

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

—Utilizando Herramientas Abiertas—

**CARLOS IVÁN CAMARGO BAREÑO**



# ÍNDICE GENERAL

<b>Índice general</b>	<b>I</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
Sistemas Embebidos . . . . .	3
¿Por qué los Sistemas Embebidos? . . . . .	4
1.1. Estado de la Industria Electrónica en Colombia . . . . .	4
1.2. El Conocimiento como Bien Público . . . . .	7
1.3. Transferencia Tecnológica . . . . .	10
Tecnología . . . . .	11
Concepto de Transferencia Tecnológica . . . . .	12
Tipos de Transferencia Tecnológica . . . . .	13
Canales para la Transferencia de Tecnología . . . . .	14
Obstáculos para una Transferencia Exitosa . . . . .	16
Recomendaciones para una Transferencia Exitosa . . . . .	17
Metodología Propuesta . . . . .	21
<b>2 Implementación de tareas Software utilizando procesadores Soft Core</b>	<b>29</b>
2.1. Introducción . . . . .	29
2.2. Arquitectura del procesador LM32 . . . . .	30
Banco de Registros . . . . .	30
Registro de estado y control . . . . .	30
2.3. Set de Instrucciones del procesador Mico32 . . . . .	33
Instrucciones aritméticas . . . . .	33
Saltos . . . . .	36
Comunicación con la memoria de datos . . . . .	43
Interrupciones . . . . .	46
Retorno de función y de excepción . . . . .	53
2.4. Arquitectura del SoC LM32 . . . . .	53
Bus wishbone . . . . .	53
Comunicación con periféricos . . . . .	55
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>



## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

El gran avance de las técnicas de fabricación de circuitos integrados al igual que las escalas de integración a las que hemos llegado, han permitido que los sistemas basados en bloques digitales sean parte fundamental, facilitando y automatizando 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 áreas del conocimiento. A medida que se extiende el campo de aplicación de los sistemas digitales lo hacen también las exigencias de funcionamiento a ellos impuestas, por lo que nuevos retos en el diseño se presentan a medida que los sistemas digitales se integran a las actividades cotidianas. 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 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 sicología humana, en donde las personas asimilan perfectamente algo y se convierte en parte de la vida diaria sin tener la conciencia de su existencia y utilización.

Esta situación ha dado origen a una industria gigantesca que proporciona dispositivos que satisfacen las nuevas necesidades, con un volumen de producción 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 han sido desplazado por completo

(por ejemplo, puntos de venta, entretenimiento, 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, dado que se tiene una situación bajo la realidad de 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, dejando la mayoría de empresas de base tecnológica como simples represen-

tantes de firmas extranjeras sin capacidad de creación y creatividad local.

Los canales de transferencia tradicional que se limitan a la compra de equipos, capacitación para usarlo y manteniéndolo en condiciones de operación; no suministran conocimientos necesarios para que en el país se generen esos mismos equipos, creados de manera propia y adaptados al entorno social, político y económico local. Es por esta razón que se hace necesario crear verdaderas metodologías de transferencia que permitan asimilar el conocimiento asociado y pueda ser aplicado por diferentes sectores de la sociedad para mejorar la calidad de vida.

En este libro se propone más que una metodología; una experiencia 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 (productos) que utilicen los últimos avances en la industria de los semiconductores. Estas experiencias se vienen aplicando en dos universidades <sup>1 2</sup> y en una empresa de base tecnológica <sup>3</sup>. Hasta el momento se está conformando una gran comunidad encargada 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, por lo que cualquiera que esté interesado puede utilizar/generar/mantener/depurar dicho recurso y ser miembro; 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/empotrados 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 que han buscado nuevos productos en los que pueden ser embebidos circuitos integrados y software.

OJOJO La aparición de los dispositivos digitales en las actividades diarias es una consecuencia lógica de la evolución de las relaciones entre los usuarios y el mundo electrónico digital, los cuales se han caracterizado por una

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de los Andes

<sup>3</sup>*emQbit Ltda*

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 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.<sup>4</sup> 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 por lo que el atraso es 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 la industria 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 la mayoría de los 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. Adicionalmente los llamados ejercicios académicos no permiten por lo general llegar a una etapa de prototipado preindustrial, o

---

<sup>4</sup><http://www.bccresearch.com/>



cuando esto se logra, los tiempos de desarrollo son muy elevados, lo que es poco interesante para la industria.

### **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 a tecnologías que produzcan cambios radicales que incrementen la producción. Esa transmisión de tecnología generadora de crecimiento económico esta 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). Un fenómeno contrario ocurre en otros sectores de la economía (alimentos, textiles, bebidas) los cuales han pasado de ser consumidores a exportadores, adquiriendo 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 (económicos) y no suplen los requerimientos del mercado local.

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 ASESEL <sup>5</sup> en el 2001 <sup>6</sup> 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 (todos ellos 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

<sup>5</sup>Asociación de entidades del Sector Electrónico

<sup>6</sup>Desde 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), por lo que su estudio se dificulta. Adicionalmente, la industria electro-electrónica hace un aporte muy bajo al PIB y no tiene mayor peso en la industria nacional (fuente: ASESEL)

tecnológica, competencia con productos extranjeros, atraso tecnológico y limitado recurso humano con formación avanzada.

De los problemas expuestos anteriormente se puede decir que el 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. Lo relevante a analizar es que la culpa de este atraso tecnológico no es exclusiva de la industria, sino también de la falta de confiabilidad en los pocos productos colombianos, lo que agrava este problema.

Otro actor importante 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, los cuales están repartidos entre programas de formación universitaria, 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.

En 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 es anticuada. 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 del personal académico en el sector productivo. 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**

ACAVOY 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 % <sup>7</sup>. 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 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 metodologías de diseño modernas 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.

---

<sup>7</sup>Según el observatorio de la universidad colombiana, esta cifra aumentó en los últimos años gracias a las matrículas del SENA

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 de 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 Gigch [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 proceso 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.

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 pueden 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*.

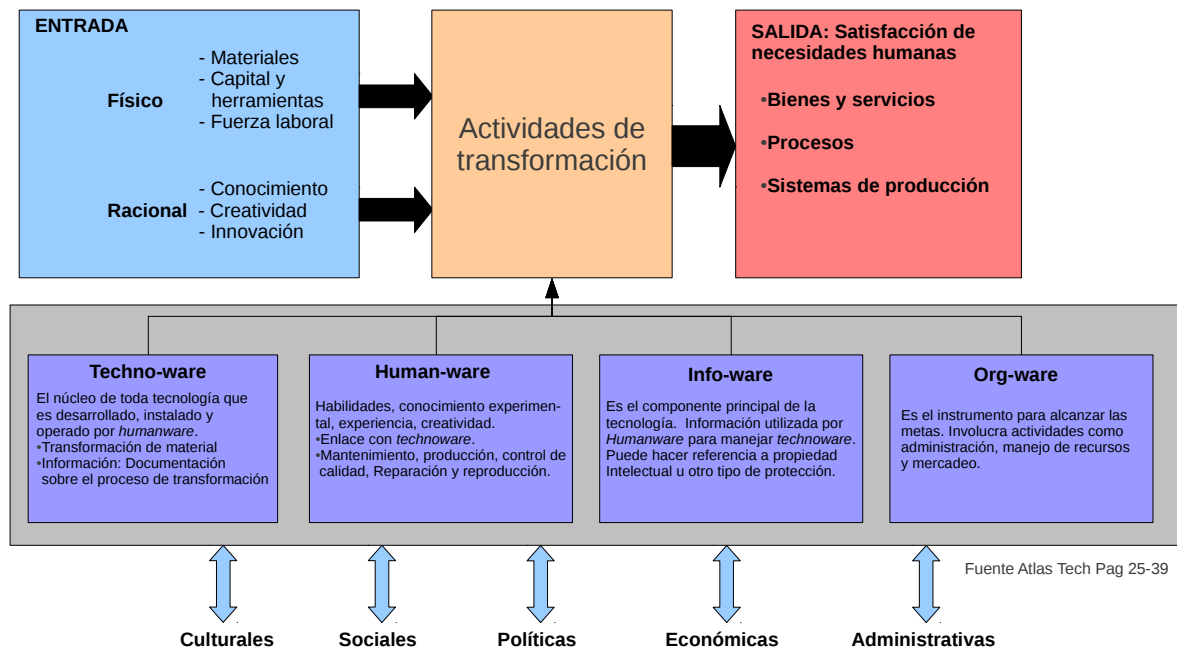


Figura 1.2: Modelo del proceso de transferencia de tecnología indicando la composición de los canales formales e informales

- *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 *tecnoware*, *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 desestimular 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 perso-

nal 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 pro-

ductivo 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.

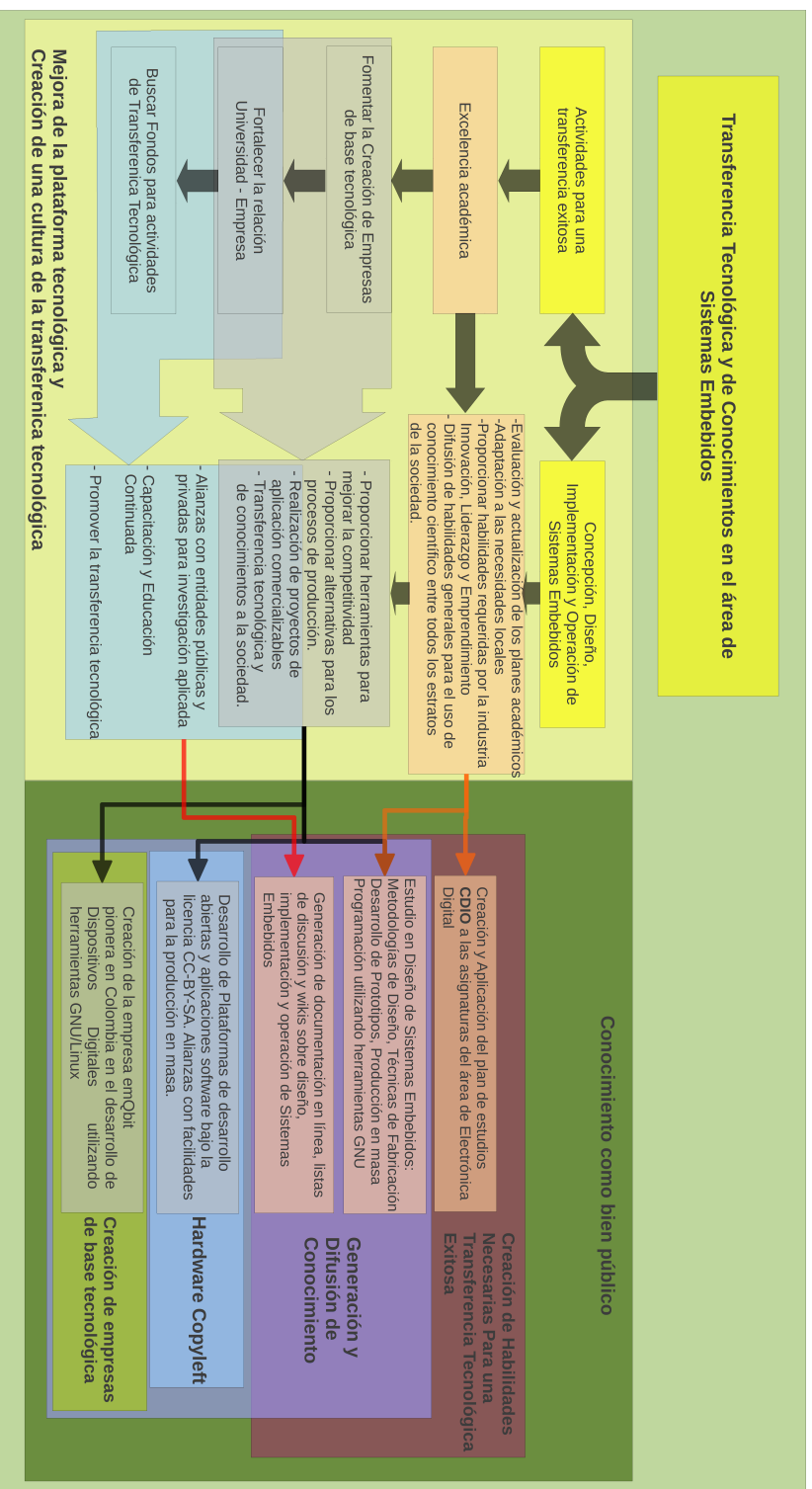


Figura 1.3: Resumen de las recomendaciones para una transferencia tecnológica exitosa



## 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.

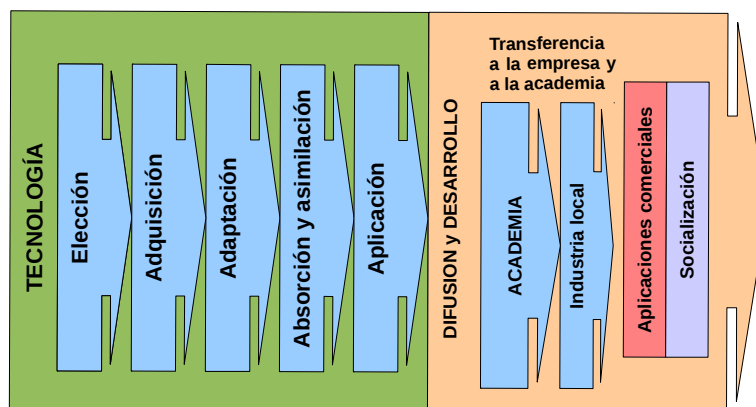


Figura 1.4: Etapas de la metodología propuesta para la transferencia tecnológica y de conocimientos en el área de diseño de sistemas embebidos

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 ??, 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 *copy-left 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

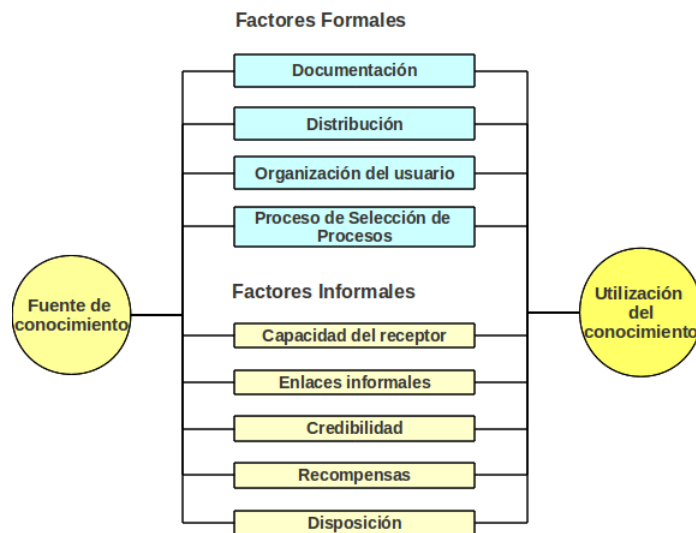


Figura 1.5: Canales formales e informales del proceso de transferencia tecnológica

. 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 comuni-

dad 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

# IMPLEMENTACIÓN DE TAREAS SOFTWARE UTILIZANDO PROCESADORES SOFT CORE

### 2.1. Introducción

En el capítulo anterior se estudió la forma de implementar tareas hardware utilizando máquinas de estado algorítmicas. La implementación de tareas hardware es un proceso un poco tedioso ya que involucra la realización de una máquina de estados por cada tarea; la implementación del camino de datos se simplifica de forma considerable ya que existe un conjunto de bloques constructores que pueden ser tomados de una librería creada por el diseñador. El uso de tareas hardware se debe realizar únicamente cuando las restricciones temporales del diseño lo requieran, ya que como veremos en este capítulo, la implementación de tareas software es más sencilla y rápida.

La estructura de una máquina de estados algorítmica permite entender de forma fácil la estructura de un procesador ya que tienen los mismos componentes principales (unidad de control y camino de datos), la diferencia entre ellos es la posibilidad de programación y la configuración fija del camino de datos del procesador.

En este capítulo se estudiará la arquitectura del procesador MICO32 creado por la empresa Lattice semiconductor y gracias a que fué publicado bajo la licencia GNU, es posible su estudio, uso y modificación. En la primera sección se hace la presentación de la arquitectura; a continuación se realiza el análisis de la forma en que el procesador implementa las diferentes instrucciones, iniciando con las operaciones aritméticas y lógicas siguiendo con las de control de flujo de programa (saltos, llamado a función); después se analizarán la comunicación con la memoria de datos; y finalmente el manejo de interrupciones.

En la segunda sección se abordará la arquitectura de un SoC (System on a Chip) basado en el procesador LM32, se analizará la forma de conexión entre los periféricos y la CPU utilizando el bus wishbone; se realizará una descripción detallada de la programación de esta arquitectura utilizando herramientas GNU.

## 2.2. Arquitectura del procesador LM32

La figura 2.1 muestra el diagrama de bloques del soft-core LM32, este procesador utiliza 32 bits y una arquitectura de 6 etapas del pipeline; las 6 etapas del pipeline son:

1. *Address*: Se calcula la dirección de la instrucción a ser ejecutada y es enviada al registro de instrucciones.
2. *Fetch*: La instrucción se lee de la memoria.
3. *Decode*: Se decodifica la instrucción y se toman los operandos del banco de registros o tomados del bypass.
4. *Execute*: Se realiza la operación especificada por la instrucción. Para instrucciones simples como las lógicas o suma, la ejecución finaliza en esta etapa, y el resultado se hace disponible para el bypass.
5. *Memory*: Para instrucciones más complejas como acceso a memoria externa, multiplicación, corrimiento, división, es necesaria otra etapa.
6. *Write back*: Los resultados producidos por la instrucción son escritas al banco de registros.

### Banco de Registros

El LM32 posee 32 registros de 32 bits; el registro *r0* siempre contiene el valor 0, esto es necesario para el correcto funcionamiento de los compiladores de C y ensamblador; los siguientes 8 registros (*r1* a *r7*) son utilizados para paso de argumentos y retorno de resultados en llamados a funciones; si una función requiere más de 8 argumentos, se utiliza la pila (*stack*). Los registros *r1* - *r28* pueden ser utilizados como fuente o destino de cualquier instrucción. El registro *r29* (*ra*) es utilizado por la instrucción *call* para almacenar la dirección de retorno. El registro *r30* (*ea*) es utilizado para almacenar el valor del contador de programa cuando se presenta una excepción. El registro *r31* (*ba*) almacena el valor del contador de programa cuando se presenta una excepción tipo *breakpoint* o *watchpoint*. Los registros *r26* (*gp*) *r27* (*fp*) y *r28* (*sp*) son el puntero global, de frame y de pila respectivamente. Después del reset el valor no se define el valor de los registros, por lo que la primera acción que debe ejecutar el programa de inicialización es colocar un cero en el registro *r0* (*xor r0, r0, r0*)

### Registro de estado y control

La tabla 2.1 muestra los registros de estado y control (CSR), indicando si son de lectura o escritura y el índice que se utiliza para acceder al registro.

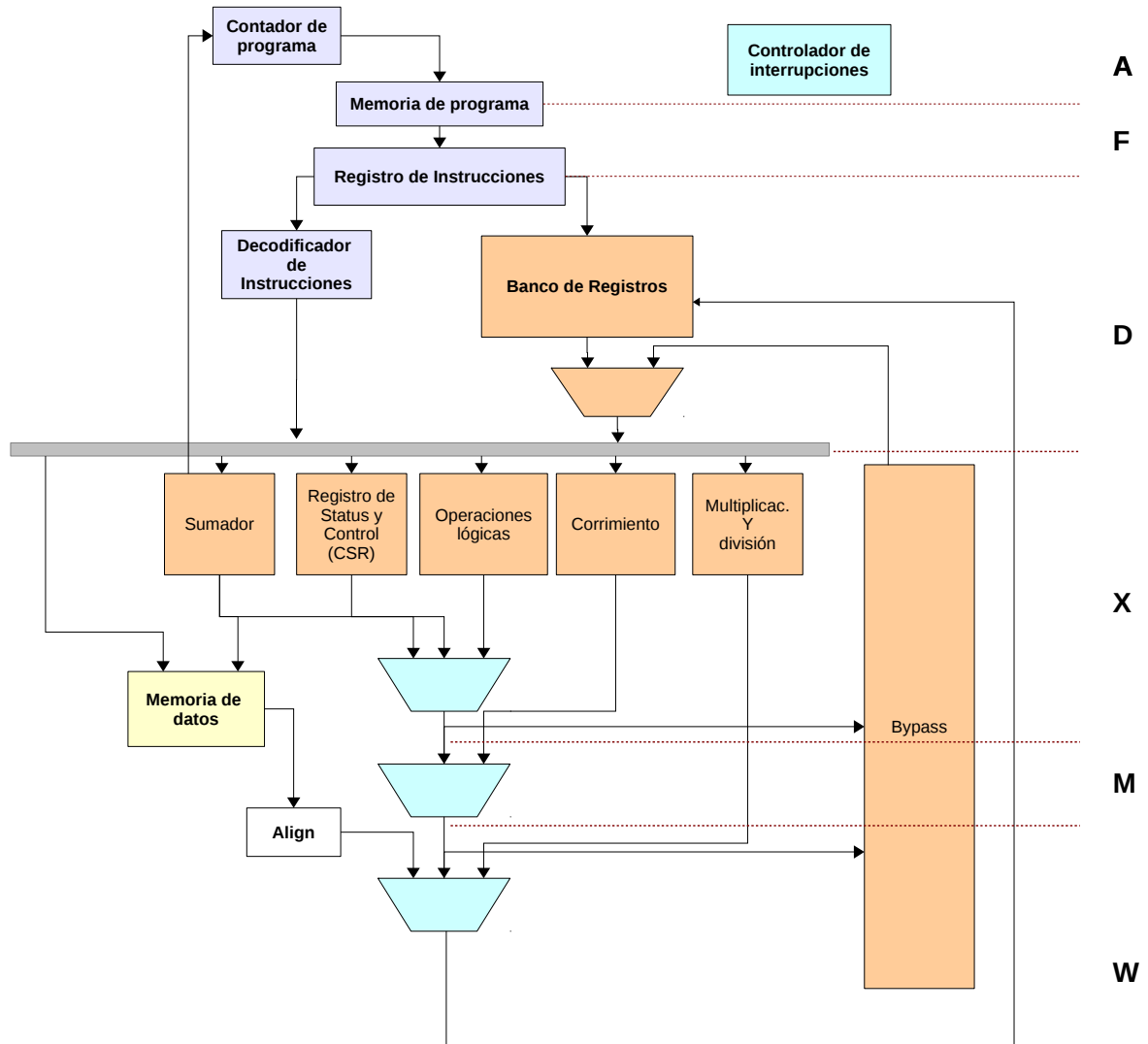


Figura 2.1: Diagrama de bloques del LM32

Cuadro 2.1: Registro de Estado y Control

Nombre	Index	Descripción
IE	0x00	(R/W)Interrupt enable
EID	—	(R) Exception ID
IM	0x01	(R/W)Interrupt mask
IP	0x02	(R) Interrupt pending
ICC	0x03	(W) Instruction cache control
DCC	0x04	(W) Data cache control
CC	0x05	(R) Cycle counter
CFG	0x06	(R) Configuration
EBA	0x07	(R/W)Exception base address

### Contador de Programa (PC)

El contador de programa es un registro de 32 bits que contiene la dirección de la instrucción que se ejecuta actualmente. Debido a que todas las instrucciones son de 32 bits, los dos bits menos significativos del PC siempre son zero. El valor de este registro después del reset es *h00000000*

### EID Exception ID

El índice de la excepción es un número de 3 bits que indica la causa de la detención de la ejecución del programa. Las excepciones son eventos que ocurren al interior o al exterior del procesador y cambian el flujo normal de ejecución del programa. Los valores y eventos correspondientes son:

- 0: Reset; se presenta cuando se activa la señal de reset del procesador.
- 1: Breakpoint; se presenta cuando se ejecuta la instrucción break o cuando se alcanza un punto de break hardware.
- 2: Instruction Bus Error; se presenta cuando falla la captura de una instrucción, típicamente cuando la dirección no es válida.
- 3: Watchpoint; se presenta cuando se activa un watchpoint.
- 4: Data Bus Error; se presenta cuando falla el acceso a datos, típicamente porque la dirección solicitada es inválida o porque el tipo de acceso no es permitido.
- 5: División por cero; Se presenta cuando se hace una división por cero.
- 6: Interrupción; se presenta cuando un periférico solicita atención por parte del procesador, para que esta excepción se presente se deben habilitar las interrupciones globales (IE) y la interrupción del periférico (IM).
- 7: System Call; se presenta cuando se ejecuta la instrucción *scall*.

### IE Habilitación de interrupción

El registro IE contiene el flag IE, que determina si se habilitan o no las interrupciones. Si este flag se desactiva, no se presentan interrupciones a pesar de la activación individual realizada con IM. Existen dos bits *BIE* y *EIE* que se utilizan para almacenar el estado de IE cuando se presenta una excepción tipo breakpoint u otro tipo de excepción; esto se explicará más adelante cuando se estudien las instrucciones relacionadas con las excepciones.

### IM Máscara de interrupción

La máscara de interrupción contiene un bit de habilitación para cada una de las 32 interrupciones, el bit 0 corresponde a la interrupción 0. Para que la interrupción se presente es necesario que el bit correspondiente a la interrupción y el flag IE sean igual a 1. Después del reset el valor de IM es *h00000000*

### IP Interrupción pendiente

El registro IP contiene un bit para cada una de las 32 interrupciones, este bit se activa cuando se presenta la interrupción asociada. Los bits del registro IP deben ser borrados escribiendo un 1 lógico.

- Compilación de programas para el LM32, explicar un ejemplo sencillo puede ser el de tipos de datos comentando todos los archivos, *lm32*, *crt0.s*, etc - Set de instrucciones, con ejemplos en donde sea necesario como en: - llamado a funciones: Ejemplo sencillo que muestre como se pasan parámetros a través de *r0*, *r1*, *r2*. - saltos: *If*, *while*, forma - interrupciones explicar como se debe modificar el *crt0.s* para incluir los vectores de excepción y como se atiende la interrupción. - acceso a memoria externa: Explicar como se mapean los registros de los periféricos a C, y tipos de datos. - Acceso a memoria externa: Bus wishbone: Topologías, señales del WB, arquitectura del conbus, explicar *uart* y *timer*. - Como se forma el SoC con el LM32. Diagrama de bloques del SoC, explicando donde quedan los diferentes periféricos.

## 2.3. Set de Instrucciones del procesador Mico32

En esta sección se realizará un análisis del conjunto de instrucciones del procesador Mico32; para facilitar el estudio se realizó una división en cuatro grupos comenzando con las instrucciones aritméticas y lógicas, siguiendo con las relacionadas con saltos, después se analizará la comunicación con la memoria de datos y finalmente las relacionadas con interrupciones y excepciones. Para cada uno de estos grupos se mostrará el camino de datos (simplificado) asociado al conjunto de instrucciones.

### Instrucciones aritméticas

En la figura 2.2 se muestra el camino de datos simplificado de las operaciones aritméticas y lógicas cuyos operandos son registros, y el resultado se

almacena en un registro; en otras palabras son de la forma: **gpr[RX] = gpr[RY]** **OP gpr[RZ]**, donde: OP puede ser *nor, xor, and, xnor, add, divu, modu, mul, or, sl, sr, sru, sub*. Como puede verse en esta figura la instrucción contiene la información necesaria para direccionar los registros que almacenan los operandos **RY** (*instruction\_d* 25:21) y **RZ** (*instruction\_d* 20:16), estas señales de 5 bits direccionan el banco de registros y el valor almacenado en ellos puede obtenerse en dos salidas diferentes (**gpr[rz]** y **gpr[ry]**). En el archivo *rtl/lm32/lm32\_cpu.v* se implementa el banco de registros de la siguiente forma:

```
assign reg_data_0 = registers[read_idx_0_d];
assign reg_data_1 = registers[read_idx_1_d];
```

En este código *reg\_data\_0* y *reg\_data\_1* son las dos salidas **gpr[rz]** y **gpr[ry]**; las señales *read\_idx\_0\_d* y *read\_idx\_1\_d* corresponden a *instruction\_d* 25:21 y *instruction\_d* 20:16 respectivamente. El contenido de los registros direccionados de esta forma son llevados al modulo *logic\_op* donde se realiza la operacion correspondiente a la instrucción y el resultado pasa a través de los estados del pipeline hasta llegar a la señal *w\_result* (parte inferior de la figura) esta señal entra al banco de registros para ser almacenada en la dirección dada por la señal *write\_idx\_w* la cual es fijada por la instrucción, más específicamente por (*instruction\_d* 15:11). En el archivo *rtl/lm32/lm32\_cpu.v* se implementa esta escritura al banco de registros de la siguiente forma:

```
always @(posedge clk_i)
begin
    if (reg_write_enable_q_w == 'TRUE)
        registers[write_idx_w] <= w_result;
end
```

## Entre registros

### Inmediatas

Existe otro grupo de operaciones lógicas y aritméticas en las que uno de los operandos es un registro y el otro es un número fijo, esto permite realizar operaciones con constantes que nos son almacenadas previamente en registros, sino que son almacenadas en la memoria de programa. En la figura 2.3 se muestra como se modifica el camino de datos para este tipo de instrucciones; en ella, podemos observar que *instruction\_d* 25:21 direcciona uno de los operandos que está almacenado en el banco de registros y de forma similar al caso anterior el dato almacenado es llevado al bloque *logic\_op*. El segundo operando es llevado a este bloque desde un multiplexor donde se hace una extensión de signo de *instruction\_d* 15:0 o se hace un corrimiento a la derecha de 16 posiciones; esto, para convertir el número de 16 bits a uno de 32 bits, lo que da como resultado *16instruction\_d[15]*, *instruction\_d[15:0]* y *instruction\_d[15:0]*,

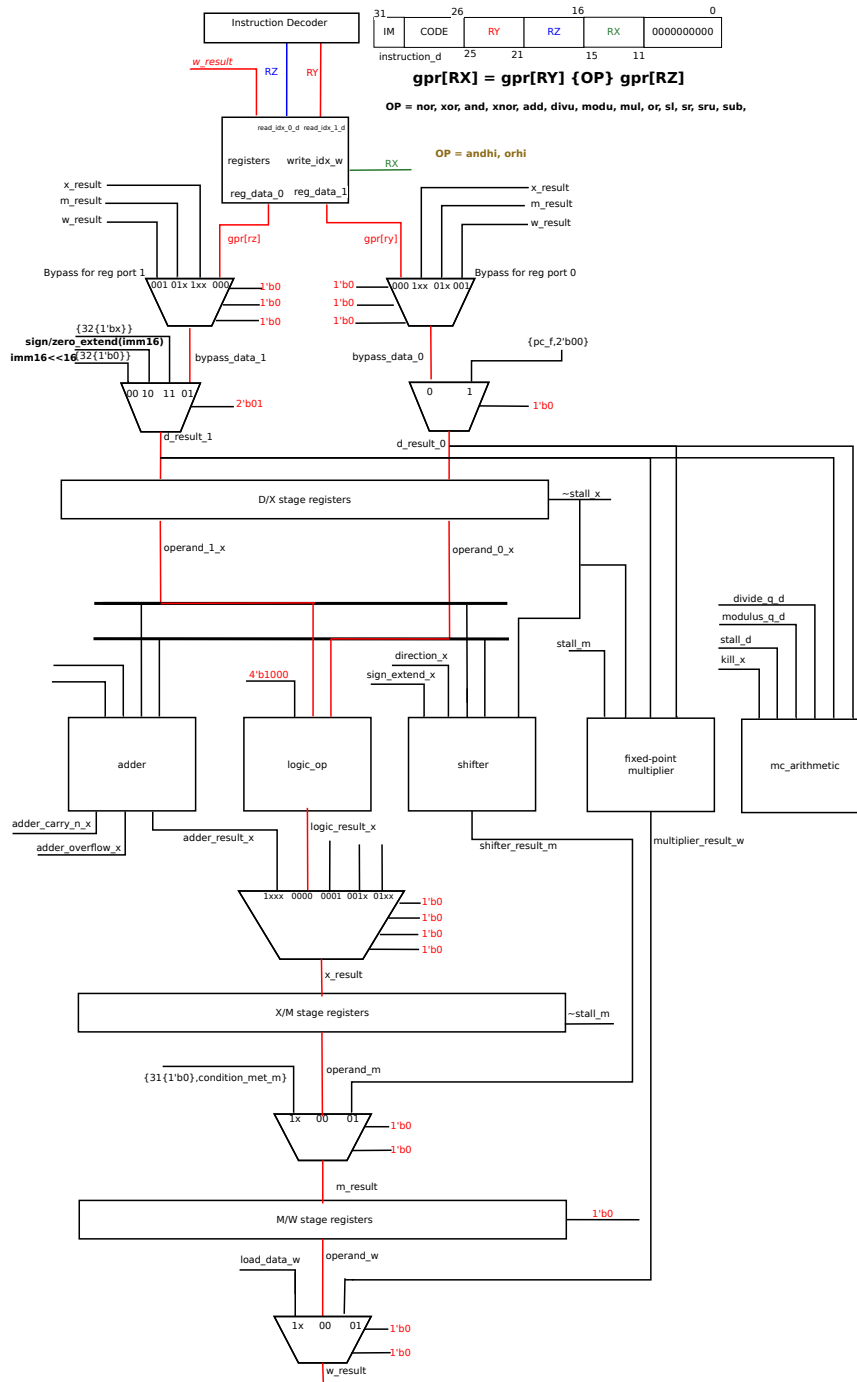


Figura 2.2: Camino de datos de las operaciones aritméticas y lógicas entre registros

16'h0000 respectivamente; el corrimiento de 16 bits a la derecha se hace para poder realizar las operaciones *andhi* y *orhi*, las cuales solo operan sobre la parte alta de los operandos.

## Saltos

Los saltos permiten controlar el flujo de ejecución del programa posibilitando la implementación de ciclos, llamado a funciones, y toma de decisiones. En esta subsección estudiaremos el camino de datos resultante para este tipo de instrucciones. A diferencia de las instrucciones aritméticas y lógicas, en este tipo de instrucciones se modifica el valor del contador de programa.

## Condicionales

En la instrucción se almacena la dirección de los registros que deben ser comparados, específicamente en *instruction.d* 25:21 y *instruction.d* 20:16; los valores almacenados en estos registros son llevados al sumador y a un bloque especial que determina si se cumple o no la condición (señales rojas en la gráfica); la señal *condition.met.x* se activa si la condición se cumple.

Para que el valor del contador de programa se modifique, es necesario que las señales *condition.met.x*, *branch.m* y *valid.m* se encuentren activas (señales amarillas en la gráfica); la señal *branch.m* se activa cuando la instrucción es de tipo *branch* o *call*; la señal *valid.m* se activa cuando se presenta una instrucción válida. Adicionalmente, es necesario que el procesador no se encuentre en un estado de *stall*. Si se cumplen las condiciones anteriores, se activará la señal *branch.taken.m*, la que le indicará a la unidad de instrucciones que cargue el valor de la señal *branch.target.m* en el contador de programa.

El valor de *branch.target.m* (señal azul en la gráfica) es fijado por dos diferentes métodos: cuando se produce una excepción o cuando se produce un salto, la señal *exception.x* selecciona el valor adecuado para cada caso. La señal *branch.target.x* es el resultado de la suma de *pc.d* y de *branch.offset.d* (para esta suma no se utiliza el bloque sumador). El valor de *branch.offset* es seleccionado por la señal *select.call.immediate* entre las señales *call.immediate* (para instrucciones de llamado a función) y *branch.immediate*; esta última tiene como valor 16*inst*[15], *inst*[15:0], lo que es una extensión de signo de la constante de 16 bits almacenado en la memoria de programa.

En la figura 2.4 se muestra el camino de datos equivalente a las instrucciones relacionadas con condicionales;

En la figura 2.5 se ilustran 3 ciclos que utilizan condicionales; en color azul se muestra el código en C y en negro se muestra el código implementado por el compilador.

## Llamado a función y salto incondicional

Existen dos tipos de llamado a función y de salto incondicional; su diferencia radica en la forma de almacenar la dirección a la que deben saltar. En la



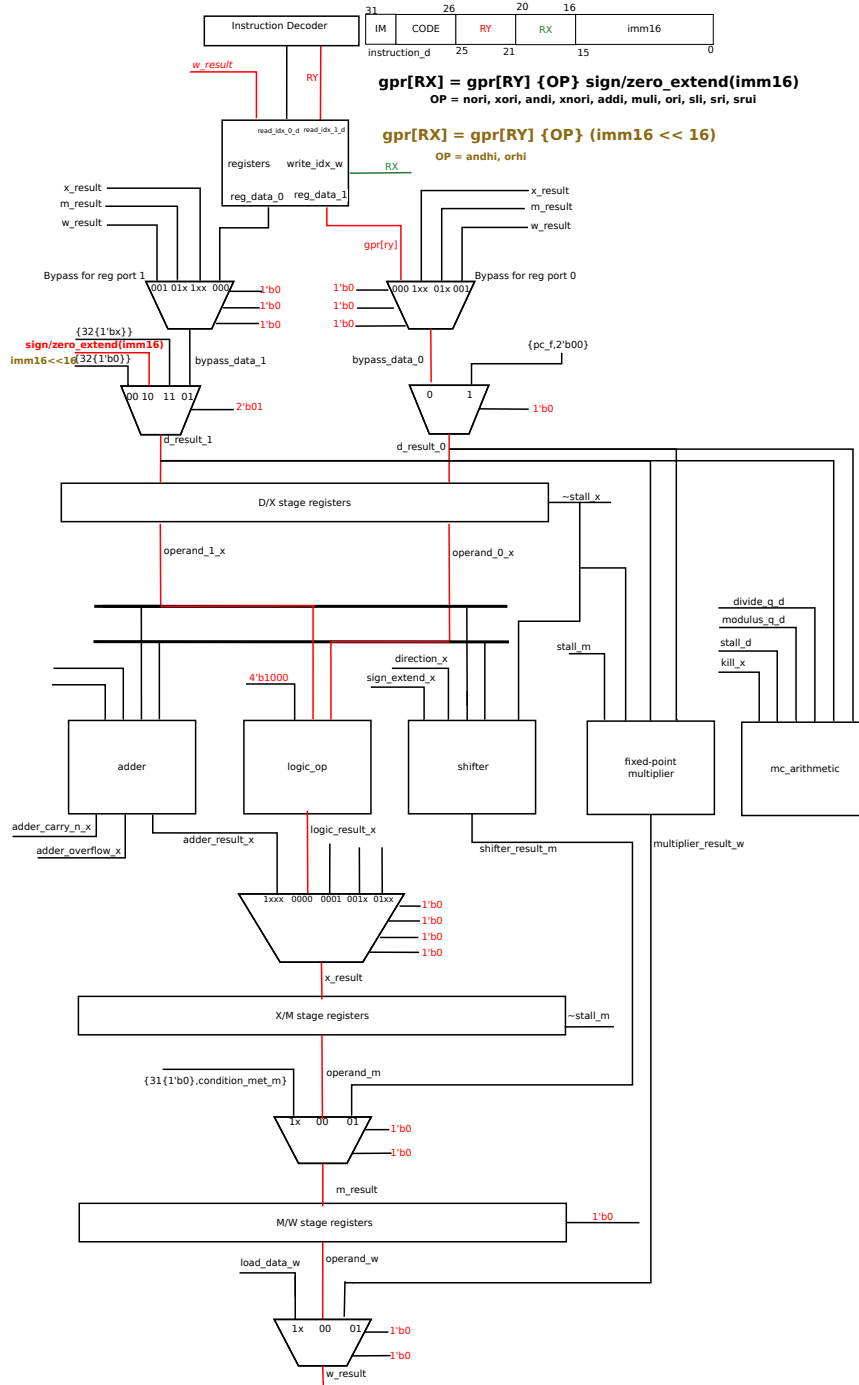


Figura 2.3: Camino de datos de las operaciones aritméticas y lógicas inmediatas

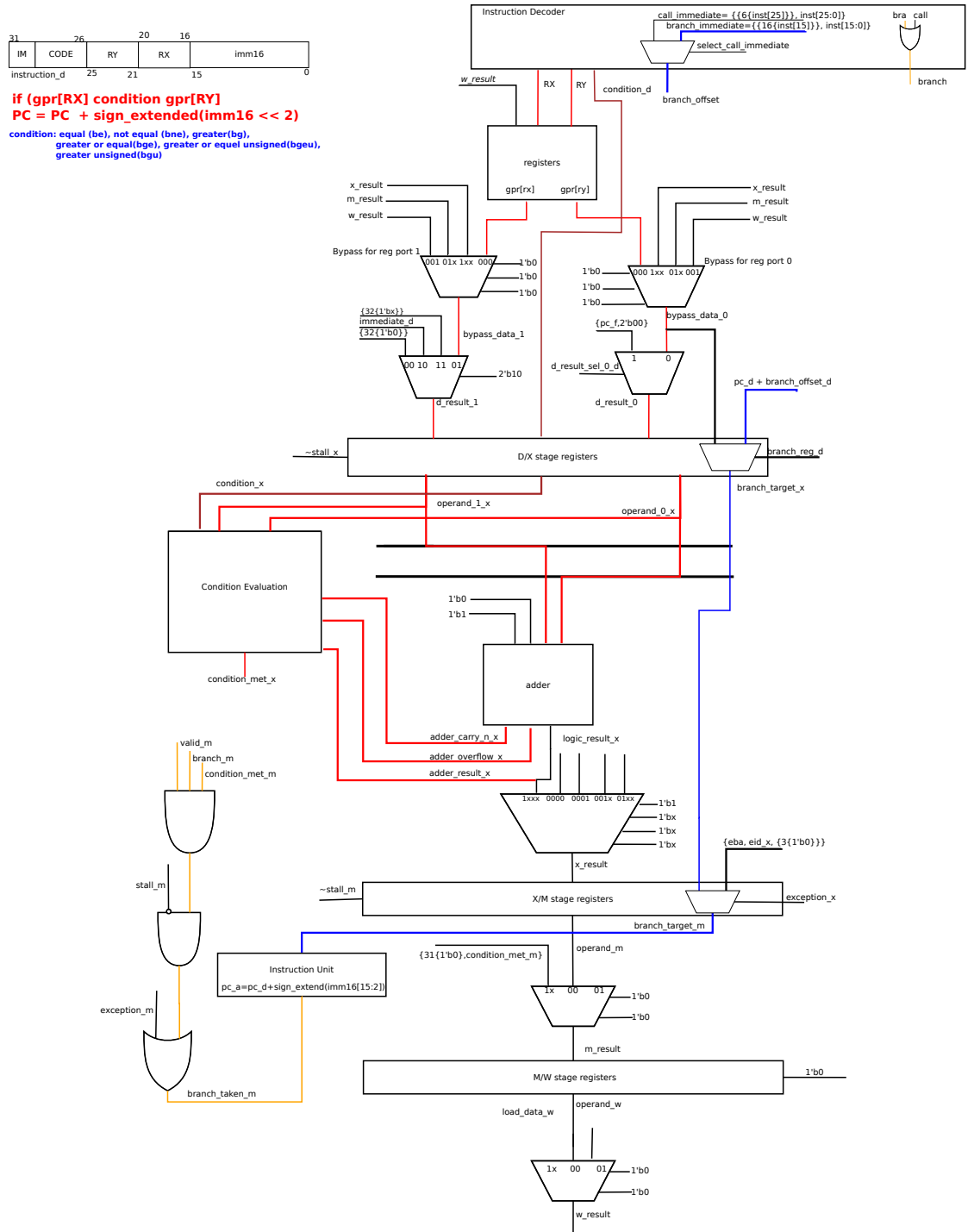


Figura 2.4: Camino de datos de los saltos condicionales

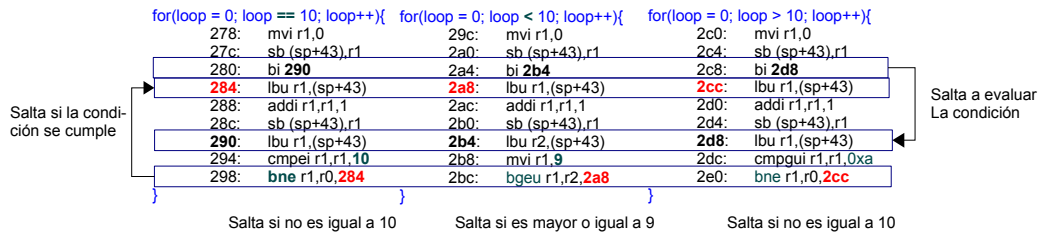


Figura 2.5: Ejemplo de código: saltos condicionales

figura 2.7 se muestra el camino de datos correspondiente a las instrucciones *calli* y *bi*, estas almacenan en la instrucción la dirección y en la figura 2.7 se muestra el camino de dato correspondiente a las instrucciones *call* y *b* las que almacenan la dirección en un registro.

Para ambos casos el contador de programa es modificado si se activan las señales *condition\_met\_x*, *branch\_m* y *valid\_m*; la señal *valid\_m* se activa cuando se presenta una instrucción válida; *branch\_m* (color amarillo en los graficos) se activa cuando la instrucción que se está ejecutando es un salto o un llamado a función; y *condition\_met\_x* se activa cuando se cumple con la condición para el salto, debido a que estos saltos y llamados son incondicionales, el MI-CO32 contempla dos casos en los que activa esta señal, tal como se muestra a continuación (tomado de *rtl/lm32/lm32\_cpu.v*):

```
always @*
begin
    case (instruction[28:26])
        3'b000: condition_met_x = 'TRUE;
        3'b110: condition_met_x = 'TRUE;
        ....
        ....
        ....
        default: condition_met_x = 1'bx;
    endcase
end
```

Los bits *instruction[28:26]* hacen parte del código de la instrucción; el valor para las instrucciones *bi* y *b* es 000 y para *call* y *calli* es 110, lo que activa *condition\_met\_x* cada vez que se presentan estas instrucciones.

De forma similar a las instrucciones relacionadas con saltos condicionales el valor del contador de programa es igual al valor de la señal *branch\_target\_x* (señal de color verde en las figuras); el valor de esta señal para las instruccio-

nes *call* y *b* proviene del valor almacenado en el registro seleccionado por *instruction\_d* [25:21]. Para las instrucciones *calli* y *bi* el valor está dado por la señal *branch\_offset* la que toma como valor *6ins*[25], *ins*[25:0] o *16ins*[15], *ins*[15:0] para una instrucción *call* o *b* respectivamente.

Adicionalmente, para las instrucciones de llamado a función *call* y *calli* se debe almacenar en el registro R29 la dirección de memoria siguiente a la que se realizó el llamado a la función, esto con el fin de retornar al flujo de programa principal, esto se logra haciendo uso del pipeline y se utiliza el valor del contador de programa *pc.m* cuyo valor contiene el valor adecuado para el retorno del llamado a función; el valor de *pc.m* (señal color morado en las figuras) es asignado a la señal *w\_result* del banco de registros para ser almacenado en el registro indicado por *write\_idx* (señal marrón en los gráficos); la que toma el valor de 29 cuando se presenta una instrucción *calli* o *call*.

En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de uso de la función *call*. El código en C utilizado para este ejemplo se muestra en color azul. La línea de código *result1 = function(0x30)* hace el llamado a la función *function* pasándole el parámetro *0x30* (decimal 48); el código implementado por el compilador se muestra junto al código en C; como se mencionó anteriormente, los primeros registros del banco de registros se usan para pasar parámetros entre funciones, en el paso 1, se almacena el valor *0x30* (48 decimal) en *r1*; en el paso dos se hace un llamado inmediato a función a la dirección de memoria *0x8C*, lo que hace que el valor del contador de programa tome el valor *0x8C* y se almacene el valor *0x310* en el registro *ra*.

La función *function* está declarada como *int function(int x)* y reside en la posición de memoria *0x8C*. En el paso 3, se almacena el valor de los registros que se utilizan en la función con el fin de restaurarlos antes de retornar al programa donde fué llamada, esto se hace debido a que solo existe un banco de registros en el procesador y si no se hace esto el valor de los registros antes y después del llamado será diferente lo que ocasionará errores en los algoritmos implementados. El registro *ra* almacena el valor de la dirección de retorno, y se almacena para asegurar que cuando se hagan llamados a función anidados se retorne a la dirección adecuada. En el paso 4 se restaura el valor de los registros, garantizando la continuidad del programa principal; finalmente, en el paso 6 la función *ret* carga el valor del *ra* en el contador de programa.

En la figura 2.9 se ilustra la importancia del almacenamiento de los registros en los llamados a funciones, para este ejemplo se consideró el registro *ra*; cuando se almacena el registro *ra* en la función *F2* para ser restaurado al finalizar la función el flujo de programa retorna a la función *F1*, lo que se ejecuta correctamente en los dos casos. Cuando finaliza *F1* el valor de *ra* varía; cuando no se almacena el valor la dirección de retorno de *F1* es modificada por lo que cuando se retorna el contador de programa se hace igual a la dirección de retorno de *F2*.



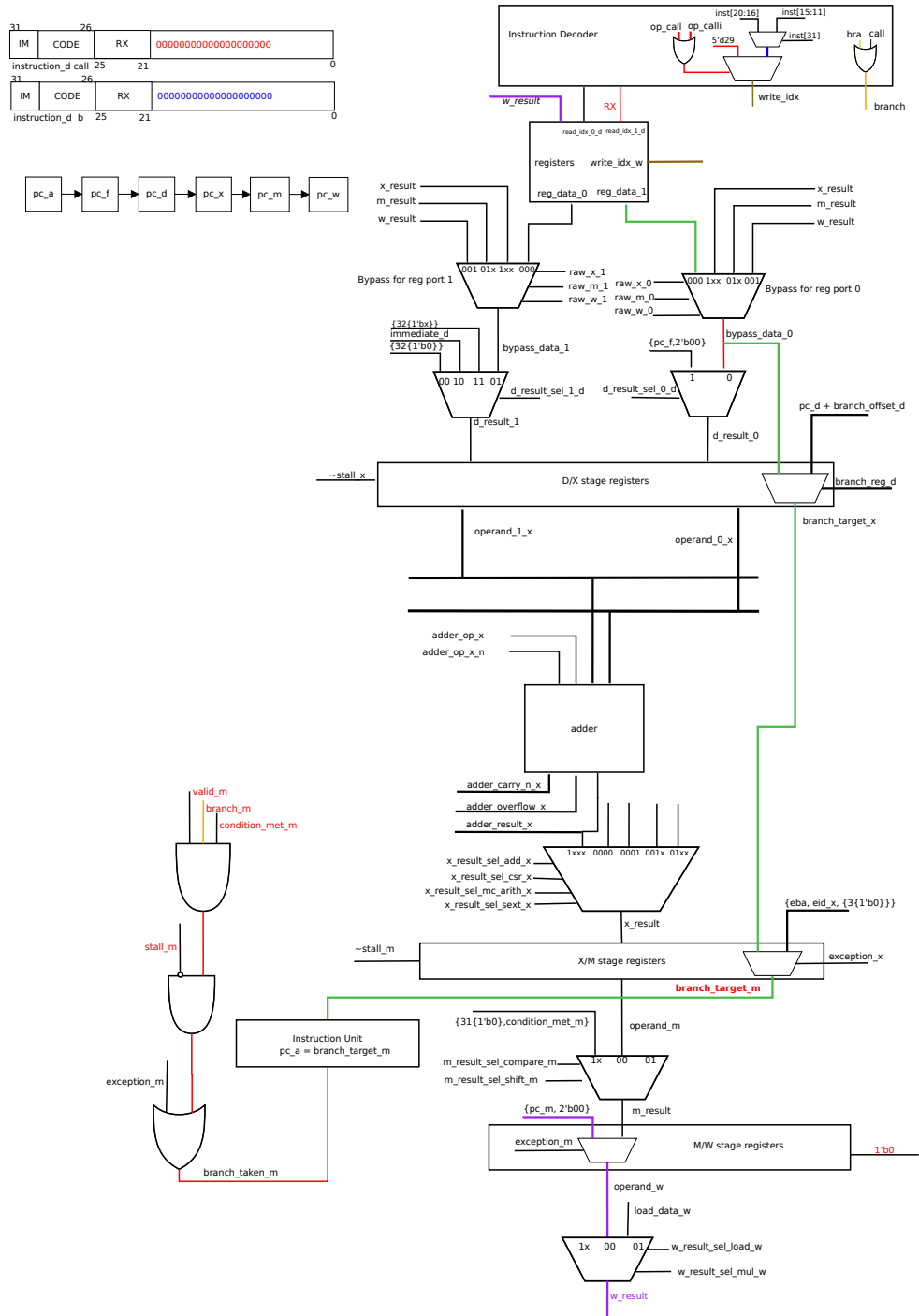


Figura 2.7: Camino de datos de los saltos y llamado a funciones

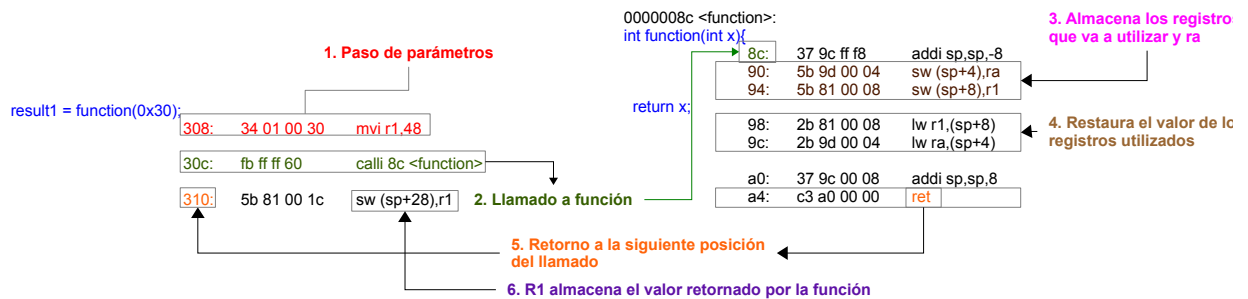


Figura 2.8: Ejemplo de código: llamado a función

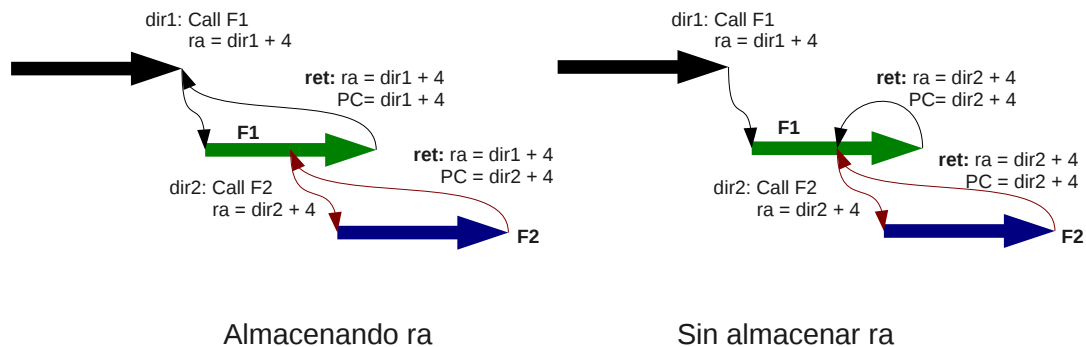


Figura 2.9: Llamado a función anidado

## Comunicación con la memoria de datos

Antes de estudiar el camino de datos correspondiente a este grupo de instrucciones, hablaremos de los tipos de datos que soporta el procesador MI-CO32. En la figura 2.10 se muestran ejemplos de manipulación de diferentes tipos de datos y como estos son tratados en la memoria del procesador.

### Tipos de datos

El primer tipo de datos que se muestra en esta figura es el *char*, la variable *data8* es declarada como un *volatile unsigned char \**, es decir un puntero a un *char* sin signo tipo *volatile*; los tipos de datos *volatile* le indican al compilador que no realice optimizaciones sobre esta variable, lo que es importante cuando se direccionan periféricos. Al puntero *data8* se le asigna la dirección *0x400* y el valor *0x44*. Si se aumenta el valor de la dirección del puntero en una posición *data8++* la nueva dirección será *0x401* y si se aumenta de nuevo pasará a ser *0x402*; lo que indica que el procesador a pesar de ser de 32 bits puede realizar direccionamiento con granularidad byte; esto es muy conveniente para un al-

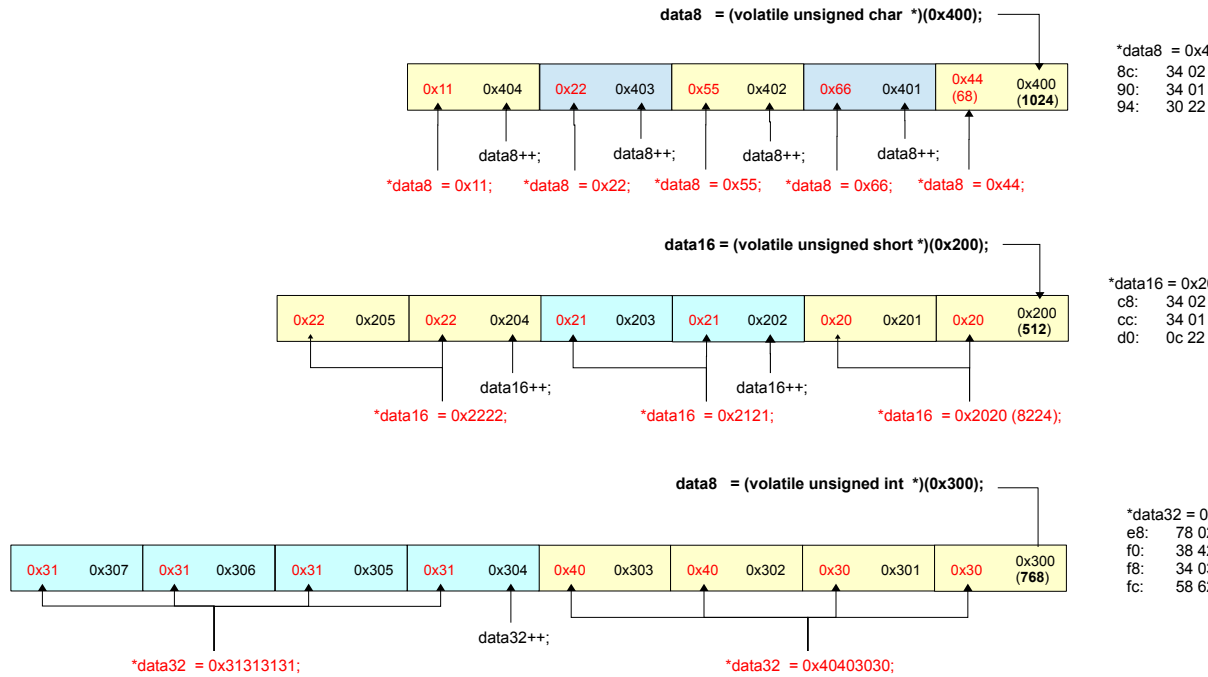


Figura 2.10: Tipos de datos soportados por el procesador Mico32

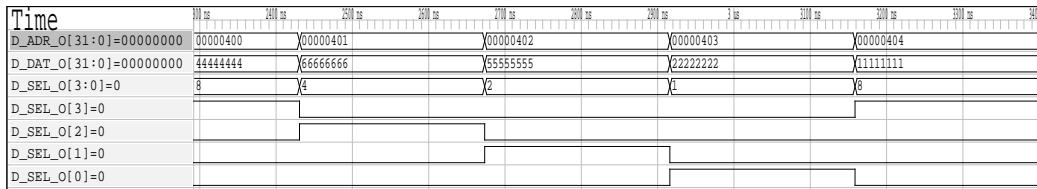
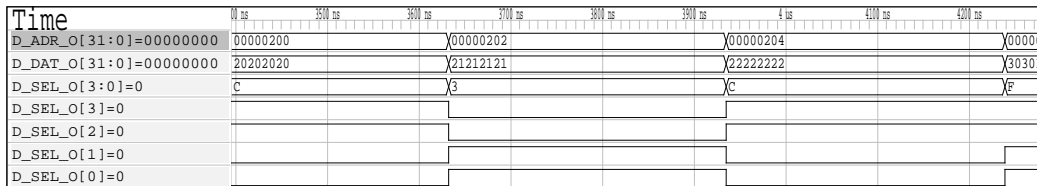
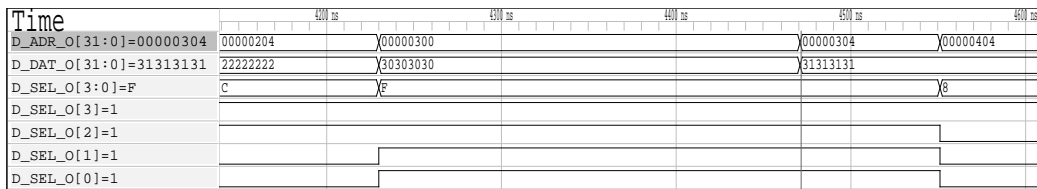
macenamiento eficiente de información, de no ser así se utilizaría una palabra de 32 bits para almacenar 8 bits.

La segunda parte de la figura 2.10 ilustra el manejo del tipo de dato *short* el cual es de 8 bits; para esto se utiliza en puntero *data16* con una dirección inicial de *0x200* y un valor de *0x2020*; al aumentar la dirección del puntero en 1 (*data16++*) la dirección resultante es *0x202*, lo que permite el almacenamiento eficiente de este tipo de dato.

Finalmente se ilustra el tipo de datos *int* y se observa como las direcciones de memoria inicial y final después de aumentar el valor del puntero son *0x300* *0x304*; lo que muestra que el direccionamiento interno de la memoria depende del tipo de datos.

El procesador MICO32 posee 4 señales *D\_SEL\_O[3:0]* que son utilizadas para indicarle a los periféricos el tipo de operación de lectura/escritura que se está efectuando; en la figura 2.11 se observa que estas señales se activan de forma individual indicando el byte que se está direccionando; en la figura 2.12 las señales se activan por parejas indicando el grupo de 2 bytes que se está direccionando; finalmente en la figura 2.13 las 4 señales se activan al tiempo lo que indica un acceso a los 4 bytes al mismo tiempo.



Figura 2.11: Acceso a un data tipo *char*Figura 2.12: Acceso a un data tipo *short*Figura 2.13: Acceso a un data tipo *int*

### Escritura a la memoria de datos

El acceso a memoria de datos permite extender las capacidades del procesador posibilitando la conexión de periféricos; los que a su vez, realizan la comunicación con el exterior utilizando diferentes protocolos de comunicación y medios físicos. En esta subsección se describirá la forma en la que el MICO32 implementa las operaciones de lectura y escritura a la memoria de datos.

En la figura 2.14 se ilustra el camino de datos asociado a las instrucciones *sb*, *sh* y *sw*. En las tres, el valor contenido en el registro direccionado por *instruction.d[25:21]* (RX señales color rojo en la figura) más el valor de 16 bits (con signo extendido a 32 bits) forman la dirección a la que se desea escribir. El valor contenido en el registro direccionado por *instruction.d[20:16]* (RY señales color azul en la figura) corresponde al dato que será escrito en esa posición de memoria; de esta forma se construyen los buses de datos y direcciones del

procesador. Como se dijo anteriormente el MICO32 direcciona con granularidad de byte, por esta razón en las instrucciones *sh* y *sw* se indica el valor escrito en las direcciones +1 y +1, +2 y +3 respectivamente; indicando el tamaño en bytes del tipo de dato escrito. Estas señales ingresan a un módulo llamado *load\_store\_unit* que se encarga de generar las señales correspondientes al bus *wishbone*, más adelante estudiaremos en detalle el funcionamiento de este bus.

En la figura 2.11, y 2.13 se muestran las formas de onda cuando se escribe un dato tipo char (0x44) a la dirección 0x400, el dato escrito en el bus es 0x44444444 para que el periférico pueda utilizar cualquiera de las cuatro partes del bus de datos *D\_DAT\_O[7:0]*, *D\_DAT\_O[15:8]*, *D\_DAT\_O[23:16]*, *D\_DAT\_O[31:24]*, algo similar ocurre en la escritura del tipo de dato *short* (con valor 0x2020) mostrado en la figura 2.12, aquí se repite el dato para poder utilizar dos partes del bus de datos *D\_DAT\_O[15:0]* y *D\_DAT\_O[31:16]*.

### Lectura

En la figura 2.15 se muestra el camino de datos asociado a las instrucciones *lb/lbu*, *lh/llu* y *lw*. La dirección de la cual se lea se calcula de forma similar al caso de la escritura; el valor contenido en el registro direccionado por *instruction\_d[25:21]* (RY señales color rojo en la figura). El dato leído por el módulo *load\_store\_unit* (señal morada en la figura) es almacenado en el registro cuya dirección está dada por *instruction\_d[20:16]*.

### Interrupciones

Existen dos formas de conocer si un periférico conectado al procesador requiere atención por parte del procesador; examinando de forma constante los registros de estado del periférico o utilizando interrupciones. La consulta constante de los registros de estado del periférico requiere incluir en el código una rutina que realice esta operación, la cual debe ser llamada de forma regular en el programa principal, la velocidad con que se realice esta consulta debe ser la adecuada para que no se pierdan eventos; debido a esto; uno de los problemas de esta técnica es que al aumentar el número de periféricos aumenta el tiempo entre consultas para un periférico, lo que aumenta la posibilidad de pérdida de eventos; adicionalmente, aumenta el tiempo dedicado a la consulta, lo que disminuye el tiempo disponible para ejecutar las tareas software en el procesador.

Las interrupciones modifican el flujo normal de ejecución del sistema y son originadas por señales dedicadas, lo que hace que su atención ocurra de forma inmediata. Cuando se presenta una interrupción, el valor del contador de programa toma un valor fijo que recibe el nombre de vector de interrupción, el valor del vector de interrupción está formado por (ver figura 2.16 señales de color rojo) una dirección base *EBA* (Exception Base Address) que por defecto es 0x00, un índice que indica la excepción que se presentó *eid\_x* (6 para la interrupción) y tres ceros; estos tres ceros hacen que el espacio entre vectores

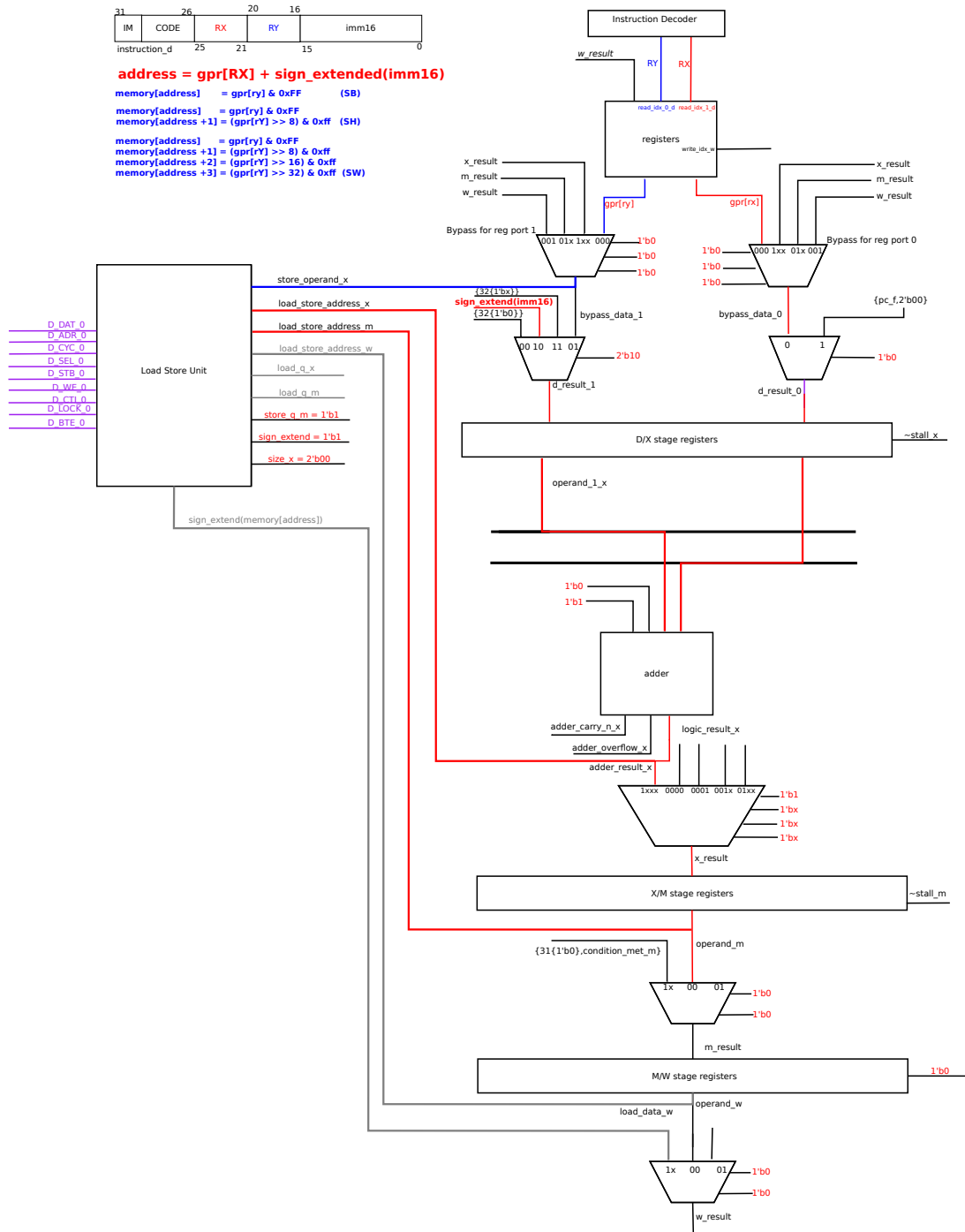


Figura 2.14: Camino de datos de las instrucciones de escritura a memoria

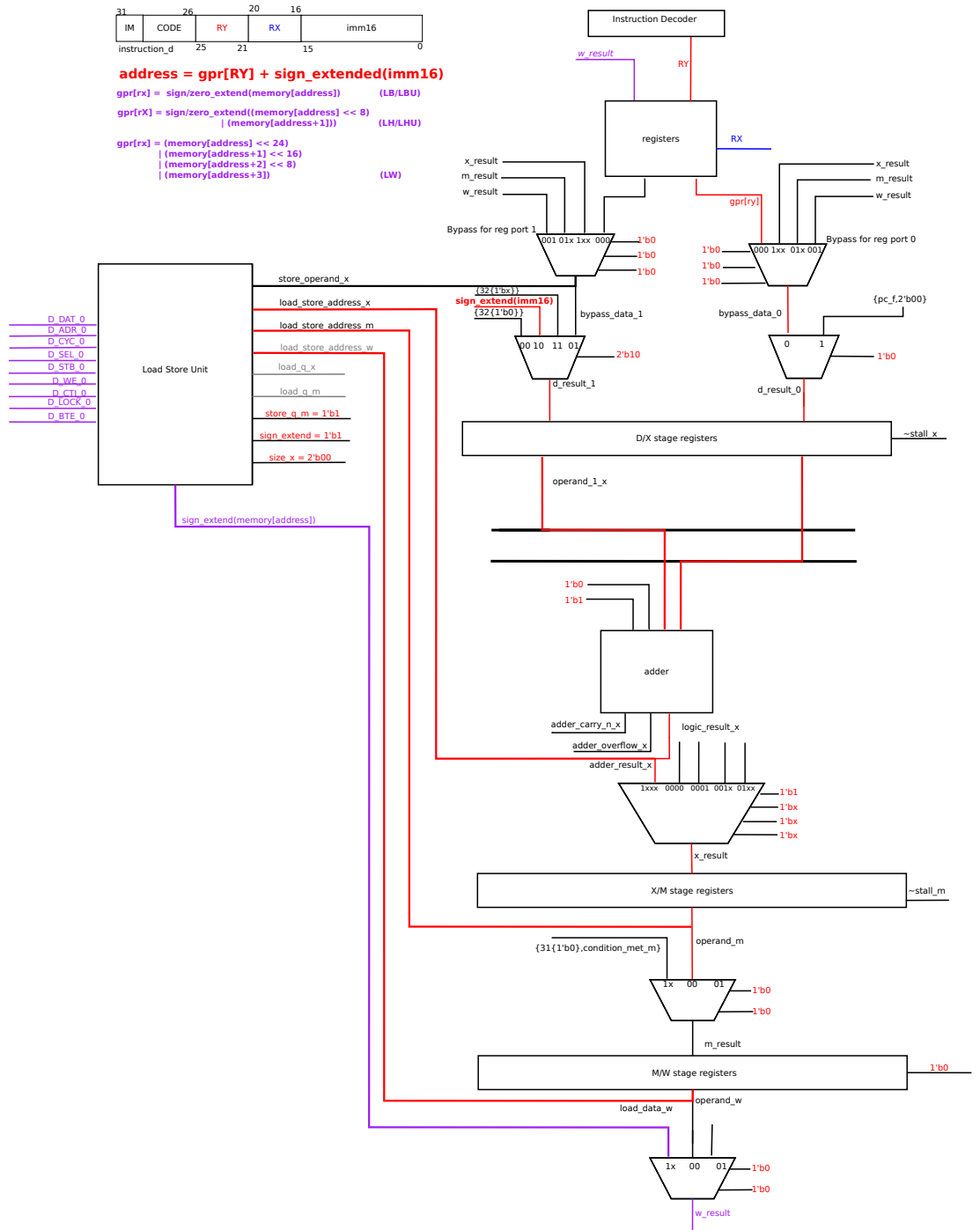


Figura 2.15: Camino de datos de las instrucciones de escritura a memoria

de excepción sea de 8 palabras de 32 bits, por lo que la rutina de atención a la interrupción debe tener máximo 8 instrucciones (esta rutina se explicará más adelante); para la interrupción el valor del vector es de *0x30*.

Como se puede observar en la figura 2.16 para que se genere una excepción (señales de color azul), se debe activar cualquiera de las señales *instruction\_bus\_error\_exception*, *system\_call\_exception\_exception*, *data\_bus\_error\_exception*, *divide\_by\_zero\_exception* o *interrupt\_exception*; lo que activará la señal *branch\_taken\_m* quien a su vez realiza el cambio en el contador de programa *pc.a*. Para que la señal *interrupt\_exception* se active es necesario: 1- habilitar la generación de interrupciones, es decir, que el flag *ie* (interrupt enable) está activo; 2- habilitar la generación de la interrupción deseada, para esto el bit correspondiente a la interrupción debe ser igual a 1 en la señal *im* (interrupt mask), lo que recibe el nombre de *enmascaramiento* y 3 - Que el periférico asociado a la interrupción realice una solicitud de atención activando su señal de interrupción, lo que origina una activación de la señal correspondiente en *ip* (interrupt pending).

Al activarse la señal *exception\_x* la variable que direcciona el registro a ser escrito en el banco de registros *write\_idx* toma el valor *30 decimal* (*ea* - exception address) y el valor a ser escrito (*w\_result*) será *pc.m*, *2'b00* (los saltos en el contador de programa es de a 4 bytes, debido a que las instrucciones son de 32 bits, por esta razón los dos bits menos significativos no son tomados en cuenta); lo que garantiza que al salir de la interrupción, el programa principal continuará donde se interrumpió.

### Rutina de atención a la interrupción

A continuación se lista la rutina que se ejecuta cada vez que se presenta una interrupción; como se dijo anteriormente, la dirección del vector de interrupción debe ser *0x48*, por lo que este código debe residir en la memoria de programa en dicha dirección.

```

48  sw      (sp+0), ra
49  calli   _save_all
50  rcsr    r1, IP
51  calli   irq_handler
52  mvhi    r1, 0xffff
53  ori     r1, r1, 0xffff
54  wcsr    IP, r1
55  bi      _restore_all_and_eret

```

En la línea 48 se almacena el valor del registro *ra* en la pila (la pila es una región de la memoria RAM que se utiliza para diferentes propósitos en la ejecución de un programa), esto se hace para que al salir de la rutina de atención a la interrupción el programa continúe de forma adecuada, de no hacer esto, si la interrupción se produjo cuando se estaba ejecutando una función el valor de retorno de la interrupción se modificaría.

En la línea 49 se hace un llamado a la función *save\_all*:

```

addi    sp, sp, -128
sw      (sp+4), r1

```

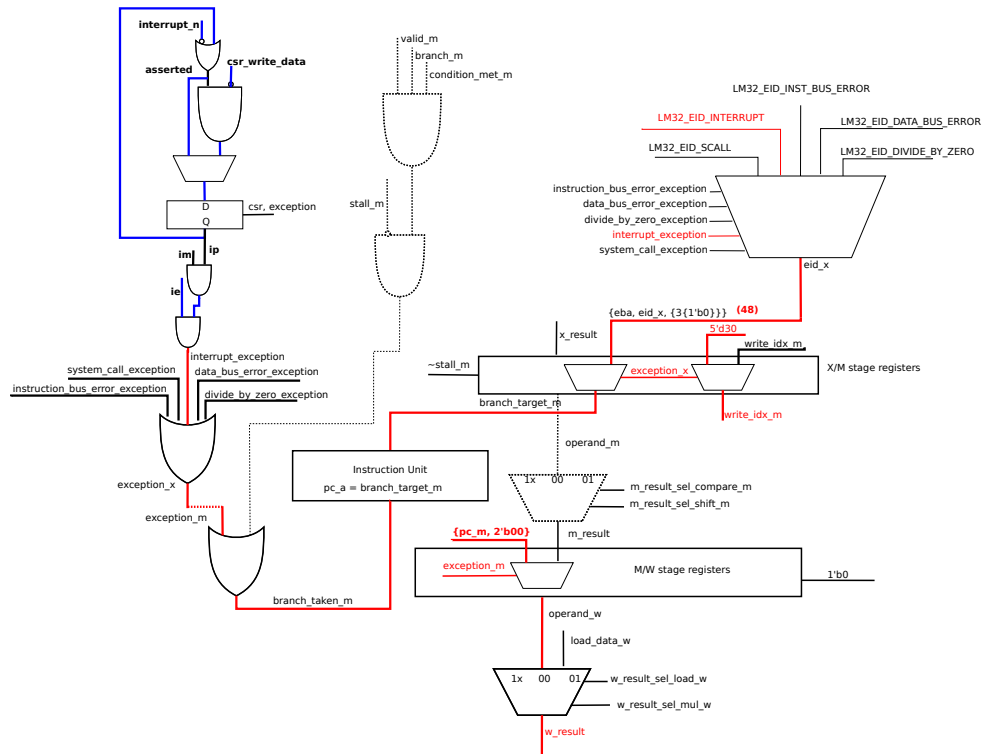


Figura 2.16: Camino de datos correspondiente a las generación de excepciones

```

...
sw      (sp+108), r27
#endif
sw      (sp+120), ea
sw      (sp+124), ba
/* ra and sp need special handling, as they have been modified */
lw      r1, (sp+128)
sw      (sp+116), r1
mv      r1, sp
addi    r1, r1, 128
sw      (sp+112), r1
ret

```

En esta función, toma una “fotografía” del estado del procesador en el instante en que se presenta la interrupción, almacenando el valor de todos los registros en la pila, esto se hace para garantizar que el estado del procesador antes y después de la interrupción sea el mismo.

En la línea 49 se almacena el valor de la señal *ip* (interrupt pending) en el registro *r1*, esto se hace para pasar parámetros a la función que será llamada en la línea 50. *irq\_handler* es la función que realizará las acciones corres-

pondientes a una determinada interrupción, esta función debe ser declarada en C en cualquier archivo que haga parte del código fuente de la aplicación (en los ejemplos del repositorio se declara en el archivo *soc-hw.c*) como: *void irq\_handler(uint32\_t pending)*.

En las líneas 51 - 53 se llena con unos la señal *IP*, lo que equivale a una restauración de esta señal, y puede verse como una forma de informarle al procesador que las interrupciones ya fueron atendidas. Finalmente en la línea 54 se hace un llamado a la función *restore\_all\_and\_eret*:

```
lw      r1, (sp+4)
...
lw      r27, (sp+108)
lw      ra, (sp+116)
lw      ea, (sp+120)
lw      ba, (sp+124)
/* Stack pointer must be restored last, in case it has been updated */
lw      sp, (sp+112)
eret
```

Esta función: restaura el valor de todos los registros del procesador, incluyendo los registros *ra*, *ea* y *ba*, el registro *ea* se almacena para asegurar el correcto funcionamiento ante el caso de excepciones anidadas; y ejecuta la instrucción *eret* la que hace que el contador de programa tome el valor almacenado en el registro *ea* con lo que el programa retorna a la siguiente instrucción del punto donde se generó la interrupción.

Como se mencionó anteriormente, para que la interrupción se presente es necesario habilitar las interrupciones globales y la máscara asociada al periférico. Para esto, el archivo *crt0ram.S* suministra las siguientes funciones:

```
irq_enable:
    mvi    r1, 1
    wcsr   IE, r1
    ret

irq_disable:
    mvi    r1, 0
    wcsr   IE, r1
    ret

irq_set_mask:
    wcsr   IM, r1
    ret
```

En este código se utiliza la instrucción *wcsr* y en la función de atención a la interrupción ya se había utilizado la instrucción *rcsr* (*rcsr r1, IP*); estas instrucciones realizan operaciones de escritura y lectura sobre los registros de estatus y control del procesador. En la figura 2.17 se muestra el camino de datos relacionado con estas intrucciones.

El camino de color rojo muestra la escritura utilizando la instrucción *wcsr*; *instruction.d[20:16]* contiene la dirección del registro a ser escrito en *csr*; y *instruction.d[25:21]* el registro de estatus y control a escribir.

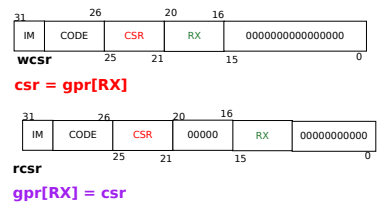


Figura 2.17: Camino de datos correspondiente al acceso de los registros asociados a las excepciones



La lectura de los registros de estado y control se muestra en color morado en la figura; de forma similar a la escritura *instruction\_d[25:21]* direcciona el registro a leer y *instruction\_d[15:11]* la dirección del registro que almacenará el valor leído.

### Retorno de función y de excepción

La figura 2.18 muestra el camino de datos asociado a las instrucciones de retorno de excepción y de función *eret* y *ret*; en estas instrucciones, el valor de la dirección del registro que va a ser almacenado en el contador de programa es fijo (*instruction\_d[25:21]*), siendo 30 para la instrucción *eret* y 29 para la instrucción *ret*. El valor contenido en estos registros pasa a la señal *branch\_target* y su valor será almacenado en el contador de programa retornando a la dirección siguiente a la que se produjo la excepción o el llamado a función.

En la Figura 2.19 se resume el proceso de atención a la interrupción. La solicitud de atención por parte de un periférico recibe el nombre de **IRQ** (interrupt request) y la rutina que atiende esta solicitud recibe el nombre de *ISR* (interrupt service routine)

## 2.4. Arquitectura del SoC LM32

En la figura 2.20 se muestra el flujo de diseño software y hardware que debe seguirse para realizar aplicaciones con el MICO32.

### Bus wishbone

#### Señales principales

- *ack\_o*: La activación de esta señal indica la terminación normal de un ciclo del bus.
- *addr\_i*: Bus de direcciones.
- *cyc\_i*: Esta señal se activa que un ciclo de bus válido se encuentra en progreso.
- *sel\_i*: Estas señales indican cuando se coloca un dato válido en el bus *dat\_i* durante un ciclo de escritura, y cuando deberían estar presentes en el bus *dat\_o* durante un ciclo de lectura. El número de señales depende de la granularidad del puerto. El LM32 maneja una granularidad de 8 bits sobre un bus de 32 bits, por lo tanto existen 4 señales para seleccionar el byte deseado (*sel\_i(3:0)*).
- *stb\_i*: Cuando se activa esta señal se indica al esclavo que ha sido seleccionado. Un esclavo wishbone debe responder a las otras señales únicamente cuando se activa esta señal. El esclavo debe activar la señal *ack\_o* como respuesta a la activación de *stb\_i*.

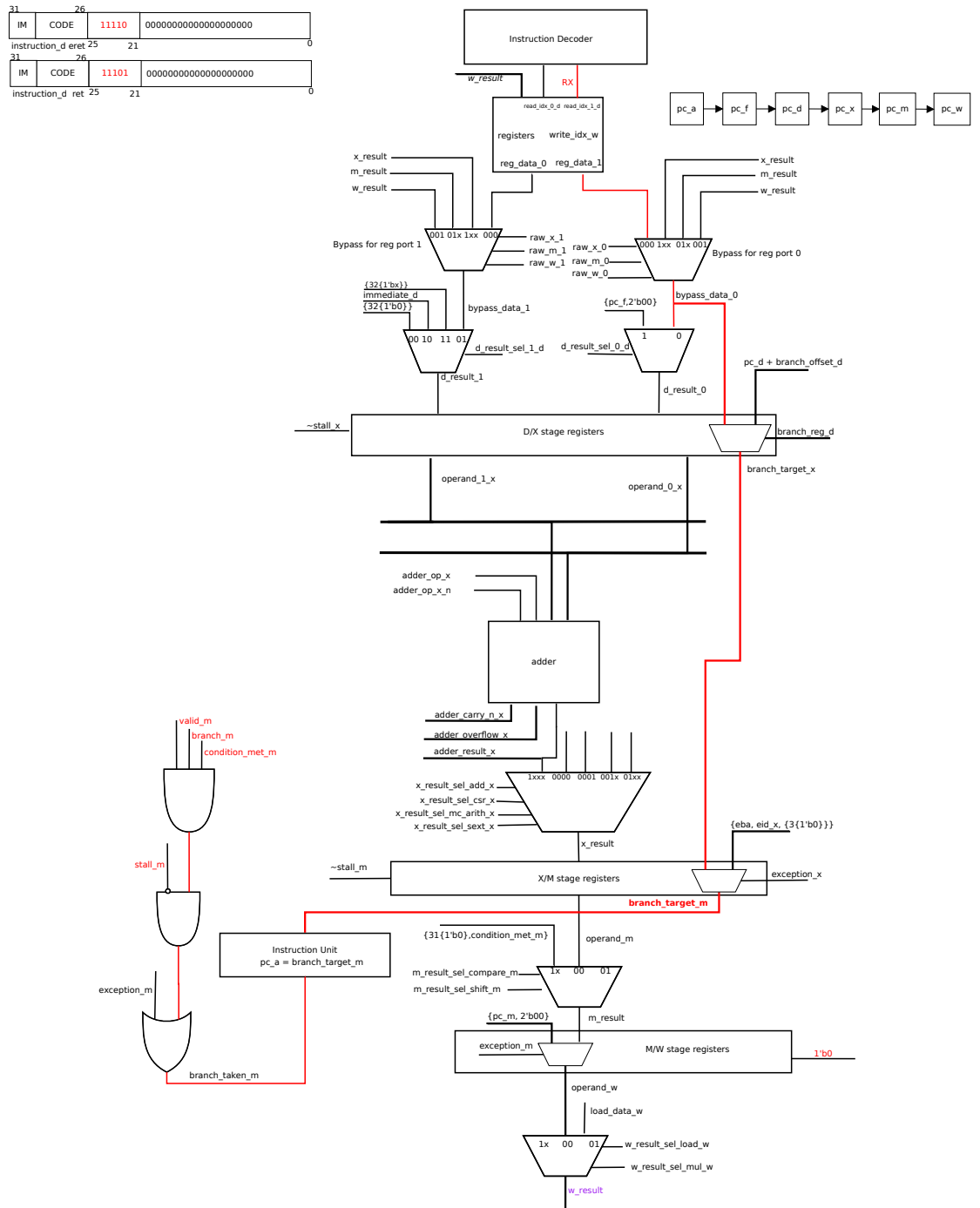


Figura 2.18: Camino de datos asociado al retorno de función y de excepción

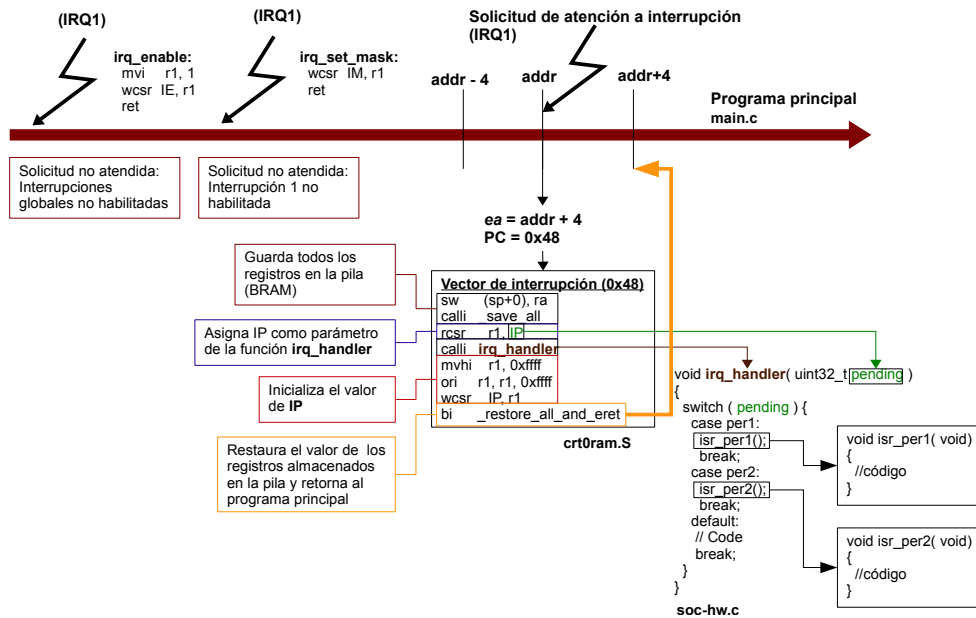


Figura 2.19: Flujo asociado a la atención de una interrupción

- *we\_i*: Esta señal indica la dirección del flujo de datos, en un ciclo de lectura tiene un nivel lógico bajo y en escritura tiene un nivel lógico alto.
- *dat\_i*: Bus de datos de entrada.
- *dat\_o*: Bus de datos de salida.

### Interface del bus wishbone

explicar como funciona el conmax, mostrar diagrama de flujo y simulación

### Comunicación con periféricos

Explicación de la UART y del TIMER globales interface en C.

#### Lectura

#### Escritura

#### Interfaz Software

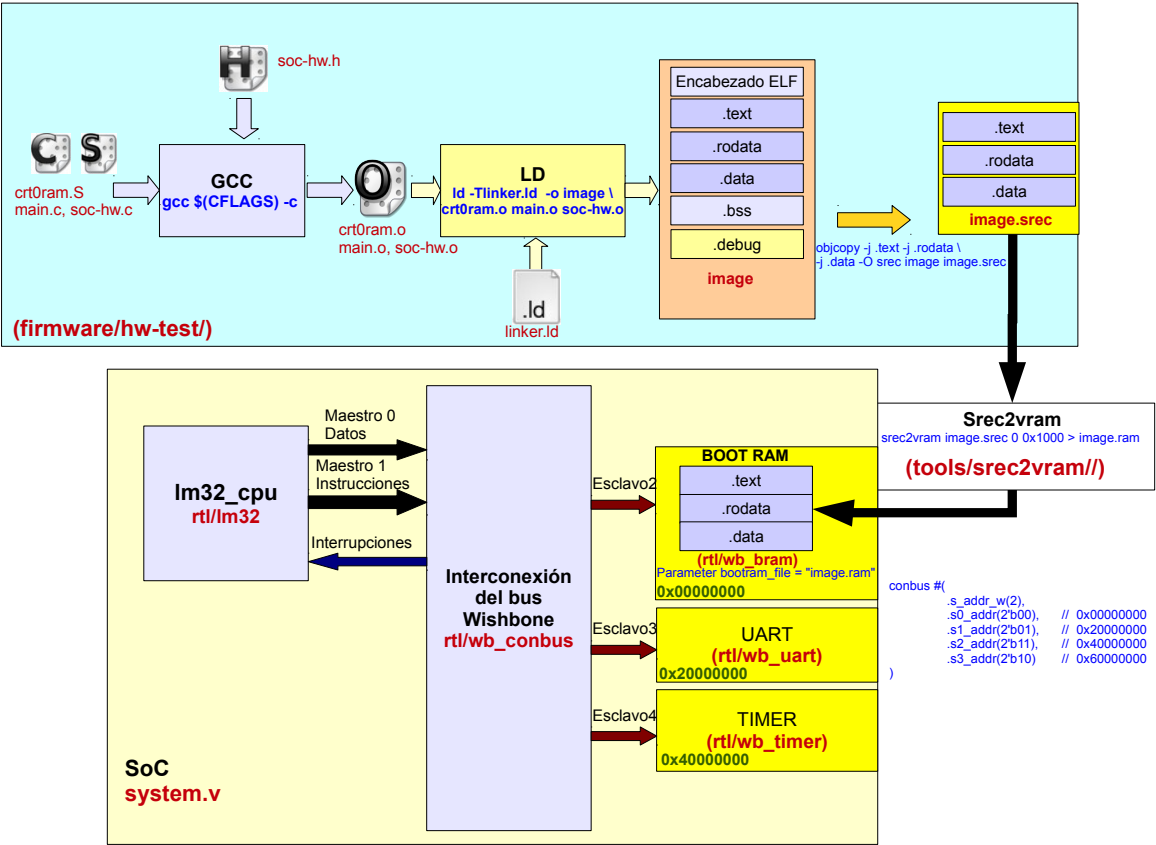


Figura 2.20: Flujo de diseño para el procesador LM32

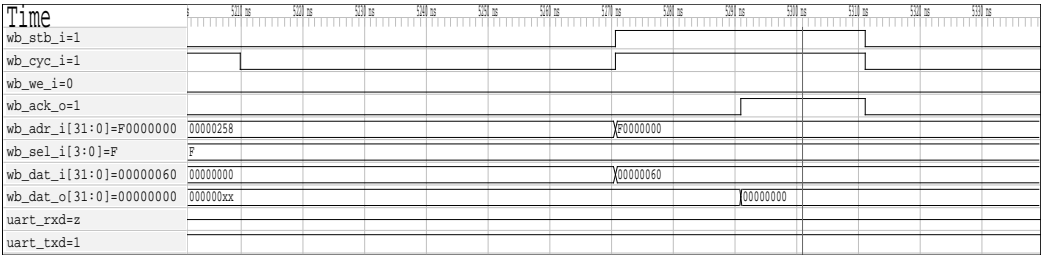


Figura 2.21: Ciclo de lectura del bus wishbone

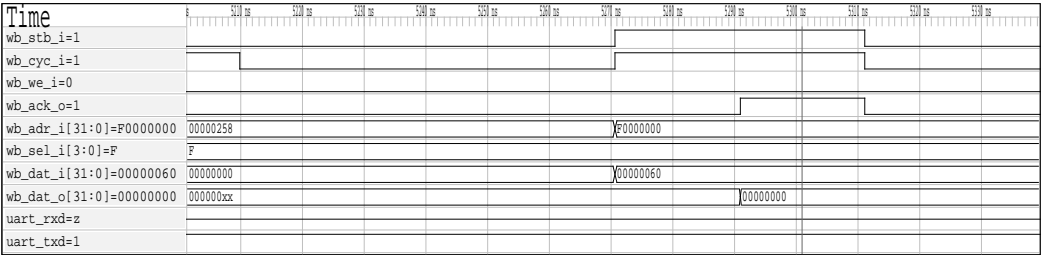


Figura 2.22: Ciclo de escritura del bus wishbone

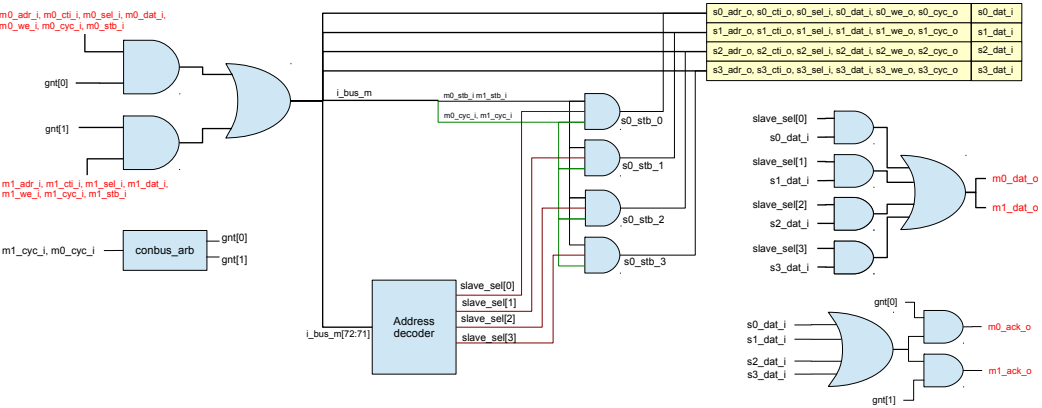


Figura 2.23: Circuito de interconexión del bus wishbone

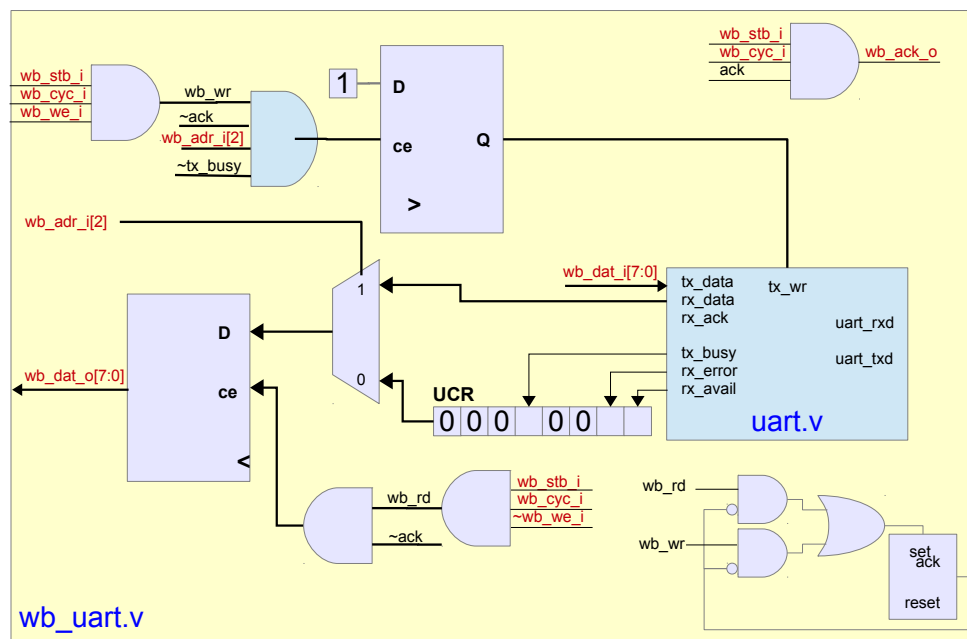


Figura 2.24: Ejemplo de periférico wishbone: UART

Figura 2.26: Circuito equivalente de lectura de la UART

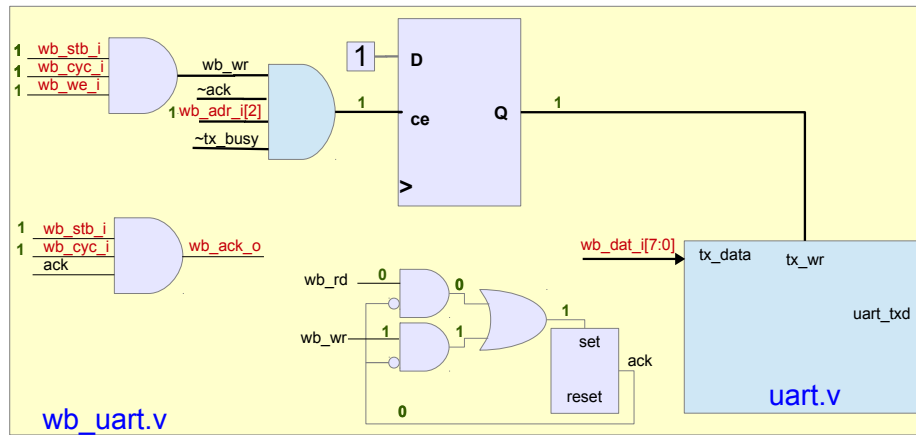


Figura 2.27: Circuito equivalente de escritura de la UART

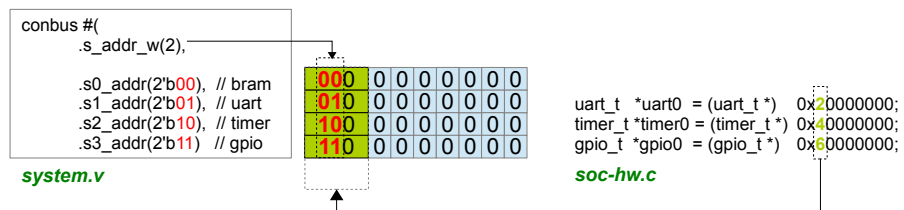


Figura 2.28: Asignación de la dirección de memoria a los periféricos



[illegible]

Figura 2.30: Definición de la dirección de los registros internos del TIMER



## 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.