir en la formulación de políticas para transferencia tecnológica.

- **Licenciamiento** El licenciamiento es un canal que se utiliza para transferencia de know-how sobre productos o procesos, es aplicado de forma individual o en combinación con otros instrumentos como investigación extranjera, importación de maquinaria o de técnicos. Sin embargo, no es efectivo si no se acompaña de habilidades administrativas y de producción; adicionalmente, es necesario contar con una infraestructura tecnológica adecuada, capacidades locales de fabricación de hardware y software y políticas de gobierno adecuadas [17].
- **Inversión Extranjera Directa** La inversión directa de multinacionales asegura una rápida transferencia de información tecnológica, pero no necesariamente del entendimiento o know-how. Lo que hace que la tecnología transferida a través de este canal sea mínima. Las grandes multinacionales pueden tener cierto control político en los países en vías de desarrollo, hasta tal punto que son asesores de instituciones encargadas de fijar políticas para la transferencia tecnológica [17].

La efectividad de cada canal depende de la naturaleza de la tecnología que se va a adquirir, el tipo de organización y de las capacidades de absorción del receptor. La tecnología es efectiva únicamente cuando la economía del país es capaz de utilizarla; cuando se transfiere una tecnología se debe contar con la capacidad para adquirirla y se deben generar las actividades necesarias para mejorar la plataforma tecnológica, incluyendo la educación y la capacitación, de tal forma que el país sea capaz de absorberla y generar nuevos productos que satisfagan necesidades locales.

La aproximación de este trabajo se centra en la educación y entrenamiento como canal para la transferencia tecnológica; una de las razones para esta elección es la dificultad que se presenta en Colombia para acceder a información especializada. Suministrando una serie de conocimientos que pueden usarse como punto de partida para el desarrollo de aplicaciones comerciales o como material para la capacitación de personal especializado proporcionando un canal de comunicación entre los diseñadores locales y la industria manufacturera; adicionalmente, se proporcionará una metodología de diseño basada en el uso de herramientas abiertas lo cual reduce de forma considerable la inversión de capital en herramientas de desarrollo.

Obstáculos para una Transferencia Exitosa

La cantidad de conocimiento y tecnología transferida se ve afectada por políticas gubernamentales, la situación económica, **facilidades de educación y capacitación**, personal calificado, aspectos organizacionales y sociales, proveedores de tecnología e infraestructura tecnológica. El gobierno juega un papel importante en el proceso de transferencia tecnológica ya que puede invertir en la infraestructura para impulsar una determinada tecnología o des-estimular su uso. Estas políticas son dependientes de la situación económica del país y del entendimiento de la importancia de la transferencia por parte de sus

dirigentes. Las personas son las que finalmente absorben el know-how tecnológico, si no existe el suficiente personal disponible y dispuesto, el proceso de transferencia se detendrá.

La administración a nivel de organización juega el papel más importante en el proceso de transferencia tecnológica. La resistencia o el desconocimiento a la tecnología, la adquisición de tecnología por motivos particulares que no contemplan la implementación y la capacitación. Por esta razón, es necesario que los encargados de tomar las decisiones y trazar políticas, conozcan la tecnología, o que estén conscientes de su importancia. La transferencia tecnológica debe ser un proceso de dos vías, por lo que es indispensable tener habilidades adecuadas en investigación, capacidades organizacionales y de ingeniería para que estos conocimientos sean asimilados y utilizados en la solución de problemas locales. Es necesario que la adquisición de tecnología obedezca a un plan y que esta tecnología supla una necesidad real, de lo contrario los equipos adquiridos y la capacitación recibida no serán utilizados. Por otro lado, la tecnología adquirida que no es asimilada y transformada en herramienta para la solución de problemas locales aumenta el grado de dependencia, lo que representa justamente lo contrario a lo que se debe buscar en una actividad de transferencia tecnológica.

Los procesos de transferencia tecnológica son influenciados de forma directa o indirecta por las infraestructuras organizacionales y tecnológicas de los países, los cuales, deben exceder sus capacidades para absorber la tecnología transferida. Esta transferencia es efectiva solo si la economía del receptor es capaz de utilizarla. Si un país cuenta con los recursos económicos necesarios para adquirir la tecnología, debe mejorar la infraestructura para soportarla, incluyendo la educación y las facilidades de entrenamiento, así como los enlaces de telecomunicaciones [10].

La falta de facilidades de educación y capacitación afecta la transferencia del know-how, obstaculizando el desarrollo de habilidades a través del proceso de aprendizaje. La carencia de estas facilidades limita la difusión del conocimiento; la pérdida de estas habilidades se puede originar porque la transferencia no se realizó o porque la infraestructura no lo permite.

Recomendaciones para Obtener una Transferencia de Tecnología Exitosa

Estudios consultados [10] [11] [8] [9] [7] [4] [22] coinciden en que para que se presente una transferencia tecnológica exitosa, es decir, para que los elementos técnicos, habilidades humanas, la documentación y la organización asociadas a una determinada tecnología, puedan ser asimilados por personal calificado (disponible y dispuesto) para posteriormente transformar estos conocimientos en la creación de nuevos productos o servicios que suplan necesidades locales es necesario:

Fomentar la creación de empresas de base tecnológica El gobierno debe crear facilidades y créditos para que empresas tecnológicas con la capacidad de innovación puedan realizar su actividad comercial (productos o servicios)

y de esta forma crear nuevos empleos, y aumentar la demanda de servicios tecnológicos. Así mismo, las universidades deben fomentar la creación de empresas que comercialicen productos derivados de sus actividades de investigación y acompañarlas en el proceso de consolidación.

Promoción de la transferencia tecnológica El gobierno y las Universidades deben centrar sus esfuerzos en identificar las necesidades de la sociedad y cambiar sus prioridades para darles solución, las universidades deben realizar proyectos de aplicación que puedan ser utilizados por el sector productivo a corto o mediano plazo; crear políticas que permitan hacer llegar el conocimiento generado a los diferentes sectores de la sociedad. Las políticas de gobierno deben desalentar la compra de equipo que solo transfiera conocimiento sobre su operación y no permita la creación de nuevos conocimientos a partir de ellos; así mismo, debe formular políticas que protejan las empresas locales de base tecnológica des-estimulando el ingreso de productos similares provenientes del exterior, premiando a las industrias nacionales que realicen productos innovadores ya sea con beneficios tributarios temporales o con la adjudicación de créditos condonables destinados al desarrollo de nuevos productos. Universidad, gobierno e industria deben trazar políticas que definan las áreas en las que se deben formar los profesionales en el exterior, las cuales deben estar en sintonía con el estado de la plataforma tecnológica, el sector productivo y el entorno social del país; estas políticas deben cambiar a medida que se mejora la plataforma tecnológica local y se presentan cambios en el entorno mundial. Se debe trabajar en la creación de una cultura de la transferencia tecnológica, resaltando su importancia para el desarrollo del país.

Promover la excelencia académica Debe existir una evaluación continua de los planes académicos para que se adapten a las necesidades del sistema productivo local, proporcionando a sus profesionales las habilidades requeridas por la industria, en especial las requeridas para crear líderes emprendedores que puedan crear nuevas empresas y que sean conscientes de la importancia del aprendizaje continuo. Por otro lado, es necesaria la creación de maestrías y doctorados que sigan políticas nacionales encaminadas al desarrollo económico, orientados a conectar la investigación con el sector productivo local y crear mecanismos de medición que permitan comparar y clasificar las instituciones académicas según las competencias de las habilidades (liderazgo y emprendimiento) de sus egresados y de esta forma determinar que instituciones son merecedoras de créditos, becas, o financiación para desarrollar actividades. Por último, y no menos importante, difundir habilidades generales para el uso de nuevas tecnologías a los diferentes sectores de la población.

Los centros de educación de diferentes niveles deben trabajar de forma conjunta para definir los objetivos y habilidades que requiere el sector productivo a nivel de formación tecnológica y profesional, con el fin de delimitar sus funciones para que no interfieran en el mercado laboral. Por otro lado, es necesario unificar contenidos de carreras similares y crear programas donde participen diferentes centros de formación con el fin de aprovechar los escasos recursos suministrados por el estado; creando canales de comunicación

que permitan compartir resultados de investigaciones para evitar repetirlos.

Promover la relación universidad empresa El sector productivo debe invertir en las actividades de transferencia tecnológica e investigación y desarrollo, ya que es uno de los directamente beneficiado con ellas. El gobierno debe desalentar las prácticas comerciales que no generan actividades de I+D, en especial las que solo comercializan productos manufacturados en países asiáticos ya que esto hace que la industria no vea la necesidad de crear productos propios y por lo tanto no se invierte en investigación y desarrollo, ni se contrata personal o bienes y servicios especializados. La academia debe proporcionar a la industria herramientas y profesionales que le permitan competir con productos provenientes del extranjero. Se debe crear consciencia en la industria de las ventajas de tener productos diseñados localmente, resaltando los servicios adicionales que pueden generarse al personalizar estos productos y proporcionar servicios derivados de su uso. Adicionalmente, se deben crear espacios donde los empresarios participen en los procesos de toma de decisiones y creación de políticas gubernamentales sobre educación e investigación y desarrollo. Para esto, es vital determinar que actividades económicas contribuyen al desarrollo tecnológico, cuales son generadoras de conocimientos y de esta forma incentivar su práctica. Por otra parte, las universidades deben continuar con sus labores de investigación en temas de actualidad y aumentar la visibilidad de la academia colombiana en el entorno científico mundial; así mismo, deben trabajar en problemas del entorno local, que aunque no tienen mucho reconocimiento a nivel internacional si refleja un grado de compromiso con el entorno social en donde ellas operan.

Alianzas para obtener y compartir recursos Como se mencionó anteriormente Colombia es el país de Sur-América que menos invierte en investigación y desarrollo, por esta razón es necesario crear alianzas estratégicas para compartir los escasos recursos disponibles. Esto, debido a que las comunidades científicas del país no están acostumbradas a unir esfuerzos, recursos y proyectos en programas colectivos; sus intereses particulares prevalecen sobre el interés de la comunidad [22]. Lo anterior, unido a la estructura de gobierno de los organismos gubernamentales que hacen ciencia y tecnología donde los investigadores son enfrentados entre si por los escasos recursos del estado, promueven estrategias individuales para conseguir dichos recursos impidiendo la cooperación.

En la Figura 1.3 se hace un resumen de las recomendaciones formuladas anteriormente para lograr una transferencia tecnológica exitosa y como estas están relacionadas con actividades requeridas para el mejoramiento de la plataforma tecnológica y la creación de una cultura de transferencia de tecnología en el área de diseño de sistemas embebidos. Área en la que el país puede competir a corto plazo con productos provenientes de países industrializados.

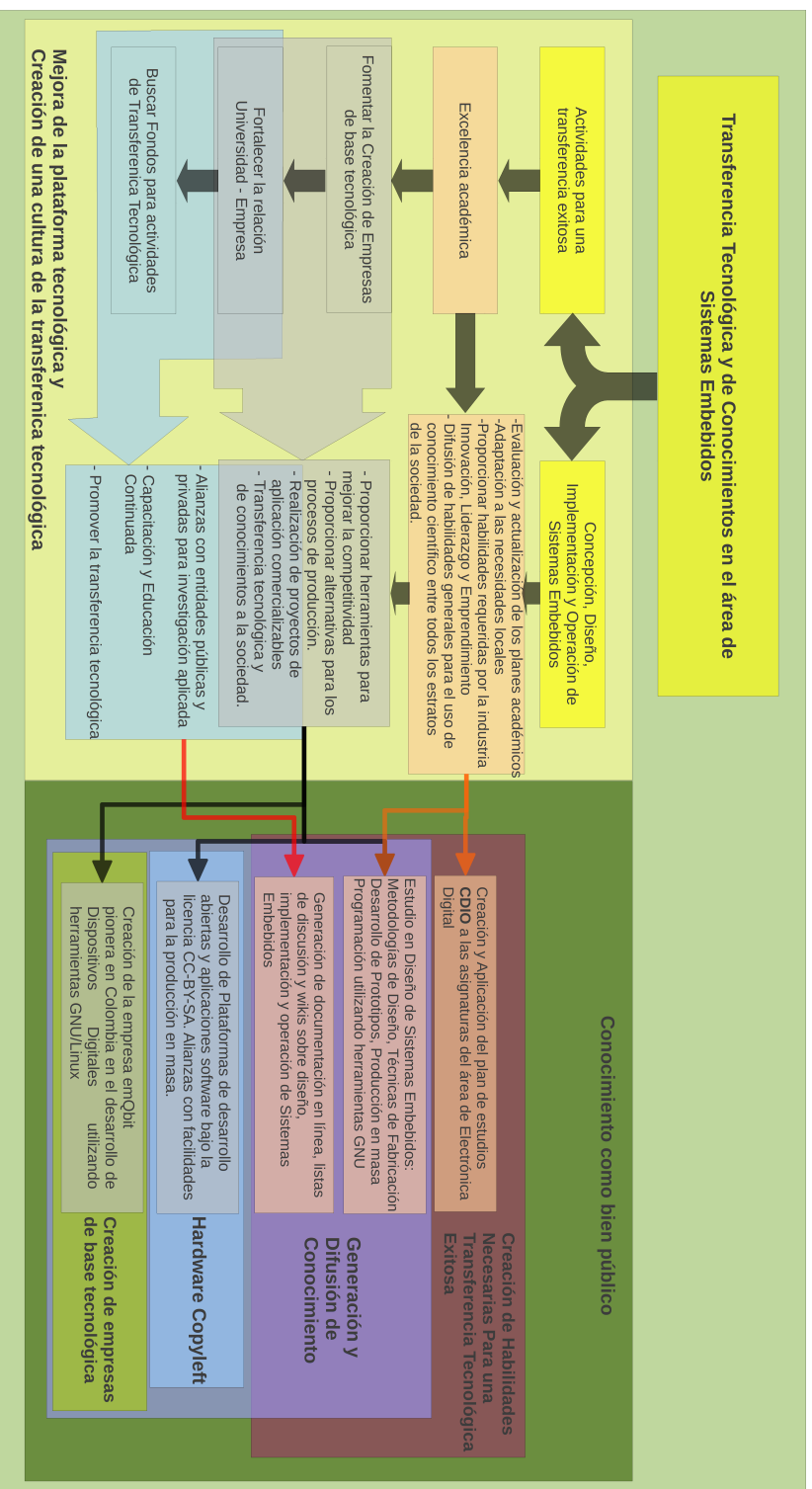


Figura 1.3: Resumen de las recomendaciones para una transferencia tecnológica exitosa

Metodología para la Transferencia Tecnológica y de Conocimientos en el Diseño de Sistemas Embebidos

La metodología utilizada en este trabajo se basa en la formulada por Cohen [15], la cual ha sido utilizada en trabajos recientes en diferentes partes del mundo [23] [24] [25] [26]. En la figura 1.4 se muestran las etapas que componen esta metodología; en las cinco primeras se realizan acciones encaminadas a entender, asimilar, aplicar y desarrollar la tecnología y en la última se realizan actividades de difusión que permitan el acceso de los conocimientos generados a quien esté interesado.

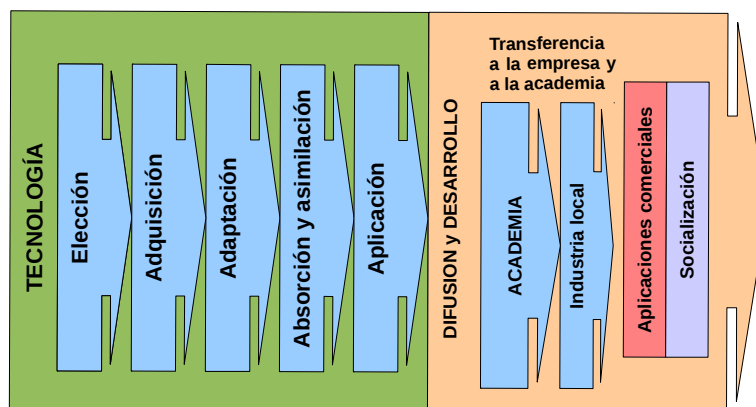


Figura 1.4: Etapas de la metodología propuesta para la transferencia tecnológica y de conocimientos en el área de diseño de sistemas embebidos

A continuación se describirán brevemente las etapas de la metodología; las primeras etapas elección y adquisición están relacionadas con la elección del contenido a ser transferido, mientras que la adaptación, absorción, asimilación y aplicación están relacionadas con la capacidad de absorción y aplicación del conocimiento; la difusión es el proceso por el cual los resultados son comunicados a través de ciertos canales a la sociedad.

Elección

En la primera etapa se evalúa el estado de la plataforma tecnológica existente para identificar facilidades y necesidades; con esta información se busca una tecnología que pueda ser implementada con el estado actual de la plataforma tecnológica; se identificarán los niveles de complejidad de dicha tecnología para determinar una alternativa que pueda implementarse y de resultados a mediano y corto plazo con baja inversión de capital.

Adquisición

En esta etapa se adquieren equipos que utilicen la tecnología que se desea transferir; gracias a que el campo de aplicación de esta tecnología involucra una gran parte de las actividades humanas, es fácil obtener (comprar) dispositivos comerciales que la utilizan, por lo que no es necesario realizar ningún tipo de acuerdo con proveedores extranjeros. Adicionalmente, se realizará la adquisición de plataformas adecuadas de desarrollo hardware y software y se identificarán las herramientas de desarrollo que permitan su estudio y desarrollo de nuevas aplicaciones.

Adaptación

La adaptación se presenta cuando la sociedad encuentra posible y deseable realizar cambios para involucrar usos particulares de la tecnología; es un proceso dinámico que esta formado por [23]: una etapa inicial donde se proporcionan procedimientos adecuados para la transferencia física; seguida de una fase donde se proporciona conocimiento, habilidades, datos, y las herramientas necesarias para la evaluación; y una etapa de planeación, diseño e implementación del sistema de transferencia, planes y estrategias.

Para determinar si es posible y conveniente el uso de esta tecnología en la industria y la academia nacionales, se realizaron una serie de actividades encaminadas a adquirir conocimiento y habilidades que permitieron operar y programar los dispositivos digitales adquiridos previamente. Para esto se diseñó una metodología que permite el estudio gradual de diferentes tópicos asociados a esta tecnología (arquitectura, metodologías de diseño, programación básica, generación de aplicaciones, producción); la primera etapa consiste en la **adquisición** de un dispositivo comercial que permita realizar el estudio deseado; a continuación, con el uso de ingeniería inversa se identifica su arquitectura, las herramientas y vías para cambiar su funcionamiento, también se desarrollaron métodos para generación de aplicaciones similares a la original (**adaptación**). El siguiente paso consiste en la adaptación de técnicas de fabricación que permitan el diseño y construcción local de plataformas que tengan la misma funcionalidad y permitan su estudio, fácil adaptación y desarrollo de aplicaciones; en este punto, cuando se reunieron los conocimientos necesarios para desarrollar aplicaciones propias, se transmitieron a la academia y a la industria para que hagan parte de sus procesos de enseñanza y de diseño y producción respectivamente; finalmente se realizó la documentación del proceso de diseño de las plataformas de desarrollo y de las aplicaciones; toda esta información es distribuida bajo el esquema de licencias *Creative Commons* (CC) BY-SA: *atribución* (BY), se permite la distribución dando crédito al autor; *compartir de la misma forma* (SA), exige que todo trabajo derivado del uso de proyectos que con este esquema de licencias deben tener la misma licencia de los trabajos originales (esquema de licencias viral).

Absorción y asimilación

Los procesos de absorción y asimilación describen la capacidad del receptor para utilizar la tecnología y permiten identificar la efectividad y el éxito de la transferencia; la absorción es la capacidad del receptor de absorber tecnología de un sector y la asimilación es la capacidad de asimilar (analizar, procesar, interpretar y entender) y utilizar la tecnología absorbida en otro sector [23]. Es importante generar dos tipos de habilidades para soportar la tecnología: Técnicas: hardware, sistemas operativos, redes, tecnologías de la comunicación, aplicaciones software; Humanas: Habilidades y conocimientos necesarios para desarrollar, mantener, y manipular; habilidad para adaptar tecnologías al entorno local y futuro desarrollo. Es crucial contar con mecanismos de aprendizaje que permitan adquirir los conocimientos necesarios para operar y cambiar la nueva tecnología; este aprendizaje puede adquirirse por entrenamiento, seleccionando y contratando personal calificado o buscando posibles soluciones en recursos publicados. En este estudio se creó un banco de proyectos que pueden ser utilizados como base de futuros desarrollos y se diseñaron cursos para la enseñanza de metodologías de diseño y procesos de fabricación que usan la tecnología en estudio. Para la transferencia en diseño de sistemas embebidos se desarrollaron o adaptaron metodologías de diseño y procesos de fabricación que culminaron en el diseño e implementación de productos tecnológicos propios y en el desarrollo de proyectos académicos.

Aplicación

En esta etapa se incorporará y aplicará el conocimiento adquirido y asimilado en las etapas anteriores a la industria y a la academia; se realizó una prueba piloto con la participación de la Universidad Nacional de Colombia y la empresa colombiana radicada en Bogotá emQbit Ltda.

La línea de electrónica digital del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia está compuesta por cuatro asignaturas: Electrónica digital I, II, Sistemas Embebidos y Técnicas de integración; durante un período de dos años se incorporaron metodologías de diseño y de fabricación en estas asignaturas; los cambios se hicieron de forma gradual iniciando con la asignatura electrónica digital I, continuando con electrónica digital II, hasta llegar a sistemas embebidos. En el capítulo ?? se explica detalladamente el contenido de estas asignaturas y su adaptación a la iniciativa CDIO.

En el campo comercial, se trabajó con la empresa de base tecnológica emQbit para evaluar el impacto del uso de esta tecnología en la industria Colombiana; adicionalmente, emQbit proporcionó información sobre el estado de la industria electrónica en el país ayudando a detectar los obstáculos que enfrentan nuevas empresas en su ejercicio de suministrar soluciones a problemas locales, en el capítulo 2, se realiza un resumen de las actividades realizadas con esta empresa y se enumeran los obstáculos detectados durante su operación.

Difusión y Desarrollo

Esta etapa (en ejecución actualmente) busca involucrar a la mayor cantidad de centros educativos para diferentes niveles de formación (educación básica, media, técnica y profesional); empresas de base tecnológica e institutos gubernamentales en actividades que ayuden a concienciar a la comunidad académica de la importancia del uso de esta tecnología como parte de sus procesos académicos.

La tarea más importante en la fase de difusión, es la creación de una comunidad que utilice los conocimientos generados en todo el proceso, proporcione nuevo conocimiento que haga parte de este bien público y depure las herramientas y el contenido del mismo; por esto, es importante vincular a personas con diferentes intereses y niveles de formación; la primera comunidad se formó con profesores y estudiantes de las universidades UNAL, UIS, USTA, ULA, UDFJC, y las empresas emQbit y CorreLibre, los cuales han realizado hasta el momento la documentación de proyectos realizados durante los cursos del área de digitales; la publicación de todos los archivos necesarios para estudiar, entender, reproducir y programar 6 plataformas de desarrollo *copyleft hardware*. Para ayudar a la comunicación entre usuarios del recurso y a la difusión de sus proyectos, se creó una lista de correo donde se pueden discutir temas relacionados y se dispone de un wiki en donde se documenta el proceso de diseño de los proyectos; se configuró un servidor que permite subir archivos, trabajo multi-usuario y control de revisiones, lo que facilita el trabajo en equipo para usuarios que se encuentran separados geográficamente.

Factores Formales e Informales

Un programa de transferencia tecnológica debe incluir mecanismos que unan de forma eficiente la fuente del conocimiento con la utilización del mismo. Estos canales de comunicación son mecanismos de recursos humanos que pueden ser incorporados tanto en la fuente como en el destino [18].

Factores formales

Están formados por procedimientos para difusión, clasificación, almacenamiento y recuperación de conocimientos. En la metodología propuesta estos factores son (ver figura 1.5):

- **Documentación** Es el formato, organización, o presentación de la tecnología que será transferida. El formato y el lenguaje se relacionan directamente con el entendimiento del material por parte del receptor. En este caso se utilizan dos tipos de formatos para la documentación:
 - Código fuente. Archivos de texto correspondientes a: archivos de diseño de las placas de circuito impreso (esquemáticos, lista de materiales, layout), código en lenguaje de alto nivel (C, C++, LUA, Python, Perl, Java) para aplicaciones software, y código que utiliza

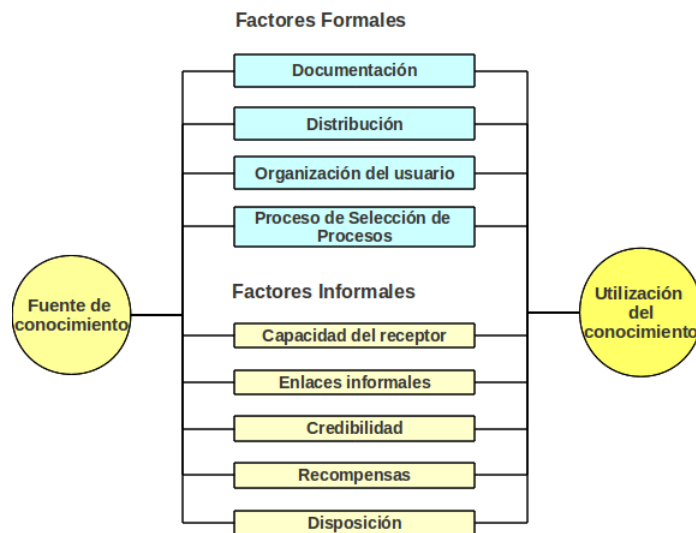


Figura 1.5: Canales formales e informales del proceso de transferencia tecnológica

. Fuente: [18]

lenguaje de descripción de hardware (VHDL, Verilog) para implementación en dispositivos lógicos programables.

- Tutoriales. Información en línea sobre: proceso de diseño, principios de funcionamiento, técnicas de fabricación; suministrados como páginas web, videos y documentos escritos.
- **Distribución** Constituye el canal físico a través del cual fluye la tecnología. Una medida de la efectividad del sistema de información tecnológica es la capacidad de permitir el contacto entre personas con necesidades y con posibles soluciones [27]. Para que el proceso de distribución sea exitoso, debe considerarse el intercambio personal; este canal ayuda a eliminar retardos en la investigación, ya que permite determinar el estado del arte de una determinada actividad o área de trabajo. Esta propuesta cuenta con 4 canales públicos que permiten el flujo de la información y facilitan la comunicación:
 - *Repositorio*. Permite la descarga de los archivos necesarios para estudiar, entender y modificar los conocimientos adquiridos en el presente trabajo.
 - *Sistema de control de versiones*. Permite coordinar el trabajo distribuido entre personas separadas geográficamente.
 - *Lista de correo*. Permite la comunicación entre un grupo de personas.

- **Wiki.** Permite la realización de documentos útiles en la difusión y en la creación de nuevos proyectos.
- **Organización** El carácter público de este proceso de transferencia hace que los recursos se encuentren disponibles para todo el que esté interesado permitiendo el acceso a la información de forma fácil; evitando crear barreras para su difusión y crecimiento.
- **Selección de Proyectos** Proceso de selección para proyectos de investigación y desarrollo realizado por el proveedor con ayuda del receptor. Aunque esta iniciativa es pública y se proporcionan herramientas públicas para la creación de nuevos proyectos, la comunidad decidirá su calidad y decidirá cuales pueden ser considerados útiles y cuales no. Acá el papel del proveedor de la tecnología es asumido inicialmente por este proyecto, pero con el paso del tiempo esta función será asumida por los miembros de la comunidad; cualquier persona puede iniciar un nuevo proyecto utilizando los recursos disponibles; los miembros de la comunidad deciden contribuir o no a su desarrollo. Es importante que nuevos proyectos o investigaciones en nuevos tópicos comiencen como respuesta a una necesidad de la sociedad.

Factores informales

Los factores informales son de naturaleza sociológica y/o comportamental, y contribuyen fuertemente al éxito de la utilización del conocimiento por una determinada organización. En esta categoría se encuentran la comunicación, creencias y sentimientos sobre la fuente del conocimiento, percepción sobre la organización, supervisores y pares.

- **Capacidad** La capacidad del usuario para utilizar nuevas ideas que cubren un amplio espectro de rasgos que incluyen riesgo, poder, educación, experiencia, edad y confianza en sí mismos. La autosuficiencia es quizá el rasgo más valorado en un receptor de un proceso de transferencia de conocimientos, el programa académico presentado en el capítulo ?? busca crear esta habilidad en los profesionales para que puedan liderar procesos de continuo auto-aprendizaje.
- **Credibilidad** La credibilidad es una evaluación por parte del usuario, de la confiabilidad de la información. Es evaluada analizando la fuente y el canal del mensaje. La opinión cambia dependiendo de la fuente de la información, es decir, la credibilidad es influenciada por su fuente. Por esta razón, es importante controlar la calidad del material que se suministra como parte del recurso, si este proceso no es muy exigente, usuarios inconformes pueden generar un clima de incertidumbre sobre la utilidad de los conocimientos que se pretenden transferir.
- **Recompensa** Reconocimiento del sistema social del cual hace parte un individuo ante un comportamiento innovador. Ser parte de una comu-

nidad formada por diferentes sectores de la sociedad permite crear vínculos entre sus miembros. Los diferentes aportes que se realizan por parte de los miembros ayudan a definir su perfil y la forma en que la comunidad los define; de aquí pueden nacer vínculos laborales o académicos.

- **Disposición** La habilidad y/o deseo del individuo para aceptar un cambio en la organización de la cual es miembro; así como la capacidad de adopción de nuevas ideas. Aunque una idea haya sido aceptada intelectualmente, toma un período de tiempo antes de ser incorporada en la forma de pensar. Ser consciente de la importancia de una nueva idea no es suficiente para asegurar su uso; debe existir una disposición, un interés, una motivación personal para utilizar un mejor método, proceso o concepto.

Esta propuesta implica que un gran esfuerzo personal en la concepción, diseño, construcción y programación de un dispositivo digital, sea suministrado a la sociedad de forma gratuita; permitiendo que cualquiera pueda beneficiarse de él y a cambio “solo” se recibe el crédito por el trabajo realizado. Al permitir que un trabajo sea utilizado por otras personas y estas personas sepan quien es su creador, puede convertirse en una referencia y es posible obtener beneficios económicos realizando ajustes o nuevas versiones para personas o empresas que no están interesadas en el desarrollo.

CAPÍTULO 2

PLAN DE ESTUDIOS PARA LA ENSEÑANZA / APRENDIZAJE DE SISTEMAS EMBEBIDOS

2.1. Introducción

Qué es un Sistema Embebido

Un Sistema Embebido (ES) es un sistema de propósito específico en el cual, el computador es encapsulado completamente por el dispositivo que el controla. A diferencia de los computadores de propósito general, los sistemas embebidos son diseñados para una aplicación específica, es decir, estos sistemas realizan un grupo de funciones previamente definidas y una vez el sistema es diseñado, no se puede cambiar fácilmente su funcionalidad; debido a su interacción con el entorno deben cumplir restricciones temporales estrictas, el término *sistemas de tiempo real* es utilizado para enfatizar este aspecto; son heterogéneos, es decir, están compuestos por componentes hardware (PLDs, ASICs) y software (μ -controladores, μ -procesadores, DSPs); tienen grandes requerimientos en términos de confiabilidad.

Arquitectura

En la Figura 2.1 se muestra la arquitectura típica de un Sistema Embebido. La cual integra un componente hardware (HW), implementado ya sea en un (CPLD, FPGA) o en un ASIC, (conocido con el nombre de tarea hardware) y un componente software (SW) capaz de ejecutar software; la parte del procesador está dividida en la CPU (En algunos casos posee una caché) y las unidades de Memoria.

Al momento de diseñar un sistema embebido se encuentran diferentes opciones de implementación, la más adecuada, resultará de un análisis económico donde se valora el costo de la solución ante el cumplimiento de los requerimientos del sistema; estas opciones son:

- Componente HW y SW integrado en un dispositivo semiconductor (Sys-

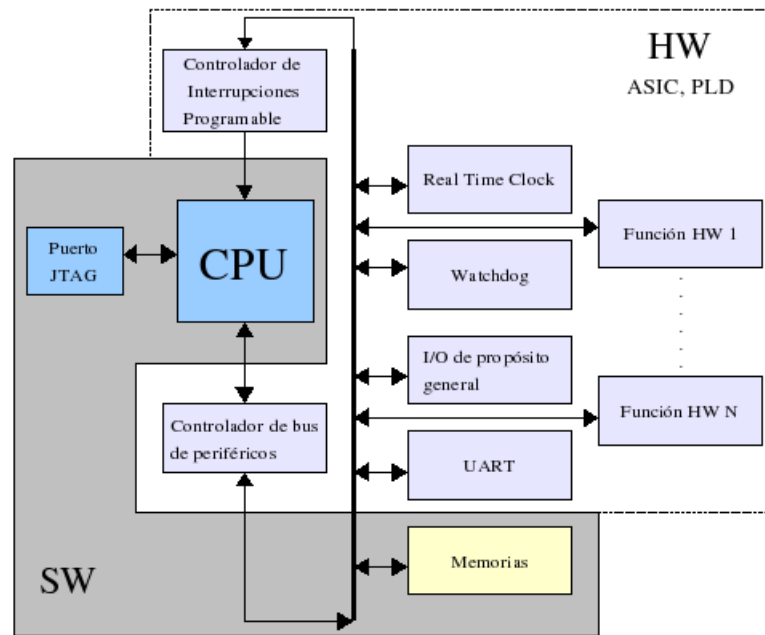


Figura 2.1: Arquitectura de un Sistema Embebido

tem on Chip - SoC, Circuito integrado de aplicación específica - ASIC): En la actualidad existen muchas compañías que fabrican procesadores de 32 bits conectados a una gran variedad de periféricos y fabricados en un mismo circuito integrado, lo que simplifica el diseño y reduce costos de materiales. Este tipo de implementación es muy popular en los dispositivos de consumo masivo (reproductores de MP3, consolas de juego, teléfonos celulares, etc.), debido a los grandes niveles de producción (del orden de millones de unidades) resulta más económico contar con un dispositivo que integre el mayor número de funcionalidades que disminuye el costo de componentes y reduce el área de circuito impreso.

- **Componente SW en un SoC y componente HW en un dispositivo lógico programable (CPLD, FPGA):** Cuando no existe en el mercado un SoC con la cantidad de periféricos requerida para una determinada aplicación, o con una funcionalidad específica, es necesario recurrir a la utilización de dispositivos comerciales que implementen dicha función; en algunas ocasiones el periférico puede realizar funciones poco comunes y no se proporciona comercialmente, la solución es entonces, implementar estas funcionalidades en un dispositivo lógico programable (PLD). También se recomienda la utilización de PLDs en sistemas que requieren la utilización de la misma funcionalidad un gran número de veces (puer-

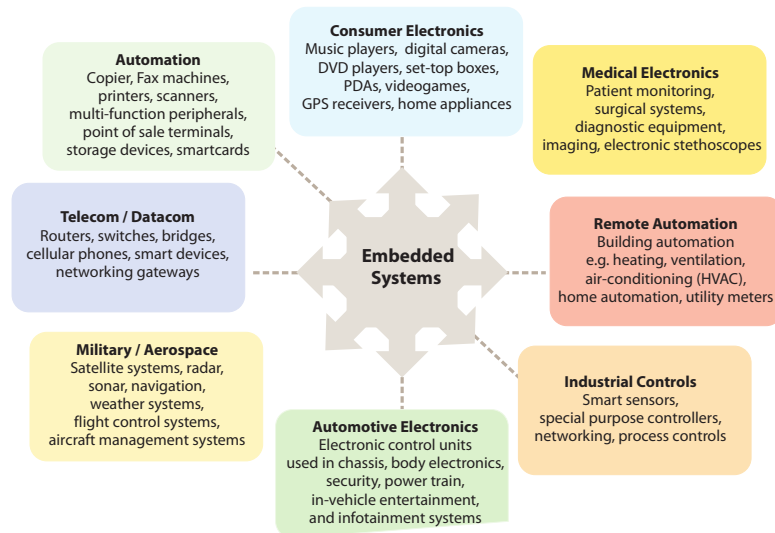


Figura 2.2: Aplicaciones de los Sistema Embebidos Fuente: TATA Consultancy services

tos seriales, pines de entrada/salida). Esta decisión está atada al nivel de producción, ya que al incluir un PLD aumenta el costo global del proyecto y el consumo de potencia (el consumo de las FPGAs actuales las hace poca prácticas para aplicaciones móviles).

- **Componente SW y HW en una FPGA:** Esta es la opción más flexible, pero la de menor desempeño, ya que al utilizar los recursos lógicos de la FPGA para la implementación del procesador (*softcore*) la longitud y capacitancia asociada a los caminos de interconexión entre los bloques lógicos aumentan el retardo de las señales, lo que disminuye la máxima velocidad de funcionamiento. Los procesadores *softcore* más populares en la actualidad son: Microblaze y Picoblaze de Xilinx, Leon de Gaisler Research y Lattice-Mico32 de Lattice Semiconductors.

Aplicaciones

Los sistemas embebidos se encuentran en casi todas las actividades humanas, a diario se interactúa con ellos, aún sin darse cuenta, ya sea porque son parte de la vida diaria o porque hacen parte de aparatos que se utilizan a diario. La figura 2.2 muestra los campos de aplicación de los sistemas embebidos.

Metodología de Diseño

El proceso de diseño de un sistema embebido comienza con la *especificación del sistema*, (ver Figura 2.3), en este punto se describe la funcionalidad y se definen las restricciones físicas, eléctricas y económicas del sistema. Esta especificación debe ser muy general y no deben existir dependencias tecnológicas de ningún tipo, se suelen utilizar lenguajes de alto nivel, como UML, MARTE C++, System-C, Spec-C. La especificación puede ser verificada a través de una serie de pasos de análisis cuyo objetivo es determinar la validez de los algoritmos seleccionados, por ejemplo, determinar si el algoritmo converge o si sus resultados satisfacen las especificaciones. Desde el punto de vista de la reutilización, algunas partes del funcionamiento global pueden tomarse de una librería de algoritmos existentes.

Una vez definidas las especificaciones del sistema, se debe realizar un modelamiento que permita extraer de estas su funcionalidad. El modelamiento es crucial en el diseño ya que de él depende el paso exitoso de la especificación a la implementación. Es importante definir que modelo matemático debe soportar el entorno de diseño; cada modelo posee propiedades matemáticas que pueden explotarse de forma eficiente para responder preguntas sobre la funcionalidad del sistema sin llevar a cabo dispendiosas tareas de verificación. Todo modelo obtenido debe ser verificado para comprobar que cumple con las restricciones del sistema.

Una vez se ha obtenido el modelo del sistema se procede a determinar su *arquitectura*, esto es, el número y tipo de componentes y su inter-conexión; este paso no es mas que una exploración del espacio de diseño en búsqueda de soluciones que permitan la implementación de una funcionalidad dada, y puede realizarse con varios criterios en mente: costos, confiabilidad y viabilidad comercial.

Utilizando como base la arquitectura obtenida en el paso anterior las tareas del modelo del sistemas son implementadas en los componentes; esto es, asignación de funciones a los componentes de la arquitectura. Existen dos opciones a la hora de implementar las tareas o procesos:

1. Implementación software: La tarea se va a ejecutar en un micro-procesador, micro-controlador o DSP.
2. Implementación hardware: La tarea se va a ejecutar en un sistema digital dedicado ASIC o PLD.

Para cumplir las especificaciones del sistema algunas tareas deben ser implementadas en hardware, esto con el fin de no ocupar al procesador en tareas cíclicas o que requieran mucho poder computacional, un ejemplo típico de estas tareas es la generación de bases de tiempos o la implementación de protocolos de comunicación. La decisión de que tareas se implementan en SW y que tareas se implementan en HW recibe el nombre de *particionamiento*; esta selección depende fuertemente de restricciones económicas y temporales.

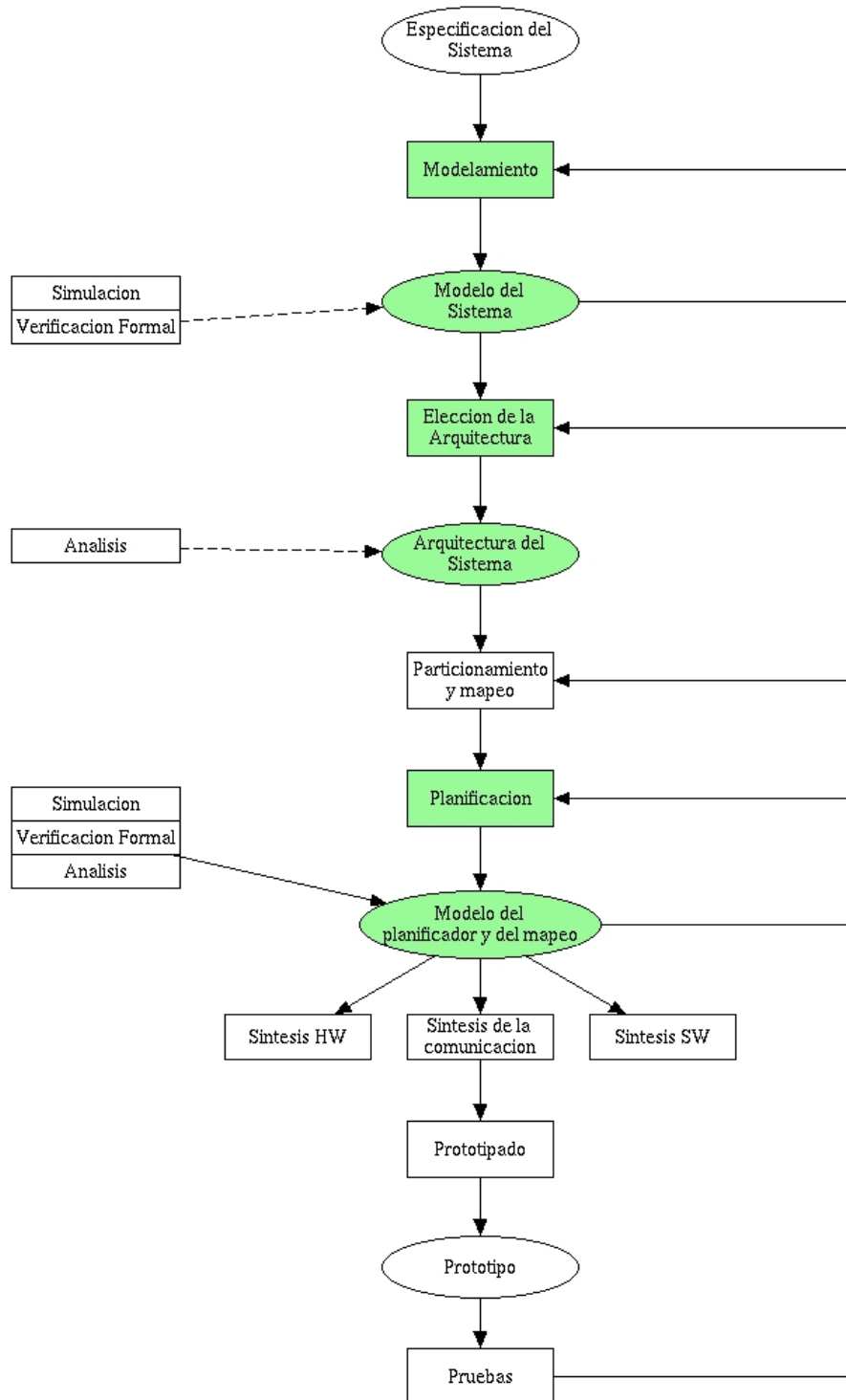


Figura 2.3: Flujo de diseño de un sistema embebido [28]

Las tareas software deben compartir los recursos que existan en el sistema (procesador y memoria), por lo tanto se deben tomar decisiones sobre el orden de ejecución y la prioridad de estas. Este proceso recibe el nombre de *planificación*. En este punto del diseño el modelo debe incluir información sobre el mapeo, el particionamiento y la planificación del sistema.

Las siguientes fases corresponden a la implementación del modelo, para esto las tareas hardware deben ser llevadas al dispositivo elegido (ASIC, FPGA, micro-controlador, micro-procesador, DSP) y se debe obtener el *archivo binario* con las instrucciones que implementan la funcionalidad de las tareas software y un *archivo de configuración* para implementarla funcionalidad de las tareas hardware en el PLD, este proceso recibe el nombre de *síntesis* HW y SW respectivamente, así mismo se deben sintetizar los mecanismos de comunicación entre las tareas hardware y software.

El proceso de prototipado consiste en la realización física del sistema, finalmente el sistema físico debe someterse a pruebas para verificar que cumple con las especificaciones iniciales.

Como puede verse en el flujo de diseño existen realimentaciones, estas permiten depurar el resultado de pasos anteriores en el caso de no cumplirse con las especificaciones iniciales.

Herramientas de desarrollo

Las herramientas de desarrollo son fundamentales en el proceso de diseño, de su estado y capacidades depende el tiempo necesario para completar un determinado diseño; la disponibilidad de aplicaciones y librerías que permitan acelerar el proceso de diseño son puntos claves a la hora de seleccionar el entorno de desarrollo; otro factor importante es su costo, ya que pequeñas y medianas empresas no pueden invertir grandes sumas de dinero en su adquisición; adicionalmente, es crucial contar con una adecuada documentación e información que ayude a resolver problemas que se presenten en el ciclo de diseño. Se pueden clasificar estas herramientas en *propietarias* y *abiertas*, las primeras requieren la compra de licencias para su uso y es necesario pagar por soporte; las segundas, son distribuidas de forma gratuita y existe una gran cantidad de listas de discusión donde puede encontrarse respuesta a una gran variedad de problemas o pueden ser formuladas nuevas preguntas a un grupo especializado de usuarios.

La utilización de herramientas abiertas reduce de forma considerable la inversión en la plataforma de desarrollo; pero, ¿es posible realizar el flujo completo de concepción, diseño e implementación utilizando software abierto?, ¿el estado de desarrollo de las mismas facilita el diseño?, ¿existen dispositivos comerciales desarrollados con estas herramientas?. Para resolver estas dudas se consultaron varias encuestas realizadas por compañías y sitios especializados para observar la tendencia en utilización de sistemas operativos; los sitios consultados (Venture Development Corp, linuxfordevices) indican que el 27.9 % de los diseñadores utiliza sistemas operativos licenciados comercialmente, el 23.5 % sistemas operativos obtenidos públicamente, 15.9 % desarrol-

lan su propio sistema operativo, el 12.1 % utiliza sistemas operativos comerciales basados en proyectos abiertos y el 30 % restante no utiliza un sistema operativo (ver figura 2.4; el porcentaje de utilización de sistemas operativos basados en proyectos abiertos es del 35.6 %, lo que supera a los sistemas operativos comerciales; es interesante observar que casi el 70 % de los encuestados utilizan algún tipo de sistema operativo, lo que da un claro indicio de la necesidad de este en el ciclo de diseño.

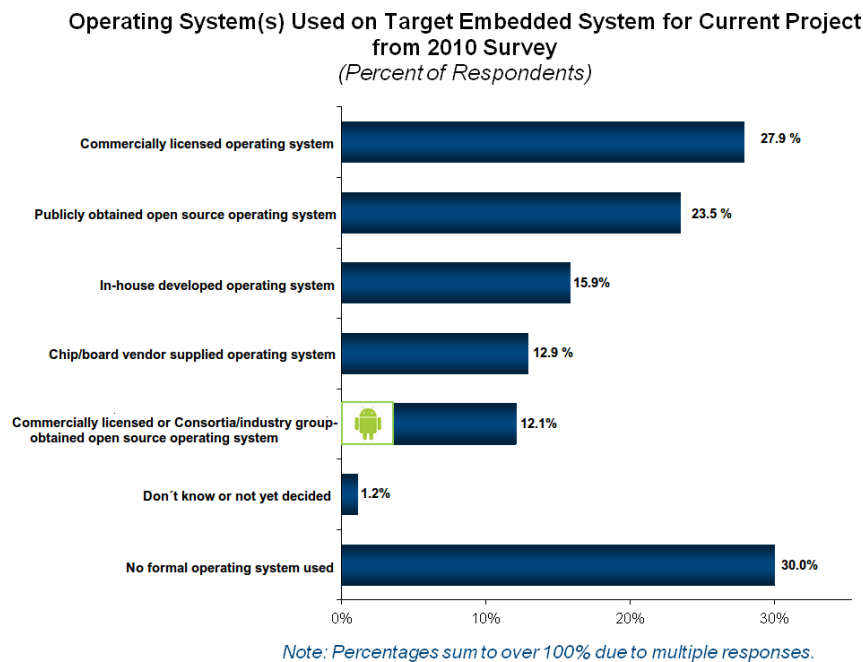


Figura 2.4: Comparación del uso de sistemas operativos Fuente: Venture Development Corp

De lo anterior se puede afirmar que más de la mitad de los diseñadores que utilizan sistemas operativos para sus aplicaciones eligen proyectos abiertos, lo que indica que estas herramientas tienen el grado de madurez necesaria para su uso en aplicaciones comerciales; por otro lado, una revisión del mercado de los teléfonos móviles realizada por *Admob* indica que android superó a los sistemas operativos de Apple y RIM (utilizado en los blackberry) y se proyecta que en el 2014 igualará a Symbian de Nokia. Android utiliza el kernel de Linux como base de sus aplicaciones y utiliza herramientas abiertas para su desarrollo; otras empresas como Motorola y Nokia utilizan Linux como plataforma de algunas de sus aplicaciones; así mismo, muchos routers basados en procesadores ARM o MIPS; una gran variedad de reproductores multimedia, tablets y mini-laptops; todo esto, unido a la disponibilidad de

foros de discusión donde programadores expertos y creadores de una gran variedad de aplicaciones brindan soporte a quien este interesado, hace de las herramientas abiertas y de Linux, una alternativa muy atractiva para desarrollar una metodología de diseño en torno a ella y adaptarla a las necesidades del país.

Linux Foundation publicó un estudio [29] donde calcula que el valor del kernel de Linux es de USD\$1400 millones; y son necesarios USD\$10.800 millones para desarrollar el stack completo de componentes desde cero; por este motivo, el uso de Linux reduce de forma considerable los costos finales del proyecto, *Black Duck Software*¹ posee la más completa base de datos de proyectos abiertos, representados en 200.000 proyectos, 4.9 billones de líneas de código; utilizando su detallado conocimiento de los proyectos abiertos y aplicando técnicas estándar de estimación de costos, calculan que el costo de desarrollo total del proyecto FOSS excede los USD\$387000 millones y representa la inversión colectiva de mas de dos millones de desarrolladores al año. Un análisis adicional, estima que el 10 % de las aplicaciones utilizadas para el desarrollo de aplicaciones en tecnología de la información se pueden reemplazar por proyectos abiertos, lo que ahorraría mas de USD\$22 billones al año.

Los proyectos de código abierto permiten a las organizaciones ahorrar tiempo y dinero en muchos aspectos, al no tener que pagar por las herramientas de desarrollo y por librerías y aplicaciones que pueden utilizar para la implementación de nuevos productos; permitiendo la inversión de tiempo y esfuerzo en proyectos que pueden ser comercializados rápidamente.

Dispositivos semiconductores

En la actualidad existe una gran oferta de SoCs, grandes compañías proporcionan constantemente nuevos dispositivos con una gran variedad de periféricos para diferentes aplicaciones. El procesador más utilizado para aplicaciones embebidas es el procesador ARM (Advanced RISC Machine). ARM no fabrica circuitos integrados, suministra sus diseños en forma de *netlist* a nivel de compuertas o a nivel de Lógica de Transferencia de Registros (RTL) en un lenguaje de descripción de hardware. Estas descripciones pueden ser utilizados en el proceso de diseño ASIC, permitiendo su integración con una gran variedad de núcleos IP (Intellectual Property); compañías como Atmel, Marvell, Freescale, NXP, Cirrus Logic, Samsung, Texas Instruments adquieren licencias que les permiten utilizar estos núcleos lógicos en la fabricación de sus SoCs.

Encuestas realizadas a diseñadores por el portal *linuxfordevices*² sobre sus preferencias en el procesador utilizado en sus proyectos; como se dijo anteriormente. ARM es el más utilizado (30 %) seguido de cerca por los basados en x86 (25 %), la arquitectura POWERPC (15 %), MIPS (10 %), DSPs (5 %). Por este motivo, en esta investigación se utilizaron dispositivos basados en proce-

¹<http://www.blackducksoftware.com> Líder mundial en el suministro de productos y servicios que aceleran el desarrollo software utilizando software libre

²Linuxfordevices es un sitio de encuentro y centro de noticias para la comunidad que utiliza Linux en dispositivos digitales.

sadores ARM (AT91RM9200 y SAM7 de Atmel, imx233 de Freescale), MIPS (JZ4740 de Ingenic) y el DSP de Analog devices BF532, cubriendo de esta forma un gran campo de aplicaciones.

Existen varias alternativas para la implementación de un sistema embebido: dispositivos lógicos programables (FPGAs, CPLDs), sistema sobre silicio (SoC), micro-controlador, micro-procesador, SoC + FPGA y ASIC; su utilización está determinada por el cumplimiento de restricciones temporales, funcionales y económicas. La opción tecnológicamente más avanzada es el uso de un Circuito Integrado de Aplicación Específica (ASIC) que implemente las tareas hardware y software en un solo dispositivo semiconductor; sin embargo, se estima que solo a partir de 10 mil unidades es conveniente utilizar un ASIC para reducir los costos de producción; esta es una cantidad muy alta para las pequeñas industrias electrónicas nacionales, y hasta donde llega el conocimiento del autor de este trabajo, por el momento no se conoce el primer circuito integrado fabricado y comercializado por una empresa colombiana o de existir, no es una práctica común. Por otro lado, las herramientas de desarrollo para el diseño de circuitos integrados son muy costosas y el grado de conocimientos de los diseñadores es mayor que en otro tipo de implementación.

Las FPGAs proporcionan una alternativa flexible para prototipado de ASICs, ya que permiten cumplir de forma rápida con los requerimientos del mercado (el proceso de fabricación de un ASIC toma varios meses). Sin embargo, para que un producto sea viable económicamente es necesaria una solución ASIC de bajo costo; en la actualidad existe la posibilidad de bajar los costos de producción gracias a la demanda de los mismos y a la utilización de una tecnología intermedia llamada *arreglo de compuertas*, la arquitectura de estos dispositivos proporciona una gran cantidad de transistores en arreglos genéricos en un sustrato común; y pueden ser utilizados para la implementación de *celdas estándar* o diseños *full custom*; utilizando esta técnica, es posible reducir el número de unidades necesarias para encontrar un punto económicamente viable de 5000 unidades (fuente Silicon-Pro).

Según Smith [30], la opción más económica para bajos volúmenes de producción son las FPGAs, a medida que la producción aumenta se produce un punto de quiebra entre las FPGAs y el arreglo de compuertas cerca a las 5000 unidades, y el segundo punto de ruptura se produce alrededor de las 50000 unidades, donde es más rentable la producción de un ASIC basado en celdas estándar. Es muy importante tener en mente estas cifras ya que ellas determinan la tecnología a utilizar. No obstante, vale la pena aclarar que en esta comparación no se tiene en cuenta la utilización de SoC, micro-controladores o micro-procesadores comerciales, por lo que no es necesariamente cierto que a bajos niveles de producción la opción más rentable sea la utilización de FPGAs; adicionalmente, debido a su alto consumo de potencia (del orden de 10 veces mayor que un ASIC) no es posible su utilización en aplicaciones móviles.

Los *System on Chip* (SoC) proporcionan una excelente alternativa para la implementación de aplicaciones modernas; integran un procesador de 32 bits

o un DSP que corre a frecuencias que van desde los 75 MHz hasta los 800 MHz y poseen periféricos que permiten controlar directamente una gran cantidad de dispositivos; muchos de ellos están diseñados para aplicaciones que requieren manejo de pantallas táctiles de cristal líquido, conexión a internet, diferentes medios de almacenamiento, reproducción de audio, manejo de sensores de imagen, entre otros; muchas de estas tareas son realizadas por procesadores dedicados diferentes al procesador principal del SoC. Adicionalmente, existe una gran gama de productos ofrecidos por diversos fabricantes como Freescale, NXP, Ingenic, Analog Devices, Altera, Marvell; por otro lado, su uso en aplicaciones de consumo masivo ha reducido el costo de estos dispositivos y es posible comprarlos en cualquier cantidad a precios que oscilan entre 4 y 20 USD.

Arquitectura: SoC, memorias, periféricos

Los SoCs comerciales se pueden dividir en dos grandes grupos dependiendo de la existencia o no de memoria no volátil para el almacenamiento del programa (memoria de instrucciones) dentro del SoC. Los que poseen memoria no volátil (hasta 512 Kbytes) normalmente incorporan una memoria RAM (hasta 32 kbytes) junto con una serie de periféricos (timers, I2C, SPI, USARTs, ADCs, Watchdog, USB device, canales para acceso directo a memoria - DMA); están diseñados para no utilizar componentes externos; normalmente este tipo de dispositivos utilizan procesadores que no tienen unidad de manejo de memoria ³ (MMU) como la familia ARM7, cuyas velocidades de ejecución varían entre los 50 y 70MHz. En la figura 2.5 se muestra la arquitectura típica de un sistema basado en estos dispositivos.

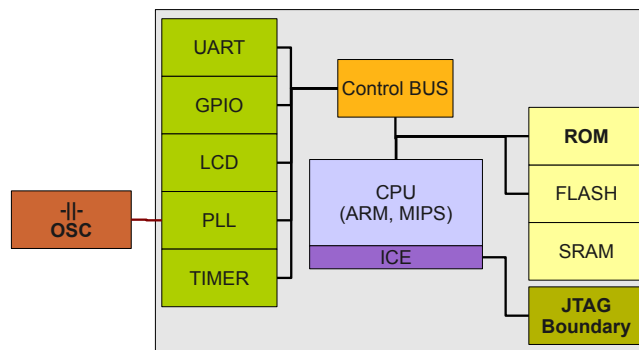


Figura 2.5: Arquitectura típica de un sistema embebido que utiliza SoC con memoria volátil interna

³La MMU permite el manejo de memoria, dentro de sus funciones se encuentra el traslado de la memoria física a virtual, protección de la memoria, control de cache, control de buses

Los procesadores que no poseen memoria no volátil interna se dividen en dos grupos: los que poseen o no unidad de manejo de memoria; en ambos casos, se cuenta con una memoria RAM interna (del orden de cientos de Kbytes) y adicionalmente a los periféricos mencionados anteriormente se suministran controladores para USB host, puertos SSI, controlador de LCD, codecs de audio, controlador de touch screen; debido a la ausencia de memoria no volátil interna, estos dispositivos poseen periféricos dedicados al manejo de memorias no volátiles NAND flash, NOR flash, SPI, I2C y SD; y memorias volátiles SDRAM y DDR; su velocidad de operación varía entre los 75MHz y 800MHz. En la figura 2.6 se muestra la arquitectura típica de un sistema basado en estos procesadores.

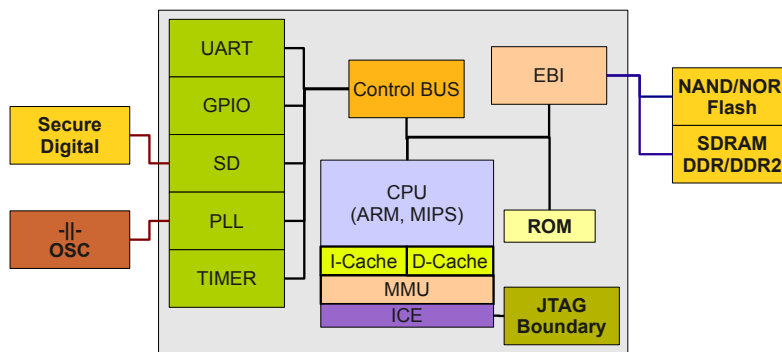


Figura 2.6: Arquitectura típica de un sistema embebido que utiliza SoC sin memoria volátil interna

Debido a la falta de memoria volátil, las aplicaciones de este tipo de dispositivos requieren una memoria externa para almacenar las aplicaciones básicas y datos, en la actualidad las más populares son las memorias NAND flash, NOR flash, SPI, EEPROM y SD. Normalmente, este tipo de procesadores son utilizados en aplicaciones que utilizan sistemas operativos, como se verá más adelante. Para que ciertos sistemas operativos (Linux, Windows CE) puedan ejecutarse se requiere una mínima cantidad de memoria RAM (del orden de los Mbytes), por esta razón es necesario incluir una memoria RAM externa, en la actualidad las más utilizadas son las SDRAM, DDR y DDR2.

Como conclusión, se puede decir que en el mercado existen diferentes arquitecturas de SoCs que permiten realizar proyectos con diferentes grados de complejidad y que se ajustan a las opciones más utilizadas por los desarrolladores; la opción más económica es la utilización de un SoC que incluya las memorias no volátiles y RAM internamente; sin embargo, hasta el momento no existen dispositivos con grandes capacidades de memoria Flash y RAM internas, por lo que no es recomendado su uso en ciertas aplicaciones. Utilizar un SoC que no integre las memorias no volátiles proporciona una mayor flexibilidad, ya que estos dispositivos proporcionan periféricos que pueden

controlar varios tipos de memorias, y se puede elegir la más económica, algo similar ocurre con la memoria RAM; sin embargo, el costo total de las memorias externas, SoC y área de circuito impreso es mayor que en el caso anterior.

Aunque estos procesadores operan a velocidades entre los 75 y 800 MHz, no todos los componentes del SoC operan a esta frecuencia, el componente externo que requiere la mayor velocidad de operación es la memoria RAM y puede estar entre los 50 y 130 MHz, los demás periféricos funcionan a frecuencias del orden de las decenas de MHz o KHz; por esta razón estos SoC suministran un circuito PLL que permite generar la frecuencia de operación a partir de cristales de frecuencias del orden de las decenas de MHz, lo que facilita el diseño de la placa de circuito impreso.

Cada periférico requiere una conexión específica con el dispositivo que controla, los SoC modernos incluyen la mayor parte del circuito internamente con el objetivo de minimizar las conexiones y dispositivos adicionales. Existen tendencias de los fabricantes a agrupar periféricos teniendo en mente dos aplicaciones: multimedia, e industriales; para aplicaciones multimedia se proporcionan controladores de LCDs, ratón, teclado, pantalla táctil, CODECs de audio, control de potencia, relojes de tiempo real, control de carga de baterías entre otros; para aplicaciones industriales se proporcionan controladores de red cableada, puertos CAN, I2C, y SPI.

Programación

Como se mencionó anteriormente, para este estudio se utilizaron herramientas abiertas para la creación de aplicaciones, en la figura 2.7 se muestra el flujo de creación de las tareas software usando la cadena de herramientas GNU [31]. La ventaja de utilizar estas herramientas (adicional a la económica) es el soporte a diferentes procesadores (24 diferentes CPUs, incluyendo micro-controladores de 8 bits), lo que permite la fácil migración entre CPUs; adicionalmente su alto grado de configurabilidad permite el cambio de disposición de las memorias volátiles y no volátiles de forma fácil (a través del script de enlazado). El proceso de generación del archivo binario que debe ser grabado en la memoria no volátil de la plataforma puede ser realizado en su totalidad por la cadena de herramientas GNU.

Inicialización de un SoC

Los SoC poseen la capacidad de *iniciar* desde diferentes periféricos; cuando se activa la señal de *reset* a un SoC que no posee memoria volátil interna, el primer programa en ejecutarse es el que reside en una memoria ROM interna, este programa revisa varios periféricos en búsqueda de un programa válido; los periféricos soportados varían según el fabricante, pero por lo general siempre soportan el uso de memorias NOR Flash (paralelas) y en SoCs más recientes memorias NAND Flash, SPI, o SD; sin embargo, la mayoría de SoC soportan memorias que se encuentran soldadas en la placa de circuito impreso, lo que hace necesario buscar métodos de programación de estas memorias

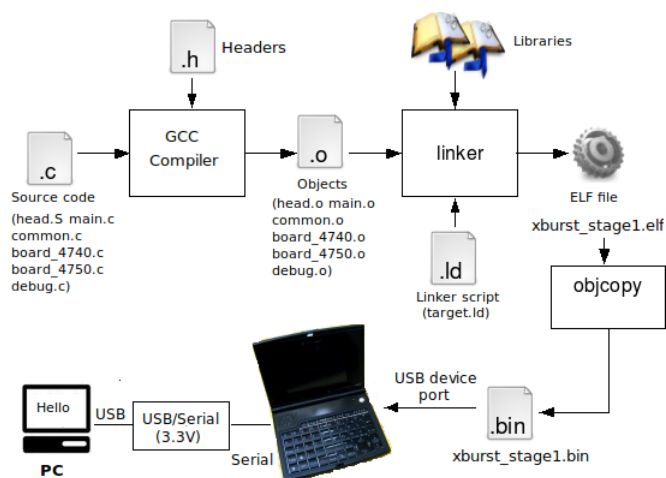


Figura 2.7: Flujo de diseño software para creación de aplicaciones.

que no implique desmontarlas o el uso de costosos conectores. En la mayoría de los SoC, cuando el programa residente en la ROM no encuentra ninguna aplicación válida en los periféricos soportados, establece una comunicación por uno de sus puertos seriales o USB y queda en espera del envío de un programa válido, el programa enviado es almacenado en la memoria RAM interna, y una vez finaliza su descarga se ejecuta desde la RAM interna. La figura 2.8 muestra este proceso.

Debido a que la RAM interna normalmente es pequeña (del orden de decenas de Kbytes), no es posible cargar aplicaciones muy grandes en ella, por lo que es necesario realizar el proceso de programación en varias etapas: en la primera etapa se carga una aplicación (*first - stage bootloader*) que se encarga de configurar el procesador (pila, frecuencia de operación), configurar la memoria RAM externa y habilitar un canal de comunicación para descarga de aplicaciones, de esta forma, es posible almacenar aplicaciones tan extensas como la capacidad de la memoria RAM externa (del orden de MBytes). En la segunda etapa se descarga una aplicación a la memoria externa que tiene la capacidad de programar las memorias no volátiles externas con la información proveniente de los diferentes periféricos de comunicación del SoC (como puerto serial, memoria SD, USB), este segundo programa recibe el nombre de *bootloader* y se auto-almacena en las primeras posiciones de la memoria no volátil, de tal forma que sea ejecutado después de la activación de la señal de *reset* y de la búsqueda que realiza el programa interno de la ROM.

Una vez programada la memoria no volátil con una aplicación válida, los SoCs realizan una serie de pasos para ejecutar las aplicaciones almacenadas en ella, esto debido a la poca capacidad de la memoria RAM interna. Como se dijo anteriormente, una vez se activa la señal de *reset* se ejecuta un programa

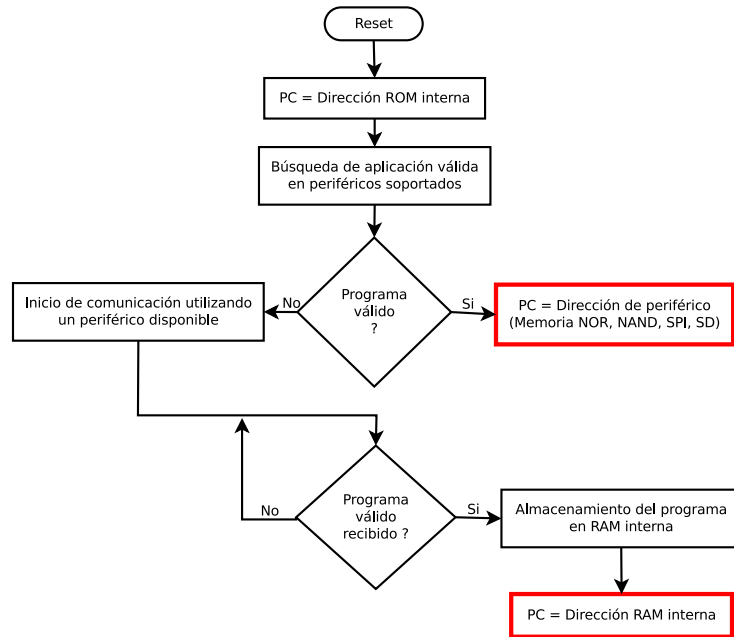


Figura 2.8: Inicialización de un SoC cuando las memorias no volátiles no están programadas.

contenido en la memoria ROM interna del SoC (figura 2.9 (a)), esta aplicación configura un periférico que permite la comunicación con los dispositivos de almacenamiento masivo externos, y además copia una determinada cantidad de información desde la memoria no volátil externa a la memoria RAM interna (figura 2.9 (b)), esto se hace porque el programa en la ROM no conoce la configuración de la plataforma y esta puede cambiar según la aplicación; después de esto ejecuta la aplicación copiada a la memoria RAM interna colocando en el contador de programa (PC) el valor correspondiente a la memoria RAM interna (figura 2.9 (c)).

Este programa (*loader*) está encargado de: configurar la memoria RAM externa (su capacidad varía dependiendo de la aplicación) y de copiar la aplicación propiamente dicha desde la memoria no volátil a la memoria RAM externa, (con lo que es posible cargar aplicaciones de mayor tamaño que la memoria RAM interna); finalmente, el *loader* ejecuta la aplicación almacenada en la memoria RAM haciendo que el contador de programa (PC) sea igual a la dirección donde se almacenó esta aplicación (ver figura 2.10)

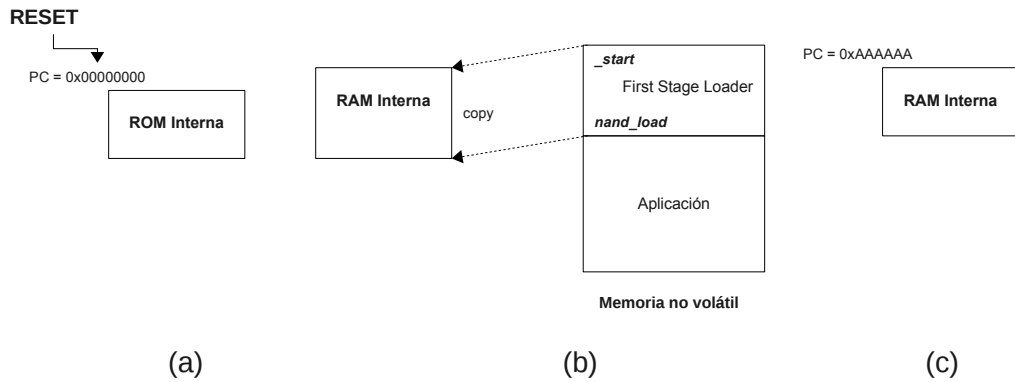


Figura 2.9: Inicialización de un SoC cuando la memoria no volátil está programada, parte 1.

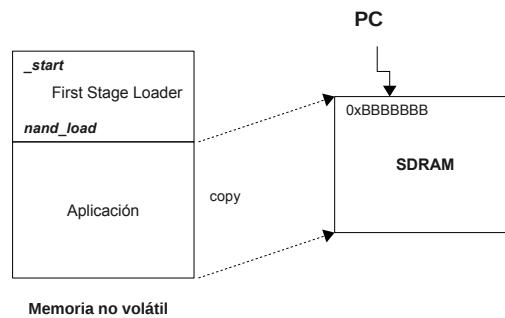


Figura 2.10: Inicialización de un SoC cuando la memoria no volátil está programada, parte 2.

Programación utilizando el puerto JTAG

Algunos SoCs no suministran un camino para la programación de la memoria RAM interna, para estos casos, se puede utilizar un periférico que la mayoría de los dispositivos proporciona: el puerto JTAG (creado inicialmente como un mecanismo para realizar pruebas en las tarjetas de circuito impreso para verificar la correcta conexión entre componentes, y verificar el correcto funcionamiento de los circuitos integrados) el cual, esta formado por un registro de desplazamiento (ver figura 2.11) que controla el paso de información desde y hacia cada uno de los pines del circuito integrado, permitiendo realizar varias operaciones. Con el paso del tiempo, se han adicionado funcionalidades a este protocolo y una de ellas es el control de circuitos especializados dentro de los SoCs para realizar emulación en circuito (ICE), suministrando un canal para la programación de la memoria RAM interna.

Algunos SoCs antiguos no poseen una unidad de emulación en circuito por lo que no es posible acceder a la memoria RAM interna, en estos casos es posible utilizar el protocolo JTAG para controlar directamente los pines del SoC conectados a las memorias no volátiles y ejecutar los protocolos de programación de las mismas; debido a que es necesario programar todos los registros de la cadena Boundary Scan, el tiempo de programación suele ser más largo que cuando se utiliza el ICE.

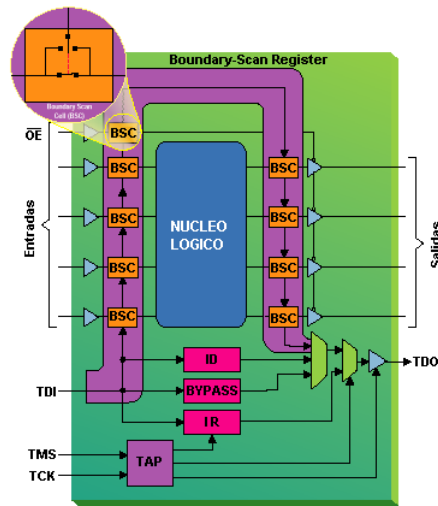


Figura 2.11: Cadena Boundary Scan fuente: Texas Instruments.

Aplicaciones *standalone* vs aplicaciones con sistema operativo

Los sistemas operativos proporcionan facilidades al programador que permiten acelerar el desarrollo de aplicaciones, suministrando una capa de abstracción de hardware que permite manejar los periféricos a alto nivel sin preocuparse por el manejo tedioso a nivel de registros; adicionalmente, proporciona soporte para aplicaciones en red, manejo de sistemas de archivos, multitarea, seguridad, entre otras (ver figura 2.12; adicionalmente, existen librerías especializadas que ayudan al desarrollo en diferentes áreas. Sin embargo, el uso de sistemas operativos como Linux, Android, Mac OS o Windows, exige el cumplimiento de condiciones mínimas para su uso; por ejemplo, Linux requiere 8 Mbytes de memoria RAM y 2 Mbytes de memoria no volátil, Android requiere 128 Mbytes de memoria RAM y 32 Mbyte de memoria no volátil; por esta razón es necesario agregar dos memorias externas, lo que aumenta la complejidad de la placa de circuito impreso y el costo del dispositivo. Por otro lado, los sistemas operativos tienen una particularidad en su funcionamiento que recibe el nombre de *latencia*; y se define como el tiempo

que transcurre entre la generación de un evento (interrupciones hardware o software) y la respuesta ante este evento, este tiempo varía según el estado de carga del sistema; en un sistema operativo de tiempo real esta latencia es conocida y no depende de la carga de sistema. Esta latencia en algunas aplicaciones hace imposible el manejo de eventos ya que es posible que se pierdan algunos cuando el sistema se encuentre muy cargado.

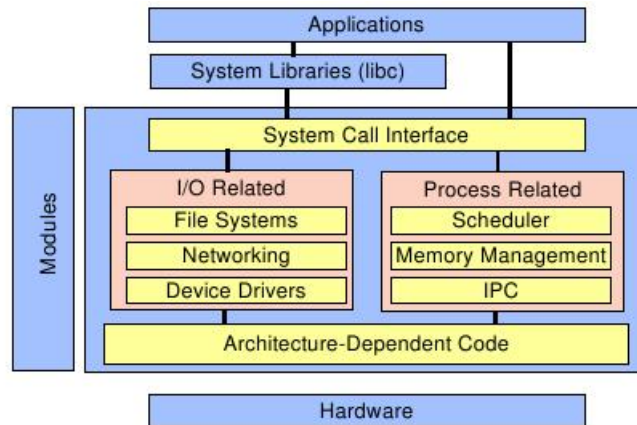


Figura 2.12: Estructura del kernel de Linux.

Las aplicaciones *standalone* utilizan los recursos necesarios y dependiendo de su complejidad pueden ajustarse a un SoC que incorpore la memoria RAM y no volátil internamente; adicionalmente, su programación puede reducir el problema que se presenta en la latencia a las interrupciones en los sistemas operativos. Sin embargo; es necesario dar soporte a todos los periféricos que se utilizarán y se deben escribir todas las rutinas, lo que puede aumentar el tiempo de desarrollo.

En conclusión, el uso de sistemas operativos o aplicaciones *standalone* depende de la complejidad de la aplicación, y de consideraciones económicas como el *time to market* y costo de los desarrolladores.

2.2. La Iniciativa CDIO

La disponibilidad de personal calificado que absorba, asimile y aplique los conocimientos asociados a una tecnología es, el punto más importante en el proceso de transferencia tecnológica propuesto en este trabajo; como se mencionó anteriormente, los canales tradicionales de transferencia han demostrado ser poco efectivos para difundir estos conocimientos en el área bajo estudio; la hipótesis central que maneja esta investigación es que la causa principal del atraso de la industria electrónica (relacionada con el diseño digital) es la poca oferta de personal calificado que genere un cambio que permita pasar

de importadores a generadores de soluciones que utilizan los últimos avances tecnológicos en la industria electrónica mundial.

Es importante que los estudiantes utilicen herramientas adecuadas cuando se enfrentan a la implementación física. Hasta hace poco en el DIEEE se encontraban trabajos académicos realizados por estudiantes de pregrado y posgrado que utilizaban placas de prototipos; se proporcionaban soluciones basadas en herramientas comerciales las cuales eran conseguidas de forma ilegal o se utilizaban demostraciones con funcionalidad limitada. Este tipo de soluciones están muy lejos de una solución comercial real, primero por que no proporciona una plataforma física robusta y segundo porque es necesario adquirir software muy costoso. Adicionalmente, no es ético utilizar herramientas comerciales en la enseñanza, si no se cuentan con las licencias necesarias; es muy común ignorar este tipo de violaciones a los derechos de autor cuando se trabaja en aplicaciones académicas; por esta razón, una de las premisas de esta metodología de enseñanza/aprendizaje es el uso de herramientas abiertas que produzcan resultados comparables al de las herramientas comerciales.

El plan de estudios propuesto en este capítulo adopta los conocimientos generados en el proceso de transferencia descrito en el capítulo 1, lo que lo convierte en una herramienta de difusión hacia la academia, con esto se espera que los estudiantes tomen conciencia de la importancia del uso de esta tecnología. El contenido y la metodología del plan de estudios se ajustará a la iniciativa CDIO. El Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia está realizando el proceso de adaptar la Iniciativa CDIO a las asignaturas de sus dos carreras (eléctrica y electrónica); la mayoría de las asignaturas que componen estos programas no contemplan actividades que ayuden a mejorar las habilidades en la implementación de sistemas, de aquí la importancia de incluirlos como parte de esta propuesta.

La iniciativa CDIO⁴ ha sido desarrollada por el MIT con ayuda de académicos, industriales, ingenieros y estudiantes [32] como respuesta a los diferentes caminos que están tomando la educación de la ingeniería y las demandas del mundo real⁵. Esta iniciativa ha sido adoptada por un creciente número de instituciones académicas; hacer parte de este esfuerzo mundial ayuda a mantener los planes académicos actualizados con los cambios que se realizan en países más industrializados. En este capítulo se mostrará cómo esta iniciativa se adapta perfectamente a la metodología propuesta en este trabajo ya que adiciona dos componentes importantes para la aplicación de la tecnología en la creación de nuevos productos: la implementación y la operación.

La iniciativa CDIO se basa en la suposición de que los egresados de los centros de formación en ingeniería deben ser capaces de: **Concebir, Diseñar, Implementar y Operar** sistemas funcionales en el mundo real. Como se mencionó anteriormente, en Colombia, una parte importante de los centros de formación solo tienen en cuenta la concepción y el diseño, descuidando la implementación y la operación. Lo que impide que se generen habilidades nece-

⁴<http://www.cdio.org>

⁵lo que se aplica perfectamente al estado de la industria electrónica en Colombia

sarias para establecer una estrecha relación con la industria, la cual, requiere productos que pueda comercializar o den soluciones a sus necesidades. La frase *en el mundo real* resalta la importancia de trabajar en la solución de problemas que pueden encontrarse en el ejercicio profesional, lo que es muy difícil de determinar cuando los docentes no tienen un contacto frecuente con él. La iniciativa CDIO se enfoca en preparar a los estudiantes con los conocimientos habilidades y aptitudes para ser ingenieros líder; y sus principales objetivos son [32]:

- Educar a los estudiantes para dominar un conocimiento más profundo de los fundamentos técnicos.
- Educar a los ingenieros para liderar la creación y operación de nuevos productos y sistemas.
- Educar futuros investigadores para que conozcan la importancia estratégica y el valor de su trabajo.

Estos objetivos se adaptan a los requerimientos que se exige a la plataforma tecnológica de un país para que pueda realizar una adecuada absorción del conocimiento transferido para la creación de nuevos productos adaptados a las necesidades locales. Las premisas que capturan la visión, objetivos y fundamentos pedagógicos de la iniciativa son:

- Es posible cumplir las necesidades propias de la profesión mientras se realiza el proceso de concebir, diseñar, implementar y operar sistemas en el contexto de los sistemas de ingeniería.
- Los resultados de la formación deben ser fijados por los sectores interesados (academia, industria, gobierno) y deben formar una secuencia de experiencias de aprendizaje, algunas de las cuales son experimentales; es decir, deben enfrentar a los estudiantes a situaciones que encontrarán en el ejercicio de su profesión.
- La adecuada construcción de esta cadena de actividades tendrán un doble impacto en la formación de los estudiantes: por un lado facilitará el aprendizaje de habilidades críticas e inter-personales y fortalecerá las habilidades de construcción de sistemas, productos y procesos, mientras se mejora el aprendizaje de los conceptos fundamentales.

Estructura del Plan de Estudios CDIO

La figura 2.13 muestra los bloques constructores del plan de estudios CDIO. En el primer nivel se puede observar que todo individuo interesado en obtener habilidades técnicas posee *habilidades personales y profesionales*, las cuales son fundamentales para la práctica. Para ser capaces de desarrollar sistemas complejos en ingeniería, los estudiantes deben dominar los fundamentos del *razonamiento y conocimiento técnico*; para trabajar en un entorno moderno basado

en grupos de trabajo, los estudiantes deben desarrollar *habilidades interpersonales* de comunicación y trabajo en equipo; finalmente, para ser capaz de crear y operar productos y sistemas, un estudiante debe entender el concepto de *concebir, diseñar, implementar y operar sistemas en el contexto social y empresarial* [33]



Figura 2.13: Bloques constructores de conocimiento, habilidades y actitudes necesarias para concebir, diseñar, implementar y operar sistemas en el contexto social y empresarial fuente:[33]

Razonamiento y conocimiento técnico Los componentes del primer nivel *razonamiento y conocimiento técnico* son comunes a los planes de estudio de las ingenierías modernas y son:

- Fundamentos avanzados de ingeniería.
- Fundamentos del núcleo de ingeniería.
- Conocimiento científico.

La razón de poner este bloque constructor en el primer nivel es solo para recordar que el objetivo primordial de cualquier programa de pregrado es el desarrollo de un conocimiento profundo de fundamentos técnicos. En este trabajo no se cambiará este componente ya que para hacerlo es necesario un consenso con las demás carreras de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional, labor que puede tomar varios años.

Habilidades personales, profesionales e interpersonales Los niveles 2 y 3 se centran en las habilidades personales que debe poseer un individuo para que pueda cumplir con el objetivo de la iniciativa CDIO. El nivel 2 está compuesto por:

- Las habilidades profesionales que representan las tres formas de pensar más practicadas por los ingenieros: resolución de problemas; descubrimiento de conocimiento y pensamiento sistémico.
- Actitudes que incluyen integridad y comportamiento profesional así como las necesarias para planear la profesión.

Las habilidades que no hacen parte del contexto profesional ni del interpersonal son llamadas *habilidades y actitudes personales*, incluyen el carácter; iniciativa; perseverancia; formas de pensar más genéricas como pensamiento crítico, creativo; y habilidades propias como curiosidad, aprendizaje continuo y manejo del tiempo.

Las habilidades inter-personales, son un subconjunto de las habilidades personales y se dividen en dos grupos (que se traslapan) llamados: equipo de trabajo y comunicaciones. El equipo de trabajo hace referencia a las habilidades necesarias para formar, operar, fortalecer y liderar un equipo con habilidades específicas de un equipo de trabajo técnico. La comunicación se compone de habilidades para idear estrategias de comunicación y aquellas que utilizan los medios orales, escritos, electrónicos y gráficos, y, en el caso colombiano, el uso del idioma Inglés.

Habilidades CDIO Habilidades necesarias para concebir, diseñar, implementar y operar sistemas en el contexto social y empresarial; estos cuatro componentes son necesarios para que los egresados de las carreras relacionadas con la ingeniería electrónica sean capaces de absorber los conocimientos que las nuevas tecnologías proporcionan, adaptarlos a la situación tecnológica y al contexto social del país para generar productos que resuelvan necesidades locales. Para satisfacer una necesidad de la sociedad es necesario conocer la dinámica empresarial, los principios que la rigen y como se debe actuar en una empresa de cualquier tipo y tamaño.

2.3. Implementación del Plan de Estudios CDIO

La Figura 2.14 muestra los componentes que deben ser especificados para implementar el plan de estudios CDIO al currículo de las asignaturas del área de electrónica digital; en primer lugar se encuentran los resultados esperados del proceso de aprendizaje, esto es, ¿Qué deben saber y qué deben ser capaces de hacer los estudiantes al final del curso? Para contestar a esta pregunta es necesario definir las **habilidades** que serán reforzadas o desarrolladas y los *objetivos* de cada asignatura.

Para alcanzar los objetivos definidos en el primer paso, es necesario generar una serie de **actividades** que le permitan al estudiante retener nuevos conocimientos y habilidades y desarrollar las competencias deseadas; las actividades deben cubrir todas las habilidades que se quieran desarrollar o reforzar. Finalmente, se deben desarrollar métodos de evaluación que permitan conocer el nivel de competencia de los estudiantes, y de esta forma ajustar las actividades para obtener los resultados esperados.

Definición e Identificación de las Habilidades CDIO

El primer paso en la implementación del plan de estudios CDIO es definir e identificar las habilidades requeridas en una determinada área del plan de estudios; en este caso en las asignaturas del área de electrónica digital. En el DIEE de la Universidad Nacional de Colombia, el área de electrónica digital

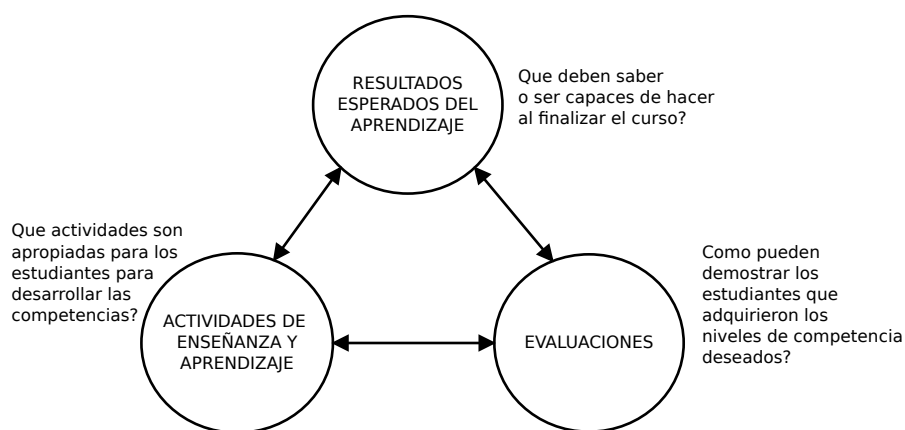


Figura 2.14: Objetivos, actividades, y evaluación:

está compuesta por tres asignaturas para la carrera de ingeniería electrónica: Electrónica Digital 1, Electrónica Digital 2 y Sistemas Embebidos y por electrónica Digital 1 para ingeniería eléctrica.

Grado de competencia

Para trasladar las habilidades a objetivos de aprendizaje es necesario determinar el grado de competencia que se espera que el profesional adquiera en cada una de las asignaturas; por supuesto, algunas de estas habilidades no pueden obtenerse solo en una asignatura y es necesario que todo el plan académico contribuya a generarla, lo que requiere un consenso del personal académico. Los niveles de competencia seleccionados para indicar el grado en que debe ser apropiada una determinada habilidad son:

- *Introducir (I)*: Introduce pero no evalúa.
- *Enseñar (E)* : Enseña y evalúa.
- *Utilizar (U)*: Utiliza, puede ser evaluado o no.

Aptitudes personales, profesionales y habilidades interpersonales

La tabla 2.1 muestra las habilidades para las *aptitudes personales y profesionales* de las tres asignaturas del área de electrónica digital. En ella se puede observar que existen habilidades comunes a las tres asignaturas en lo relacionado con el planteamiento y resolución de problemas, experimentación y descubrimiento de conocimiento y habilidades y actitudes personales; todas ellas buscan que el estudiante sea capaz de identificar un problema y con base en los conocimientos adquiridos formule hipótesis y modelos que permitan

darle solución. Las habilidades interpersonales son tratadas de forma gradual, en el primer curso, se guía en la formación de estas habilidades utilizando ejemplos que ellos utilizarán en los cursos posteriores.

Habilidades CDIO Sistemas en el contexto Empresarial, Social y Ambiental - Innovación

La primera columna de la tabla 2.2 muestra las habilidades C.D.I.O. Sistemas en el contexto Empresarial, Social y Ambiental - Innovación. Este grupo de habilidades son las que marcan diferencia con las otras asignaturas del plan de estudios ya que como se mencionó anteriormente, la mayoría de los cursos no contemplan la implementación de sistemas reales donde se apliquen los conocimientos que se intentan transmitir.

Competencias de las habilidades CDIO nivel 2 y 3						
APTITUDES PERSONALES Y PROFESIONALES	Nivel 1					
	E. Dig1	E. Dig2	Sist. Emb.			
<i>Planteamiento y resolución de problemas de ingeniería</i>			EU			
1 Identificación y formulación del problema			EU			
2 Modelamiento			EU			
3 Solución y recomendación			EU			
<i>Experimentación y descubrimiento de conocimiento</i>			U			
4 Formulación de hipótesis			U			
5 Investigación experimental			U			
<i>Pensamiento sistemático</i>			EU			
6 Pensamiento global			U			
7 Surgimiento e interacciones			U			
<i>Habilidades y actitudes personales</i>			U			
8 Pensamiento creativo			IEU			
9 Pensamiento crítico			IEU			
10 Toma de conciencia de conocimientos propios			IEU			
11 Curiosidad y aprendizaje permanente <i>Habilidades y actitudes profesionales</i>			U			
12 Ética profesional, integridad, responsabilidad			U			
13 Comportamiento profesional			U			
39 Confianza y lealtad			IEU			
HABILIDADES INTERPERSONALES	Nivel 1					
	E. Dig1	E. Dig2	Sist. Emb.			
<i>Equipo de trabajo</i>			EU			
14 Formar grupos efectivos	EU	U	U			
15 Equipo de liderazgo	EU	U	U			
40 Equipo Técnico y Multi-disciplinario	EU	U	U			
<i>Comunicaciones estructuradas</i>			EU			
16 Estrategia de comunicación	EU	U	U			
17 Estructura de la comunicación	EU	U	U			
18 Comunicación Escrita	EU	U	U			
19 Comunicación Electrónica	EU	U	U			
20 Presentación Oral	EU	U	U			
<i>Comunicación en Idioma Extranjero</i>			U			
21 Inglés			U			
<i>Comunicaciones Informales: Relacionarse con los demás</i>			U			
41 Preguntar, Escuchar y Dialogar	EU	U	U			
42 Negociación, compromiso y resolución de conflictos	EU	U	U			
43 Establecimiento de conexiones	IEU	U	U			

HABILIDADES CDIO				Nivel 1		
				E. Dig1	E. Dig2	Sist. Emb.
<i>Contexto Externo, Social, Económico y Ambiental</i>				IEU		
22 Rol y responsabilidad de los Ingenieros				IEU		
23 Impacto sobre la sociedad y el medio ambiente				IEU		
24 Cuestiones y valores actuales				IEU		
44 Sostenibilidad y necesidad de un desarrollo sostenible				IE	IE	IE
<i>Empresa y contexto empresarial</i>				EU		
25 Interesados en la empresa, metas y objetivos				I		
26 Espíritu Empresarial Técnico				I		
27 Trabajo exitoso en organizaciones				I		
45 Finanzas y Economía de los Proyectos de Ingeniería				IE	IE	IE
<i>Concepción y Administración de Sistemas en Ingeniería.</i>				IEU		
28 Entender las necesidades y establecer las metas				IEU	EU	U
29 Definir la función, concepto y arquitectura				IEU	EU	U
<i>Diseño</i>				IEU		
30 Proceso de Diseño				IEU	EU	U
31 Fases del proceso de Diseño y enfoques				IEU	EU	U
32 Utilización de conocimiento científico en el diseño				IEU	EU	U
33 Diseño específico				IEU	EU	U
34 Diseño multi-disciplinario				I	E	U
<i>Implementación</i>				EU		
35 Proceso de fabricación Hardware				IEU	EU	U
36 Proceso de Implementación de Software				I	EU	U
37 Integración Software - Hardware				I	EU	U
38 Pruebas, verificación, validación y certificación				IE	EU	U

Cuadro 2.2: Competencias para CDIO

Cuadro 2.1: Competencias para los niveles 2 y 3 CDIO

2.4. Integración de las Habilidades CDIO al Plan de Estudios

Metodología de Diseño

La metodología de diseño utilizada en la creación de este programa académico se describió en la sección 2.1 del capítulo 2. En la figura 2.15 se muestra como será abordada esta metodología en los diferentes cursos que componen la línea de electrónica digital.

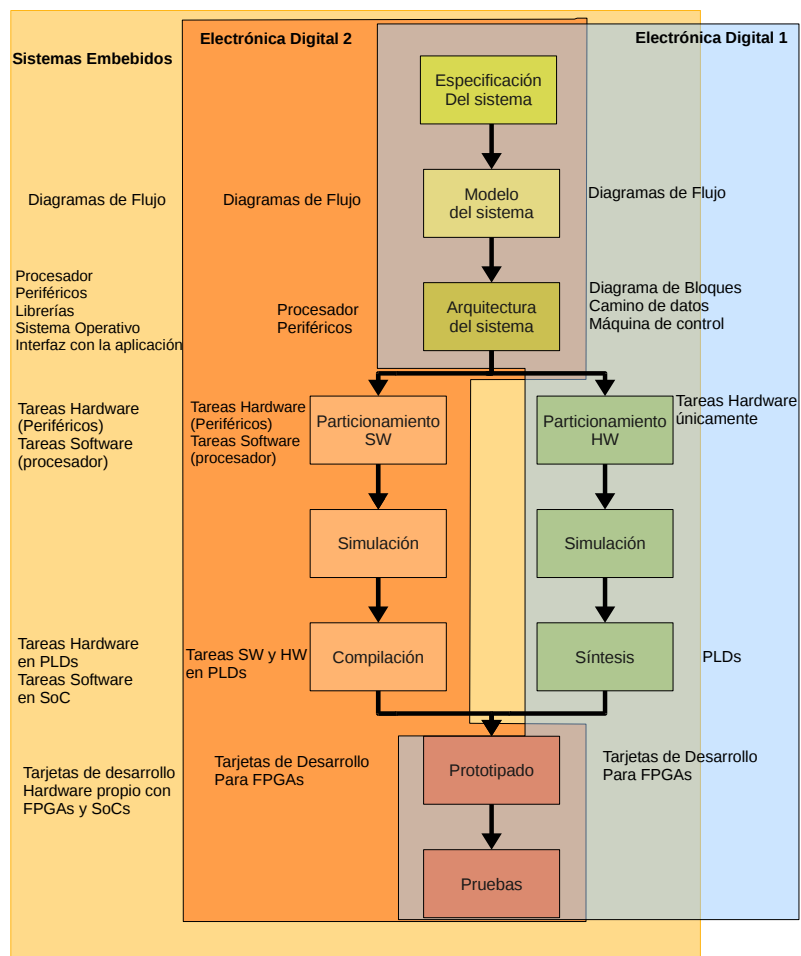


Figura 2.15: Metodología de diseño para el área de Sistemas Digitales

Objetivos de Aprendizaje - Dominio Cognitivo

El dominio cognitivo involucra conocimiento y desarrollo de habilidades intelectuales. Incluye el reconocimiento de hechos específicos, procedimientos, y conceptos que ayudan en el desarrollo de habilidades y capacidades intelectuales. Bloom [34] identificó las siguientes seis categorías, las que están ordenadas desde el comportamiento más simple al más complejo. Las categorías pueden considerarse como grados de dificultad. Es decir, se deben dominar las primeras antes de poder desarrollar las otras.

1. Conocimiento: definido como la acción de recordar información aprendida anteriormente.

- Objetivos generales
 - *Identifica y reproduce* las diferentes etapas del proceso de diseño.
 - *Identifica* la estructura de un sistema digital.
 - *Selecciona* los componentes adecuados para cada problema (particionamiento hardware/software).
 - *Define* las especificaciones de un sistema digital.
 - *Lee* esquemáticos electrónicos y hojas de especificaciones de sus componentes.
 - *Escribe* documentos que *describen* el proceso de diseño de un sistema digital.
- Electrónica digital 1
 - *Identifica* la arquitectura de un circuito lógico y secuencial.
 - *Reproduce* los pasos para sintetizar una máquina de estados algorítmica.
 - *Identifica* los componentes básicos de una máquina de estados algorítmica.
 - *Identifica* los pasos del flujo de diseño hardware.
- Electrónica digital 2
 - *Identifica* las tareas que deben ser ejecutadas en software y en hardware.
 - *Identifica y describe* los componentes de un SoC.
 - *Identifica y describe* el funcionamiento de los componentes de una unidad de procesamiento central.
 - *Identifica* los pasos del flujo de diseño software.
 - *Describe* el comportamiento de tareas hardware y software.
- Sistemas embebidos
 - *Describe* la integración de software en hardware electrónico.
 - *Identifica* los componentes de un sistema embebido.

2. Comprensión: relacionado con los objetivos, comportamientos o respuestas que representan el entendimiento de un mensaje contenido en una comunicación, sin referirse a otro material. Para llegar a este entendimiento el estudiante puede cambiar la comunicación en su mente para reflejar una forma alterna más significativa para él.
 - Objetivos generales
 - *Entiende* las etapas de la metodología de diseño de sistemas digitales.
 - *Entiende* la diferencia entre tareas hardware y software.
 - *Analiza* las diferentes formas de implementar un sistema digital.
 - *Describe* el comportamiento de un sistema digital.
 - Electrónica digital 1
 - *Entiende* la forma de implementar máquinas de estado algorítmicas en dispositivos lógicos programables (PLD) utilizando lenguajes de descripción de hardware.
 - Electrónica digital 2
 - *Entiende* el funcionamiento de un SoC.
 - *Entiende* los canales de comunicación entre un periférico y la unidad de procesamiento central.
 - *Entiende* los pasos necesarios para crear aplicaciones utilizando lenguajes de alto nivel.
 - *Entiende* el uso del conjunto de instrucciones en la elaboración de aplicaciones.
 - Sistemas embebidos
 - *Entiende* la diferencia entre procesadores softcore y hardcore.
 - *Entiende* la diferencia entre aplicaciones que utilizan y las que no utilizan sistema operativo.
3. Aplicación: habilidad de utilizar información aprendida previamente en nuevas situaciones para resolver problemas con una única o mejor solución.
 - Objetivos generales
 - *utiliza y aplica* la metodología de diseño de sistemas embebidos en la solución de problemas.
 - *Implementa* sistemas digitales que dan solución a una necesidad de la sociedad.
 - *Implementa* placas de circuito impreso.
 - *Utiliza* software como ayuda en el proceso de diseño.
 - *Aplica* el concepto de re-utilización de código.

- *Utiliza* niveles de jerarquía para el diseño de sistemas digitales.
 - *Construye* sistemas digitales.
 - *Desarrolla y aplica* pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de un sistema digital.
 - Electrónica digital 1
 - *Implementa* máquinas de estado algorítmicas.
 - *Utiliza* lenguajes de descripción de hardware.
 - *Utiliza* el flujo de diseño hardware.
 - Electrónica digital 2
 - *Implementa* tareas hardware como periféricos de un SoC.
 - *Utiliza* herramientas de compilación y el flujo de diseño software.
 - *Implementa* tareas software utilizando una unidad de procesamiento central.
 - *Desarrolla* aplicaciones que implementan tareas hardware y software.
 - *Utiliza* canales de comunicación entre tareas hardware y software
 - Sistemas embebidos
 - *Desarrolla* aplicaciones utilizando un sistema operativo.
 - *Implementa* periféricos en un PLD.
 - *Desarrolla* controladores del sistema operativo para periféricos implementados en PLDs.
 - *Utiliza* librerías disponibles para el desarrollo de aplicaciones.
 - *Desarrolla* interfaces gráficas para aplicaciones embebidas.
4. Análisis: La separación de la información en sus partes componentes, examinando y entendiendo su estructura. Distinguiendo entre hechos e inferencias.
- Objetivos generales
 - *Distingue* las diferentes formas de implementación de sistemas digitales.
 - *Subdivide* un problema en componentes funcionales.
 - *Reconoce* los componentes de un sistema digital.
 - *Distingue* los dominios de descripción y los niveles de abstracción de los sistemas digitales.
 - *Reconoce* los niveles jerárquicos en un proceso de diseño.
 - *Diferencia* la implementación de tareas hardware y software.
 - Electrónica digital 1

- *Distingue* los componentes de la lógica combinatoria y secuencial.
- *Reconoce* la arquitectura de las máquinas de estado algorítmicas.
- *Reconoce* sistemas implementados con lenguajes de descripción de hardware.

■ Electrónica digital 2

- *Reconoce* la arquitectura de un SoC.
- *Distingue* los componentes de una unidad de procesamiento central.
- *Reconoce* funciones que deben ser implementadas en hardware para cumplir con restricciones de diseño.
- *Distingue* la diferencia entre un lenguaje de alto nivel y el lenguaje ensamblador.

■ Sistemas embebidos

- *Distingue* los componentes de un sistema embebido.
- *Reconoce* la arquitectura de sistemas digitales comerciales.
- *Diferencia* las aplicaciones independientes (standalone) de las que usan sistemas operativos.
- *Reconoce* las funciones de un sistema operativo.

5. Síntesis: definida como la acción de unir elementos y partes para conformar una estructura o patrón, enfatizando en la creación de un nuevo significado o estructura.

■ Objetivos generales

- *Diseña y genera* sistemas digitales que dan solución a problemas reales.
- *Colabora* en un grupo de trabajo para dar solución a un problema común.
- *Colabora* con la sociedad compartiendo el resultado de sus estudios.
- *Combina* dispositivos semiconductores para cumplir especificaciones de diseño.
- *Comunica* el resultado de sus investigaciones utilizando medios electrónicos.
- *Desarrolla* pruebas para determinar el correcto funcionamiento de un sistema.
- *Crea* soluciones a problemas reales utilizando dispositivos electrónicos.
- *Planea* actividades que darán como resultado soluciones a problemas reales.

- *Valida* el cumplimiento de restricciones de diseño.
 - Electrónica digital 1
 - *Diseña* máquinas de estado algorítmicas
 - *Modifica* diseños de referencia para ajustarlos a necesidades puntuales.
 - Electrónica digital 2
 - *Integra* tareas software en el diseño de soluciones.
 - *Diseña* SoC dedicados.
 - *Diseña y desarrolla* tareas hardware como periféricos de un SoC.
 - Sistemas embebidos
 - *Diseña* sistemas digitales utilizando SoC comerciales que ejecutan un sistema operativo.
 - *Integra* librerías y aplicaciones existentes en el diseño.
 - *Diseña* periféricos y sus respectivos controladores para el sistema operativo utilizado.
6. Evaluación: emitir juicios personales sobre el valor de las ideas o materiales.
- Objetivos generales
 - *Compara* las ventajas y desventajas de las tareas hardware y software.
 - *Decide* la arquitectura mas adecuada para un sistema digital.
 - *Interpreta* los resultados de las simulaciones.
 - *Justifica y replantea* sus criterios de diseño.
 - *Critica* implementaciones y arquitecturas de sistemas digitales.
 - *Evalúa* las diferentes alternativas de implementación de un sistema digital.
 - Electrónica digital 2
 - *Evalúa y compara* el desempeño de funciones implementadas en software y en hardware.
 - *Decide* el particionamiento hardware/software.
 - Sistemas embebidos
 - *Evalúa* las ventajas y desventajas de utilizar un sistema operativo.

Dominio Afectivo

- Recibir: disposición a recibir información:
 - *Identifica* malas costumbres en su método de estudio que le impiden el aprendizaje.

- *Utiliza* material disponible para aumentar su conocimiento.
 - *Localiza* vacíos conceptuales e identifica soluciones.
- Responder: reacciona y participa activamente en su propio aprendizaje.
 - *Lee* material relacionado con el tema del curso con anterioridad.
 - *Responde* dudas formuladas en clase de temas que no han sido tratados previamente.
 - *Asiste* a las clases con preguntas relacionadas con el proceso de concepción, diseño e implementación de sistemas digitales.
 - *Presenta* los ejercicios propuestos en clase.
 - *Ayuda* a sus compañeros en el proceso de aprendizaje.
 - *Practica* para adquirir habilidad en temas relacionados con el curso.
 - *Escribe* material que le ayude a entender los temas desarrollados en clase.
 - Valorar: Asigna valores y expresa opiniones personales
 - *Muestra una creencia* en la importancia del auto-aprendizaje en el desarrollo de habilidades personales.
 - *Muestra una creencia* en la importancia de la creación de nuevos productos en el desarrollo del país.
 - *Comparte* el resultado de su esfuerzo con futuras generaciones.
 - *Participa* y hace aportes en grupos de discusión.
 - *Valora* el trabajo en equipo.
 - *Explica* sus criterios de diseño.
 - Organizar valores: resuelve conflictos internos y desarrolla un sistema de valores.
 - *Combina* diferentes habilidades para lograr el objetivo.
 - *Compara* alternativas de solución y elige la más adecuada.
 - *Integra* resultados obtenidos en procesos anteriores a solución de nuevos problemas.
 - *Formula* estrategias para resolver problemas de forma óptima.
 - Interiorizar valores: actúa de acuerdo a los valores que ha interiorizado, el comportamiento es pervasivo, consistente, predecible y característico de cada aprendiz.
 - *Propone* métodos para crear nuevos sistemas.
 - *Soluciona* problemas de la sociedad aplicando conocimiento adquirido previa y constantemente.

Dominio Psicomotor

- Imitación: repetir un acto que ha sido demostrado o explicado.
 - *Construir y ensamblar* placas de circuito impreso.
 - *Sigue* guías para la elaboración de layouts.
- Manipulación: práctica de una habilidad específica hasta que la acción se realice con seguridad.
 - *Manejar* herramientas para montaje de placas de circuito impreso.
 - *Manejar* herramientas para diseño de placas de circuito impreso.
- Precisión: se obtienen resultados de muy alta calidad en la ejecución de una tarea con poco esfuerzo.
 - *Mostrar* capacidades elevadas en el montaje y rework de placas de circuito impreso.
 - *Mostrar* habilidades en la elaboración de layouts.
- Articulación: las habilidades han sido desarrolladas de tal forma que pueden modificarse patrones para ajustarse a requerimientos especiales.
 - *Combinar* diferentes técnicas en la elaboración, montaje y adecuación de placas de circuito impreso.
 - *Adapta* diferentes técnicas de ruteo a necesidades específicas de la aplicación.
- Naturalización:
 - *Especifica* el método más adecuado para elaborar, montar, y modificar una placa de circuito impreso.

Metodología

Todas las actividades que se realizarán en estos cursos están encaminadas a generar habilidades necesarias para concebir, diseñar, e implementar sistemas digitales complejos, y están articuladas alrededor de una única metodología de diseño. Los tres cursos tienen un carácter teórico-práctico, el componente teórico tratará los diferentes temas de forma general, con el fin de no crear dependencia con las herramientas utilizadas, lo que permitirá realizar actualizaciones fácilmente. En el componente práctico, se tratarán temas específicos de manejo de las herramientas (lenguajes de descripción de hardware, lenguajes de programación y manejo de plataformas de desarrollo) y como se relacionan con la metodología de diseño utilizada.

El estudiante debe estudiar, profundizar y comprobar algunos temas tratados en clase y debe leer previamente la documentación que se encuentra disponible en el sitio web de los cursos. Adicionalmente, debe formar grupos de trabajo para realizar actividades a lo largo del semestre.

Durante el período académico se trabajará para definir las especificaciones, diseñar e implementar un dispositivo que resuelva una determinada necesidad (con la complejidad adecuada para cada curso). En la sesión teórica se tratarán aspectos relacionados con la concepción, diseño, identificación y definición de las funciones de los componentes del sistema, mientras que en el laboratorio se tratarán temas relacionados con la implementación de dichos componentes sobre PLDs o SoC. Se realizarán presentaciones del avance, indicando las razones que se tuvieron en cuenta en cada decisión y como se resolvieron los problemas encontrados, todo este proceso debe documentarse en la wiki del portal *linuxencaja*, esto último para formar un banco de proyectos que pueda ser utilizado como referencia por quien esté interesado.

SIE: Plataforma abierta para el desarrollo de sistemas embebidos

En el mercado existe una gran variedad de plataformas que pueden ser utilizadas en el estudio de sistemas embebidos, sin embargo, no todas son adecuadas para la implementación del método que propone este trabajo, ya que la plataforma que se utilice debe proporcionar toda la información necesaria para entenderla, programarla, replicarla y modificarla. Con el fin de proporcionar al estudiante una herramienta que pueda ser utilizada en el desarrollo de nuevos productos comerciales se requiere: acceso a los esquemáticos y a los archivos de fabricación del PCB con posibilidad de modificación; acceso a la documentación completa del proceso de fabricación; acceso a la cadena de producción; utilización de herramientas abiertas para su programación; un PLD para la implementación de tareas HW; un procesador para la implementación de tareas SW; un canal de comunicación entre el procesador y el PLD; y una comunidad que desarrolle aplicaciones para dicha plataforma y que proporcione medios para el intercambio de información a través de listas de correo y wikis.

Después de una búsqueda minuciosa no se encontraron plataformas que cumplieran con estas condiciones, en especial con las relacionadas con el proceso de diseño y de producción; esto es normal, ya que la mayoría de las empresas no quieren que se fabriquen sus plataformas y los proyectos individuales no poseen la infraestructura necesaria para la producción masiva. Por este motivo, se decidió crear una plataforma que cumpliera con los requerimientos (plataforma *SIE*), pudiera ser utilizada en los tres cursos del área y se convirtiera en una herramienta más para la difusión de los conocimientos adquiridos en este estudio.

La Figura 2.16 muestra el diagrama de bloques de la plataforma *SIE*, en ella se observa un procesador que posee periféricos para comunicación serial (UART), memorias micro-SD, un puerto I2C, un LCD a color de 3 pulgadas, 2 entradas y salidas de audio stereo, 2 entradas análogas; una FPGA que proporciona 25 señales de entrada/salida digitales de propósito general (GPIOs) y controla un conversor análogo digital de 8 canales. Existen dos canales de comunicación entre la FPGA y el procesador: uno para controlar el puerto JTAG, lo que permite la configuración de la FPGA desde el procesador (lo que elim-

ina la necesidad de cables de programación); y otro que proporciona el bus de datos, dirección y control para comunicarse con las tareas HW o periféricos implementadas en la FPGA. El procesador utilizado es un Ingenic JZ4725 (MIPS) corriendo a 400MHz, se dispone de una memoria NAND de 2GB para almacenamiento de datos y programas, así como de una memoria SDRAM de 32 MB, lo que permite la ejecución de una gran variedad de aplicaciones Linux.

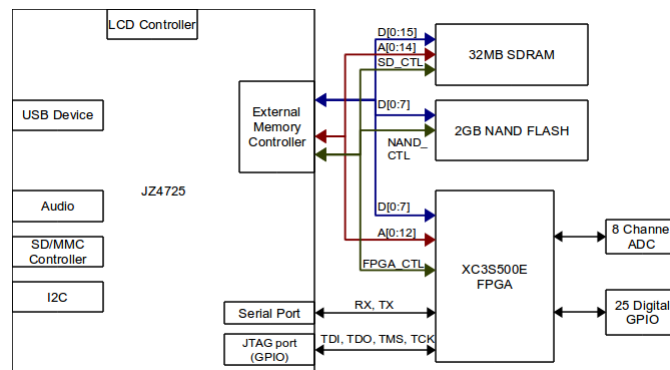


Figura 2.16: Estructura de la plataforma de desarrollo SIE

SIE proporciona un canal de comunicación y alimentación a través del puerto USB-device, y es configurado para ser utilizado como una interfaz de red (*usb0*), permitiendo la transferencia de archivos y ejecución de una consola remota utilizando el protocolo *ssh*; este canal de comunicación también se utiliza para programar la memoria NAND no volátil, por lo que para realizar la programación completa de los componentes de la plataforma solo es necesario un cable USB. SIE posee un sistema de archivos basado en el proyecto *open-wrt* y dispone de una gran cantidad de aplicaciones y librerías que pueden ser compiladas en un computador tradicional, siguiendo los tutoriales de la wiki del proyecto.

Integración de SIE con los Cursos de la Línea de Electrónica Digital

En la actualidad SIE está siendo utilizada en los cursos de la línea de electrónica digital de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá). En el anexo ?? se listan las herramientas abiertas que se utilizan en el desarrollo de las actividades propuestas en este plan de estudios.

Electrónica digital 1

En el primer curso del área de diseño digital en la UNAL se realiza el estudio, diseño e implementación de máquinas de estado algorítmicas utilizando la metodología de diseño presentada anteriormente y la herramienta gra-

tuita de Xilinx *Webpack*, los estudiantes implementarán sus diseños utilizando lenguajes de descripción de hardware (VHDL, verilog), como resultado de este proceso se obtendrán 3 archivos: uno para configurar a la FPGA con la funcionalidad deseada; uno que informa sobre la función asignada por el diseñador a todos los pines de la FPGA; y otro que contiene los resultados de la simulación del sistema ⁶. SIE proporciona un canal de comunicación entre el procesador y el puerto JTAG de la FPGA que puede ser utilizado para:

- Configuración: Carga del archivo de configuración con la funcionalidad deseada a la FPGA; este archivo puede ser transferido al sistema de archivos de SIE utilizando el cable *USB* y el protocolo de comunicaciones *ssh*. Cuando este archivo de configuración ha sido transmitido, se utiliza la aplicación *xc3sprog* para configurar la FPGA.
- Prueba a baja frecuencia: Como se mencionó anteriormente, el protocolo JTAG permite la aplicación de vectores de prueba a un dispositivo semiconductor y la recolección de la respuesta a estos estímulos utilizando 4 señales (TDI, TDO, TMS y TCK).

Una aplicación abierta, creada por este trabajo, recibe como entrada los archivos que contienen la información de la asignación de pines y los resultados de la simulación (ver figura 2.17); extrae la información correspondiente a los vectores de prueba y los aplica al circuito implementado en la FPGA, utilizando la instrucción *INTEST* del protocolo JTAG; finalmente, captura la respuesta a estos estímulos ⁷ los que son desplegados en el LCD de la plataforma y pueden ser exportados a un archivo tipo imagen. Esta herramienta puede verse como una combinación de un analizador lógico y un generador de vectores de prueba de bajo costo.

Electrónica digital 2

Como se mencionó anteriormente, en este curso se busca que el estudiante entienda la diferencia entre tareas hardware y software, y los canales de comunicación entre ellas; para esto, se implementarán las tareas software en un procesador *softcore* que proporcione la descripción completa en un lenguaje de descripción de hardware (en la actualidad se utiliza el LM32 de Lattice). Adicionalmente, se estudiará la arquitectura de la unidad de procesamiento, su conjunto de instrucciones, manejo de interrupciones, comunicación con las memorias de datos y de instrucciones, su programación y la forma de comunicación con periféricos.

El acceso al código fuente del procesador facilita el estudio de las operaciones internas del procesador al permitir la simulación y seguimiento de

⁶Este archivo lo generan las herramientas de simulación abiertas *icarus* y *ghdl*

⁷para el control del puerto JTAG se modificó la herramienta *urjtag*

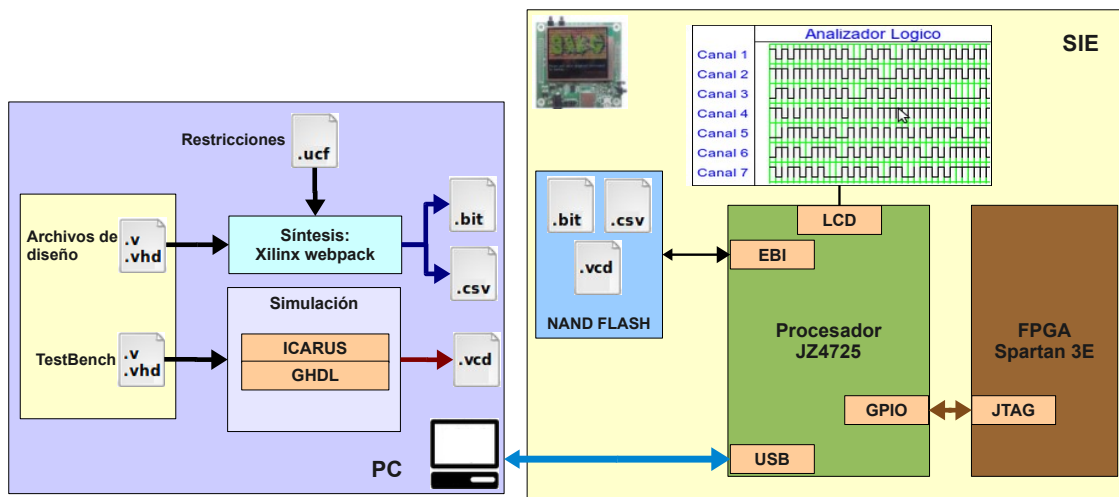


Figura 2.17: Flujo de diseño hardware

señales específicas. Este tipo de simulaciones permiten entender los conceptos relacionados con el funcionamiento del sistema lo cual no es posible si se utilizan dispositivos comerciales, ya que los simuladores existentes se enfocan en los contenidos del banco de registros y de la memoria y no pueden mostrar (hasta el momento) las señales internas. Al estudiar la estructura interna de un procesador, es posible entender los mecanismos de comunicación entre la CPU y los periféricos; permite entender la diferencia conceptual entre tareas hardware y tareas software (aún cuando ambas se implementan en el mismo dispositivo). La creación de periféricos, su conexión con el procesador y el soporte que se debe dar en la aplicación software para su control; al tiempo que se proporcionan los conocimientos de la estructura de un sistema sobre silicio (SoC) moderno.

La metodología que propone este trabajo permite utilizar la cadena de herramientas GNU existente para el procesador LM32, la que permite trabajar con lenguaje ensamblador, C y C++ y proporciona un flujo de diseño software que puede ser utilizado en otros procesadores comerciales. En la figura 2.18 se muestra el flujo de diseño al utilizar un procesador *softcore*; con él, el estudiante puede entender que el flujo de diseño software se utiliza para generar el contenido de la memoria de programa del SoC y que la estructura del procesador se describe en un lenguaje de descripción de hardware al que se le aplica el mismo flujo de diseño que aplicó en la asignatura anterior.

En este curso el procesador de la plataforma SIE es utilizado como herramienta de configuración del PLD, los archivos de configuración son transferidos al sistema de archivos de SIE utilizando el protocolo *ssh* y desde allí son transferidos a la FPGA utilizando *xc3sprog* o *urjtag*. Es posible establecer una

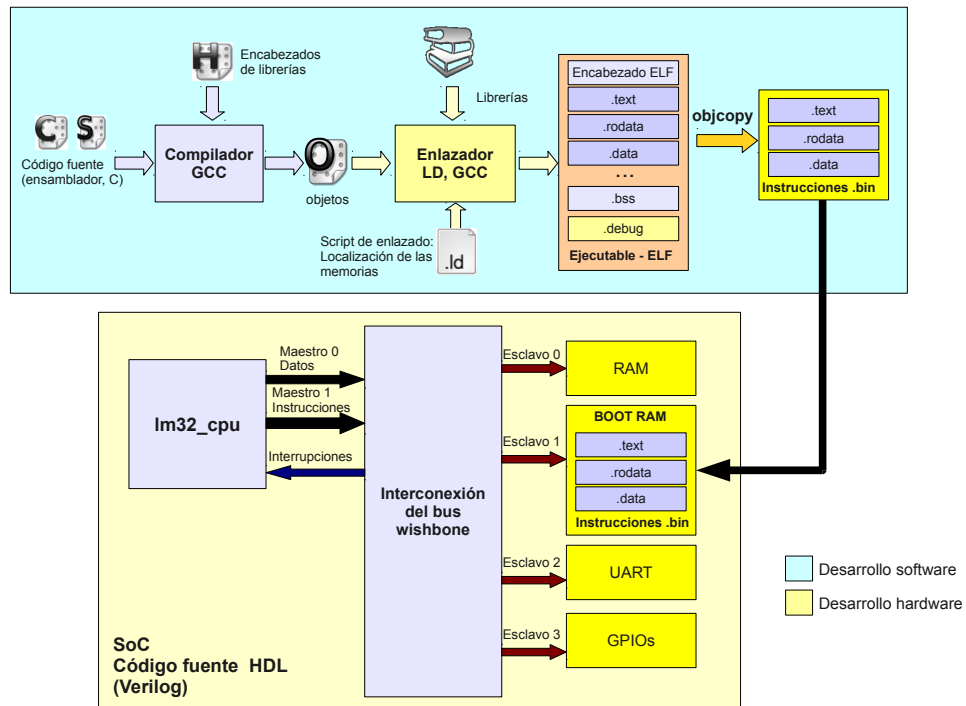


Figura 2.18: Flujo de diseño hardware/software al utilizar un procesador *soft-core*

comunicación serial entre los procesadores *softcore* implementado en la FPGA y *hardcore* de la plataforma; proporcionando un canal de depuración para las aplicaciones que se ejecutan en la FPGA; con lo que se suministran todas las herramientas necesarias para la realización de las actividades previstas en este curso.

Sistemas embebidos

Una vez asimilados los conceptos de arquitectura de SoCs e implementación de tareas hardware y software se utilizará un SoC comercial, para que los estudiantes entiendan las diferencias entre los procesadores *softcore* y *hardcore* y conozcan las herramientas más utilizadas en la implementación de sistemas digitales modernos. Así mismo, se utilizará el sistema operativo Linux para ilustrar la diferencia entre las aplicaciones *standalone* y las que utilizan sistemas operativos; se utiliza el SoC de ingenic JX4725 para ejecutar tareas de visualización, comunicación, control e interfaz con el usuario, librerías gráficas de alto nivel como QT (de Nokia) para realizar la interfaz, se desarrollan módulos del kernel y programas en espacio de usuario para el control de

periféricos dedicados (implementados en la FPGA). Con esto se proporciona a los estudiantes herramientas que están siendo utilizadas en la actualidad por los grandes fabricantes de dispositivos digitales como Nokia, Dell, Hewlett Packard.

2.5. Desarrollo de Métodos de Evaluación

La naturaleza de esta metodología hace poco eficiente el método tradicional de evaluación, ya que el proceso de diseño no se puede limitar a las 2 o 4 horas que puede durar una prueba escrita, tampoco se puede aislar al estudiante de las fuentes de información, ni de la consulta con otros estudiantes. La forma de evaluación debe simular un entorno laboral, donde se trabaja en equipo y cada uno de sus miembros es responsable de una tarea; en la evaluación se tendrá en cuenta el resultado final, pero cada miembro del equipo debe sustentar de forma individual su aporte y sus conocimientos; esto con el fin de asegurar que todos los miembros del equipo realicen sus labores asignadas y estén al corriente de las actividades que realizan sus compañeros.

La aplicación de la forma de evaluación tradicional a asignaturas en las que se busca crear en el estudiante habilidades que le permitan realizar el flujo de diseño completo de un sistema digital, contemplaba una marcada división entre el componente práctico y el componente teórico. Antes de aplicar este programa académico, las prácticas de laboratorio y el tema que se trataba en clase no estaban relacionadas y las metodologías utilizadas eran diferentes, lo que originaba confusión en los estudiantes; existía un proyecto final que debía ser elaborado junto con las prácticas de laboratorio, lo que creaba una sobrecarga de trabajo que se traducía en proyectos de muy baja calidad. Por otro lado, no se puede medir la capacidad de diseño de un estudiante en un examen convencional como los que se utilizan en otras asignaturas, primero porque el tiempo requerido para entender y asimilar el problema varía dependiendo de cada persona, y limitar este tiempo favorecería a los más rápidos pero no necesariamente a las mejores soluciones.

Durante todo el semestre se realizará un proyecto que busca dar solución a un determinado problema; se realizarán tres avances para determinar su estado, las fechas y contenido de estos avances están sincronizadas con un cronograma que permite a los estudiantes aplicar los conocimientos adquiridos. De esta forma, los estudiantes estarán realizando actividades durante todo el semestre, lo que los obliga a estar revisando y aplicando constantemente la información obtenida en el componente teórico; durante las horas de práctica los estudiantes trabajarán en el mismo proyecto y darán solución a problemas de implementación con ayuda del profesor encargado del componente práctico. Esta forma de evaluación elimina la costumbre de estudiar una semana o un día antes de la prueba, buscar evaluaciones de semestres anteriores y memorizar la forma de solucionarlos. Asimismo, se proporciona al estudiante el tiempo suficiente para realizar el proceso de diseño completo lo que hace que esta experiencia se aproxime mucho a una situación que va a encontrar

en el ejercicio de su profesión; adicionalmente, se pretende reducir la presión y el estrés que generan las pruebas escritas en los estudiantes.

Contenido de las entregas

En cada entrega el equipo de trabajo debe realizar una serie de actividades que le ayuden a crear o mejorar habilidades en: la generación de documentos técnicos; presentación oral y escrita de proyectos en ingeniería; aplicación de metodologías de diseño; uso de la tecnología para resolver problemas locales; trabajo en equipo y mejoramiento de técnicas de auto-aprendizaje. Por esta razón, se evaluará el contenido del informe, su presentación oral y el avance de la solución. Para la elaboración de los informes se suministran las herramientas web (*wiki*) que permiten la edición de documentos por múltiples usuarios, llevar un historial de cambios que les permita conocer los últimos aportes y publicar de forma fácil imágenes y videos; lo que facilita la realización del documento, permitiendo que sea editado desde diferentes lugares; al tiempo que lo pone a disposición de quien esté interesado.

Sustentación individual

Con las entregas parciales se obtiene una calificación que refleja el trabajo realizado por el grupo de trabajo; sin embargo, es necesario determinar la contribución de cada miembro del equipo y evaluar la asimilación de conocimiento de forma individual; adicionalmente, se pretende evitar que miembros del equipo no realicen aportes. Para determinar este nivel de asimilación, se aplica una prueba oral a cada uno de los integrantes, con el fin de determinar si existen o no vacíos conceptuales y si se conoce el trabajo realizado en la elaboración del proyecto; de esta prueba se obtendrá un coeficiente entre 0 y 1, el cual será aplicado a la calificación obtenida por el grupo y de esta forma obtener la calificación individual.

2.6. Actividades

A continuación se enumerarán las actividades que se desarrollan en las tres asignaturas, indicando las habilidades (ver tablas 2.1 y 2.2) que se quieren reforzar o desarrollar.

Lectura de material del curso 10, 11

Con la lectura previa de los temas, el estudiante adquiere la capacidad de absorber conocimiento (11), identificar sus preferencias, deficiencias y buscar ayuda para suplirlas (10), lo cual ayuda al mejoramiento de las habilidades para el auto-aprendizaje.

Lectura de material técnico en inglés 10, 11, 6, 30, 33, 21

La mayor parte de la documentación de los componentes electrónicos y literatura relacionada con los avances de la industria electrónica está escrita en inglés técnico; por esta razón, es necesario que el estudiante aprenda a entender este tipo de escritura y se familiarice con su estructura. Esto le permite identificar el funcionamiento de un componente del sistema (6,30), determinar que componente se adapta mejor a sus necesidades (33) y mejorar sus habilidades para comunicarse en inglés (21).

Utilización de metodologías de diseño 1, 2, 3, 6, 7, 9, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38

La metodología de diseño (30,31) de sistemas embebidos requiere identificar un problema (1, 28), plantear una solución (3,29,32) lógica (9) de alto nivel (9), modelarla (2) a nivel de sistema(6), verificar el cumplimiento de los requerimientos (33,38); proporciona métodos para determinar su arquitectura óptima y definir la función e interacción (37,7) de sus componentes software (36) y hardware (35).

Implementación de sistemas digitales sencillos 3, 14, 29, 30, 35, 36, 17, 18, 19

La realización de prácticas de laboratorio en las que grupos de trabajo (14) implementan diseños de baja o media complejidad le permite al estudiante: Formular recomendaciones (3) para que no se repitan errores en experiencias futuras y utilizar sistemas de desarrollo (30) para la implementación de tareas HW y SW a bajo nivel (36). Con el fin de mejorar la capacidad de comunicación escrita (18, 19) se deben presentar informes que refuercen las habilidades generadas en la utilización de la metodología de diseño, los cuales deben tener la siguiente estructura (17):

- Un diagrama de caja negra que indique las entradas y salidas del sistema.
- Una descripción de alto nivel del algoritmo que implementa la solución (29).
- Un diagrama de bloques que indique el particionamiento y la interconexión entre sus componentes (30).
- Descripciones de alto nivel de cada uno de los componentes (31).
- La implementación y simulación de cada componente y del sistema completo (35), donde se muestre que el sistema cumple con las especificaciones funcionales (38).

Proyecto del curso 1,2,3, 14, 15, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 22, 23, 24, 25, 27

Durante el semestre se trabajará para definir las especificaciones (1,2,3), diseñar (30,31,32,33,34) e implementar un dispositivo que resuelva una necesidad de la sociedad (22). En la sesión teórica se tratarán aspectos relacionados con la concepción, diseño, identificación y definición de las funciones de los componentes del sistema, mientras que en el componente práctico, los relacionados con la implementación de dichos componentes sobre PLDs o SoCs.

Los estudiantes hacen una descripción funcional de alto nivel del sistema, se organizan en grupos de trabajo (14,15), definen la función de cada uno de sus integrantes (27,14,31), establecen estrategias de comunicación (16,31), realizan y cumplen un cronograma de actividades (25,31) que permite resolver la necesidad en el tiempo especificado (22). Una de las estrategias de comunicación es la realización de presentaciones orales (20), en las que cada equipo de trabajo expone el estado de su proyecto, indicando las razones que se tuvieron en cuenta en cada decisión y como se resolvieron los problemas encontrados (24). Adicionalmente, todo este proceso debe documentarse en el sitio web del curso (wiki del portal *linuxenaja*) con el objetivo de crear una base de proyectos que permitan a futuros estudiantes utilizar la experiencia obtenida (23) y cuando sea el caso dar continuidad al proyecto.

El estudiante debe diseñar y construir placas de circuito impreso con los circuitos necesarios para su aplicación (35) siguiendo las normas de diseño establecidas por el fabricante (resolución, número de capas, costo) y las restricciones del circuito (capacidad de corriente, niveles de ruido, compatibilidad electromagnética, etc). Vale la pena aclarar que durante el primer curso los estudiantes no poseen la experiencia necesaria para realizar (sin asistencia) labores como la división de tareas, generación de un cronograma de actividades y fijar la estrategia de comunicación, razón por la cual el docente debe acompañarlos en este proceso.

Desarrollo del plan de innovación del Producto, 22, 23, 44, 25, 26, 45

Todo proyecto debe ser presentado como una idea innovadora; por este motivo, se debe realizar un plan de innovación donde se especifique:

- Oportunidad:
 - Concepto de la innovación
 - ¿Qué problema pretende solucionar?
 - ¿De dónde viene la idea?
 - ¿Existen productos similares?
 - Etapa de desarrollo.
- ¿Quiénes son los clientes claves de esta propuesta?
- ¿Cuál es el valor del producto para sus clientes?

- Mercado y crecimiento
 - ¿En que mercado está inmersa la innovación?
 - ¿Qué alianzas son necesarias para terminar el desarrollo de la innovación?
- Productos/servicios
 - ¿Qué etapas de desarrollo adicionales son necesarias?
 - ¿Qué productos derivados se pueden obtener?
 - Canales de distribución.
- Inversión
 - Inversión estimada para finalizar el producto.
 - Inversión necesaria para comercializar el producto,
- Próximos pasos para concretar la innovación.

Participación en listas de discusión 21

Con el objeto de aumentar las capacidades en la comunicación en idioma extranjero, se alentará a los estudiantes a que hagan parte de listas de discusión en diferentes temas técnicos, algunos problemas que encontrarán en la realización de las diferentes prácticas deben ser consultados en estas listas para encontrar una forma de solución.

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE TAREAS HARDWARE

Como se mencionó anteriormente, todo sistema digital esta formado por diferentes tareas que definen su funcionalidad; estas tareas pueden ser ejecutadas de forma secuencial por un procesador, microcontrolador o DSP; sin embargo

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mark Weiser. The Computer for the 21st Century. <http://www.ubiq.com/hyertext/weiser/SciAmDraft3.html>.
- [2] M. Weiser. Some computer science issues in ubiquitous computing. *Commun. ACM*, 1993.
- [3] D. Servant. Combining amorphous computing and reactive agent-based systems: a paradigm for pervasive intelligence? In *First international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1*, 2002.
- [4] Héctor Martínez. Apropiación de conocimiento en Colombia. El caso de los contratos de importación de tecnología. *Revista Cuadernos de Economía*, 2004.
- [5] Kenneth Arrow. *Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention*. Princeton University Press, 1962.
- [6] European Technology Platform on Smart System Integration (EPoSS). European Technology Platform on Smart Systems Integration. Strategic Research Agenda 2009. 2009.
- [7] M. Tovar and R. Rodríguez. PROSPECTIVA Y VIGILANCIA TECNOLÓGICA DE LA ELECTRÓNICA EN COLOMBIA. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [8] M. Duque and A. Gauthier. Formación de Ingenieros para la Innovación y el Desarrollo Tecnológico en Colombia. *Revista de la Facultad de Minas - Universidad Nacional de Colombia*, December 1999.
- [9] D Zuluaga, S Campos, M Tovar, R Rodríguez, J Sánchez, A Aguilera, L Landínez, and J Medina. Informe de Vigilancia Tecnológica: Aplicaciones de la Electrónica en el Sector Agrícola. Technical report, COLCIENCIAS, 2007.
- [10] M. Odedra. *Information Technology Transfer to Developing Countries: Case studies from Kenya, Zambia and Zimbabwe*. PhD thesis, London School of Economics, 1990.

- [11] Innovation Associates Inc. Technology Transfer and Commercialization Partnerships Executive Summary.
- [12] Charles M. Schweik. *Understanding Knowledge as a Commons: From Theory to Practice*, chapter Free/Open-Source Software as a Framework for Establishing Commons in Science. The MIT Press, 2006.
- [13] V. Gigch, editor. *Applied General System Theory*. Harper & Row, 1978.
- [14] F. Bar, F. Pisani, and M. Weber. Mobile technology appropriation in a distant mirror: baroque infiltration, creolization and cannibalism. *Seminario sobre Desarrollo Económico, Desarrollo Social y Comunicaciones Móviles en América Latina*. Buenos Aires, April 2007.
- [15] Goel Cohen. *Technology transfer: strategic management in developing countries*. Sage Publications inc, 2004.
- [16] K. Goel and Sayers B. Modelling Global-Oriented Energy Technology Transfer to DCs. *Sixth Global Warming International Conference, San Francisco*, 1995.
- [17] M. Odedra-Straub. The Myths and Illusions of Technology Transfer. *IFIP World Congress Proceedings*, August 1994.
- [18] James A. Jolly. The Technology Transfer Process: Concepts, Framework and Methodology. *The Journal of Technology Transfer*. Springer, 1977.
- [19] E. Mansfield. International technological transfer: Forms, Resource Requirements, and Policies. *American Economic Review, Paper and Proceedings*, 1975.
- [20] A. Erdilek and A. Rapoport. *Conceptual and measurement problems in international technology transfer: a critical analysis*". Quarum Books, Westport, 1985.
- [21] M. Odedra. Information Technology Transfer to Developing Countries Is it really taking place? *The 4th IFITC9 International Conference on Human Choice and Computers, North Holland, Amsterdam, Netherlands, HCC 4 held jointly with the CEC FAST Programme.*, 1991.
- [22] C. Forero and H. Jaramillo. The access of researchers from developing countries to international science and technology. *International Social Science Journal*, Volume 54, Issue 171, 2002.
- [23] K. Al-Mabrouk and J. Soar. Building a Framework for Understanding and Improving Information Technology Transfer Process in the Arab Countries. *9th IBIMA Conference: Information Management in Modern Organisations - Trends & Challenges*, 2008.

- [24] D. Wood and A. Weigel. International Collaboration on Satellite-Enabled Projects in Developing Countries. *CP1103, Space, Propulsion & Energy Sciences International Forum - SPESIF*, 2009.
- [25] K. Al-Mabrouk and J. Soar. Identification of key issues for successful technology transfer in the Arab countries: a Delphi study. *International Journal of Technology Transfer and Commercialisation*, 2009.
- [26] R. Janssen. Exploring the impact of culture Technology transfer to five African countries. Master's thesis, University of Twente, the Netherlands, 2010.
- [27] W. Knox. Systems for technological information transfer. *Science*, 1973.
- [28] Luis Alejandro Cortés. *Verification and Scheduling Techniques for Real-Time Embedded Systems*. PhD thesis, Linköpings universitet Institute of Technology, 2005.
- [29] Linux Foundation. Estimating the Total Development Cost of a Linux Distribution. URL: <http://www.linuxfoundation.org/sites/main/files/publications/estimatinglinux.html>, 2008.
- [30] M. Smith. *Application specific integrated circuits*. Addison-Wesley, 199.
- [31] R. M. Stallman. *The GNU Operating System and the Free Software Movement Voices from the Open Source Revolution*. O'Reilly and Associates, 1999.
- [32] Worldwide CDIO Initiative. "Benefits of CDIO" URL:<http://www.cdio.org/benefits-cdio> on November, 2009.
- [33] Edward F. Crawley. The CDIO Syllabus A Statement of Goals for Undergraduate Engineering Education. URL:<http://www.cdio.org>, 2001.
- [34] Bloom B S, editor. *Taxonomy of Educational Objectives, the classification of educational goals*. Mckay.