

Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica

Diseño e Implementación de una Unidad de Punto Flotante FPU.

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Jeffry Ignacio Quirós Fallas

Borrador de 6 de marzo de 2016

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Jeffry Ignacio Quirós Fallas

Cartago, 6 de marzo de 2016

Céd: 1-1439-0476

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

Lic. Luis Carlos Rosales
Profesor Lector

Lic. Jose Alberto Díaz García
Profesor Lector

Dr. Alfonso Chacón Rodríguez
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 6 de marzo de 2016

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador
Acta de Evaluación

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Jeffry Ignacio Quiróa Fallas

Nombre del Proyecto: *Diseño e Implementación de una Unidad de Punto Flotante FPU*

Miembros del Tribunal

Lic. Luis Carlos Rosales
Profesor Lector

Lic. Jose Alberto Díaz García
Profesor Lector

Dr. Alfonso Chacón Rodríguez
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Nota final del Proyecto de Graduación: _____

Cartago, 6 de marzo de 2016

Resumen

El resumen es la síntesis de lo que aparecerá en el tesis. Tiene que ser lo suficientemente conciso y claro para que alguien que lo lea sepa qué esperar del resto de la tesis si la leyera completamente. Puede concluir con palabras clave, que son los temas principales tratados en el documento. El resumen queda fuera de la numeración del resto de secciones.

No se acostumbra utilizar referencias bibliográficas, tablas, o figuras en el resumen.

Palabras clave: CORDIC, seno, coseno, FPU

Abstract

The same as before, but in English.

Keywords: CORDIC, sine, cosine, FPU.

a mis queridos padres

Agradecimientos

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo del profesor Alfonso Chacón ni de Carlos Salazar, así como el apoyo incondicional de mis padres.

Jeffry Ignacio Quirós Fallas

Cartago, 6 de marzo de 2016

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Revisar	vii
1 Introducción	1
1.1 Objetivos y estructura del documento	2
2 Marco teórico	3
2.1 Estándar IEEE 754	3
2.1.1 Formato de representacion en punto flotante.	4
2.2 Algoritmo CORDIC para el cálculo de operaciones trigonométricas.	4
2.2.1 Redacción	4
2.2.2 Ecuaciones	5
2.2.3 Figuras	5
2.2.4 Referencias bibliográficas	7
2.2.5 Extensión	7
2.3 Sobre esta plantilla L ^A T _E X	8
2.3.1 Marcar asuntos pendientes	8
2.3.2 Índices	9
3 Solución propuesta	11
4 Resultados y análisis	13
5 Conclusiones	15
Bibliografía	17
A Demostración del teorema de Nyquist	19

Índice de figuras

2.1	Ejemplo de imagen ltxfig/psfrag	7
2.2	Ejemplo de imagen gnuplot/pstricks	7

Índice de tablas

Revisar

MAL.....	5
BIEN	5
resultado de chk.....	8
explain.....	8
La caja simple	8
Por hacer:.....	8

Capítulo 1

Introducción

En la *introducción* deben quedar completamente claros los siguientes aspectos, cuyo significado depende del tipo concreto de tesis:

- Contexto
- Problema
- Esbozo de solución
- Objetivos y estructura

El contexto corresponde al entorno donde se desarrolla el proyecto, que puede ser el área general de aplicación, un dominio de problemas, etc. El problema concreto se sintetiza usualmente en una frase o pregunta. Esta pregunta debería ser una consecuencia a la que se llega después de realizar el desarrollo del contexto. Del planteamiento del problema se deriva cuál es el objetivo del trabajo en particular, que a su vez debe conducir al lector de forma natural al esbozo de la solución del problema a tratar en la tesis. Generalmente para aclarar la solución se hace uso de un diagrama de bloques o diagrama de flujo general, es decir, desde un nivel de abstracción alto, donde no sea necesario entrar en detalles técnicos. Usualmente este diagrama y su breve explicación dictan cuál debe ser la estructura del resto del tesis, que es mencionada siempre al final de la introducción.

Una buena introducción debe lograr que el lector tenga interés de leer el resto del tesis.

Es recomendable dividir la tesis en secciones, nombradas cada una de acuerdo a su contenido. **Jamás** utilice los nombres de la guía como “*Problema existente e importancia de su solución*”, sino algo como “La deforestación en Costa Rica” o lo que se adecúe a su problema en particular.

Recuerde que en español solo la primera letra del título va en mayúscula (exceptuando nombres propios, por supuesto).

1.1 Objetivos y estructura del documento

Esta plantilla LaTeX tiene como objetivo simplificar la construcción del documento de tesis, presentando ejemplo de figuras y tablas, así como otorgar una plataforma de compilación en GNU/Linux que simplifique la administración de todo el documento.

La última sección de la introducción usualmente sí tiene un título estandar que es “Objetivos y estructura del documento”, donde se presentan *en prosa* los objetivos general y específicos que ha tenido el proyecto de graduación, así como la estructura de la tesis (por ejemplo, “en el siguiente capítulo se esbozan los fundamentos teóricos necesarios para explicar en el capítulo 3 la propuesta realizada...”)

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presentan los conceptos en los que se basa el sistema propuesto para la solución de operaciones trigonométricas, en el formato de representación estándar de números en coma flotante, IEEE 754-2008 [1], en concreto las operaciones seno y coseno. A continuación se brinda información acerca del formato de palabra para la representación binaria de números en punto flotante, ya sea en precisión simple o precisión doble, 32 y 64 bits respectivamente, así como para el manejo de la excepción de resultados *Not a Number*, *NaN*.

Se presenta además las bases teóricas de la rotación de vectores, fundamento teórico en el que se sustenta el algoritmo CORDIC, investigado e implementado para la resolución de las operaciones trigonométricas antes mencionadas.

2.1 Estándar IEEE 754

El estándar IEEE 754 especifica formatos y métodos para aritmética en punto flotante en sistemas computacionales, permitiendo obtener el mismo resultado, dado el mismo dato de entrada, sin importar si el proceso es llevado a cabo en hardware, software, o una combinación de ambos. Para lograr esto, los diseñadores del estándar utilizaron el método de notación científica, permitiendo representar un número factorizándolo en dos partes, la magnitud y la potencia.//

2.1.1 Formato de representacion en punto flotante.

2.2 Algoritmo CORDIC para el cálculo de operaciones trigonométricas.

El algoritmo de Computación Digital para Rotación de Coordenadas, CORDIC por sus siglas en inglés (**CO**ordinate **R**otation **D**igital **C**omputer), fue desarrollado especialmente para usarse en computadoras digitales en tiempo real, donde la mayoría de la computación involucraba la resolución de las relaciones trigonométricas de las ecuaciones de navegación y una alta tasa de exactitud para las relaciones trigonométricas de las transformaciones de coordenadas [3]. Este algoritmo fue originalmente propuesto por Jack Volder en el año 1959, con el propósito de calcular funciones trigonométricas mediante la rotación de vectores. La rotación de vectores es usada también para realizar la conversión de sistemas coordenados (polar a cartesiano y viceversa), y como parte de funciones matemáticas más complejas como lo son la Transformada Rápida de Fourier (FFT), y la transformada Coseno Discreta (DCT). [2]

2.2.1 Redacción

La *redacción* en todo el documento debe seguir un estilo científico objetivo. Esto implica que se redacta de modo impersonal, sin utilizar primeras personas del singular o del plural, y se evita el uso de cualquier tipo de calificativo, sustituyéndolos siempre por datos concretos, vinculados a referencias bibliográficas o datos experimentales. Los comparativos también deben concretarse a hechos y datos, y nunca dejarse “en el aire”. Por la naturaleza de la tesis, el tiempo verbal es usualmente presente, no perdiendo nunca de vista que se está explicando “cómo hacer algo”, en vez de “qué se hizo”.

Las *frases* deben ser cortas, y debe evitarse que el lector tenga que saltar constantemente entre partes de la tesis, lo que implica una exposición lineal clara, donde lo que se necesita ya ha sido explicado antes. Deben evitarse redundancias y por tanto cada concepto se exponen en un único lugar.

Todo aspecto circunstancial es irrelevante para la tesis, es decir, si se ha desarrollado en el laboratorio *X*, o en el curso *Y*, con el profesor *Z*, o en la empresa *W*, el nombre de funciones o clases en su código, etc., es información irrelevante para reproducir el experimento, y por lo tanto sobra. Numeración del documento

La primera página de la tesis es la correspondiente a la introducción, así que ésta debe ser la página 1. Desde la introducción, hasta antes de la bibliografía, las unidades son “Capítulos”. La bibliografía y anexos no se consideran capítulos, así que ya no continúan con la misma numeración de los capítulos (la paginación sí continua). Los índices, notación, glosario, etc. se numeran con números romanos en minúscula (i,ii,iii,iv,v,vi...) y antes del índice (portada, resúmenes, agradecimientos, hoja de evaluadores, etc.) las

páginas no llevan numeración.

Esta plantilla LaTeX ya se ocupa de todo lo anterior.

2.2.2 Ecuaciones

Para citar *ecuaciones* se utilizan paréntesis redondos, y no es necesario emplear la palabra “ecuación”. Por ejemplo “Introduciendo en (4.2) los resultados de (3.3) y (3.7) se obtiene ...”. La ecuación es parte del flujo de texto y no un objeto flotante, así que no pueden emplearse como figuras. Cuando se requiere la ecuación, allí se inserta.

Es incorrecto redactar de la siguiente forma:

↪ MAL

La operación del transistor sin tomar en cuenta el efecto Early está dada por (2.1), donde el parámetro κ está dado por (2.2).

$$I_{DS} = I_{n0} \frac{W}{L} e^{\kappa \frac{V_{GB}}{v_t}} \left[e^{-\frac{V_{SB}}{v_t}} - e^{-\frac{V_{DB}}{v_t}} \right] \quad (2.1)$$

$$\kappa = \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_{dep}} \quad (2.2)$$

Lo anterior es incorrecto porque obliga al lector a estar buscando ecuaciones, que pueden mostrarse directamente. La única referenciación permitida es hacia atrás.

La forma correcta de redactar lo anterior es:

✓ BIEN

La operación del transistor sin tomar en cuenta el efecto Early está dada por

$$I_{DS} = I_{n0} \frac{W}{L} e^{\kappa \frac{V_{GB}}{v_t}} \left[e^{-\frac{V_{SB}}{v_t}} - e^{-\frac{V_{DB}}{v_t}} \right] \quad (2.3)$$

donde el parámetro κ es

$$\kappa = \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_{dep}} \quad (2.4)$$

Así el flujo del texto guía al lector por las ecuaciones sin mayor esfuerzo.

Es recomendable numerar *todas* las ecuaciones, de modo que en la revisión del documento, o en futuras referencias a su documento de tesis todas las ecuaciones puedan ser citadas sin requerir describir textualmente a cuál ecuación se está haciendo referencia.

2.2.3 Figuras

Para el almacenamiento de imágenes existen dos tipos de formato: las imágenes raster y las imágenes vectoriales.

Imágenes raster

Las imágenes raster son representadas por una rejilla de píxeles, en donde cada píxel tiene un valor que representa al nivel de gris o el color. La discretización espacial es ineludible, y la única forma de obtener buena calidad es empleando tamaños grandes de la imagen que conduzcan a resoluciones de al menos 300 puntos por pulgada en la impresión, lo que conlleva a archivos de documentos de varios megabytes. Dentro de los formatos para almacenar imágenes raster existen algunos con pérdida (como el JPEG) que producen en imágenes sintéticas, como diagramas, estructuras ruidosas que dan una apariencia de baja calidad a las figuras. Otros formatos (como PNG, BMP, TIFF o GIF) no tiene pérdidas de información, pero los algoritmos de compresión no pueden reducir el tamaño de las imágenes con los mismos factores de reducción que los formatos con pérdidas. Este tipo de formatos debe utilizarse únicamente para fotografías o capturas de escenas reales con cámaras digitales.

Imágenes vectoriales

Las imágenes vectoriales **deben** ser empleadas en todo tipo de diagrama. En ellas no se almacenan píxeles, sino las estructuras geométricas que componen la figura como círculos (representado por posición de su centro y su radio), rectángulos (representados por sus esquinas), líneas, texto, etc. La mayoría de programas para elaborar este tipo de diagramas, como Inkscape, XFig, OpenOffice.org Draw, MS Visio, Adobe Illustrator, etc. proveen varios formatos vectoriales que pueden ser insertados tanto en LaTeX como en OpenOffice.org Writer (o MS Word). Los formatos más empleados son los llamados metafiles, que incluyen al WMF, EMF. En LaTeX se utiliza por lo general EPS. Recientemente se ha incrementado el soporte al formato SVG.

No debe cometerse el error de generar una imagen vectorial a partir de una imagen raster, pues una vez realizada la discretización espacial no es posible reconstruir los elementos geométricos que componen la imagen. Por ello, no tiene ningún sentido generar un archivo EPS o WMF a partir de una imagen ya almacenada en BMP, JPG, o PNG, pues lo único que ocurrirá es que se inserta la figura raster tal cual en la imagen vectorial, sin implicar ninguna ganancia en la calidad.

Esta plantilla de LaTeX administra la generación de ciertas figuras por usted. Puede colocar en el directorio `fig/` archivos EPS, JPG, PNG o GP (de GnuPlot) y el Makefile se encarga de hacer todas las conversiones necesarias. En las siguientes subsecciones se describen dos casos adicionales que resultan útiles para realizar figuras más complejas.

Figuras ltxfig/psfrag

Cuando en el subdirectorio `fig/` se encuentran dos archivos con el mismo nombre pero extensiones `ltxfig` y `psfrag`, por ejemplo `prueba.ltxfig` y `prueba.psfrag`, entonces el Makefile asume que usted desea crear una figura a partir del archivo `prueba.ltxfig`,

creado con el programa XFig, sustituyendo los textos ahí presentes con texto formateado con LaTeX.

La figura 2.1 ha sido creada con este esquema. Revise los archivos correspondientes en el directorio de figuras `fig/ltxfig.prototipo.*` para más detalles sobre su uso.

Figura 2.1: Ejemplo de imagen ltxfig/psfrag

Figuras pstricks

Los archivos con extensión `.pstricks` en el directorio `fig` se utilizan para generar cualquier tipo de imágenes según el código que se contenga. Es un concepto más general que el anterior. La figura 2.2 ha sido creada con este esquema. Puede revisar los archivos `prototipo_gnuplot*` como un ejemplo de su uso, en donde de un archivo `gnuplot` (`..gp`) se genera un archivo `..eps`, el cual es incluido en el archivo `.pstricks` sustituyendo cadenas de texto por código LaTeX.

Figura 2.2: Ejemplo de imagen gnuplot/pstricks

Entradas en el índice de figuras

El índice de figuras debe servir para encontrar rápidamente dónde se encuentra cierta figura. El pie de la figura, indicado en LaTeX con `\caption` puede ser extenso, en especial para indicar detalles de la figura, y es la entrada por defecto que aparecerá en el índice de figuras, la cual no debe superar la extensión de una línea y debe únicamente dar la idea del contenido de la figura para poder ser encontrada. Para lograr esto en LaTeX se utiliza

```
\caption[Texto en el índice]{Texto al pie de la figura}
```

2.2.4 Referencias bibliográficas

2.2.5 Extensión

Una tesis de licenciatura no debe sobrepasar las 120 páginas incluyendo apéndices y los formalismos desde portada hasta índices.

El cuerpo de la tesis (desde introducción hasta conclusiones) usualmente se extiende desde 45 páginas hasta no más de 80, dependiendo de la problemática tratada.

No es necesario reproducir contenidos de otras fuentes: agregue las referencias a dichas fuentes, y límitese a enunciar lo estrictamente necesario para comprender sus propuestas de solución.

2.3 Sobre esta plantilla L^AT_EX

Esta plantilla L^AT_EX pretende simplificar varios pasos en la creación del documento de tesis.

2.3.1 Marcar asuntos pendientes

La plantilla tiene dos “*modos*” de operación: normal y borrador (*draft*). En el archivo `main.tex` a partir de la línea 41 usted encuentra el código

```
%
% DRAFT MODE
%
\newboolean{draftmode}           % boolean used to control draft-mode
% Ensure that only one of the next two lines is active:
\setboolean{draftmode}{true}      % turn draft mode on
%\setboolean{draftmode}{false}    % turn draft mode off
```

Con el modo borrador, se activan ciertos comandos y funcionalidades útiles en el proceso de elaboración de la tesis, pero que deben ser desactivados al final, antes de entregar la tesis. Por ejemplo, se activa el pie de página que dice “*Borrador: fecha*”, y se activa el índice titulado “Revisar”. En dicho índice aparecen las páginas en donde se hayan utilizado alguno de los siguientes comandos:

- `\boxcomment{comentario}` Crea una caja en el margen de página con el comentario indicado.
- `\explain{comentario}` Crea una caja en el margen de página con el comentario indicado, con una flecha hacia la derecha para indicar qué en concreto debe ser revisado.
- `\chk{comentario}` Crea una caja en el margen con símbolo de “chequeado” y el comentario indicado.
- `\TODO{comentario}` Crea una caja grande de fondo sombreado con el comentario indicado.

✓ resultado
de chk

↪ explain

La caja
simple

En este párrafo se utilizan algunos de estos comandos para ilustrar su efecto. El `\chk` como puede observar tiene sentido usarlo para marcar que algo está casi listo. Por otro lado el comando `\explain` permite marcar algo que requiere ser revisado en redacción, valores, etc. El `\boxcomment` solo pone una marca al margen.

Por hacer:

Finalmente el comando `TODO` coloca esta caja gris.

Si usted desactiva el modo draft, desaparecen todas las páginas, y desaparece el índice “Revisar”. En éste índice aparecen todas las páginas en donde se utilizaron estos coman-

dos con los respectivos comentarios, lo que permite encontrar rápidamente detalles que usted indicó que debe revisar.

2.3.2 Índices

Como índice se conoce la lista de términos claves con su respectiva página, al final del documento. La plantilla ofrece varios comandos para simplificar el uso estandar del comando de \LaTeX `\index{termino}` que coloca al término indicado en el índice. Con `\nt[indice]{termino}` (*new term*) usted indica la entrada principal del término, que aparece en el texto en el índice, es decir, en el índice aparece lo que indique en vez de “índice” y en el texto aparece lo que indique “termino”; `\ot{termino}` agrega una entrada secundaria al término.

Capítulo 3

Solución propuesta

Primero que todo, jamás utilice el título indicado arriba, sino algo relacionado con su solución: “Sistema de corrección de distorsión” o lo que competa a su tesis en particular.

Este capítulo puede separarse en varias secciones, dependiendo del problema concreto. Aquí los algoritmos o el diseño del sistema deben quedar lo suficientemente claros para que otra persona pueda re-implementar al sistema propuesto. Sin embargo, el enfoque no debe nunca concentrarse en los detalles de la implementación particular realizada, sino del diseño conceptual como tal.

Recuerdese que toda figura y tabla deben estar referenciadas en el texto.

Capítulo 4

Resultados y análisis

En tesis formales en este capítulo se exponen los diseños experimentales realizados para comprobar el funcionamiento correcto del sistema. Por ejemplo, si se realiza algún sistema con reconocimiento de patrones, usualmente esta sección involucra las llamadas *matrices de confusión* donde se compactan las estadísticas de reconocimiento alcanzadas. En circuitos de hardware, experimentos para determinar variaciones contra ruido, etc. También pueden ilustrarse algunos resultados concretos como ejemplo del funcionamiento de los algoritmos. Puede mostrar por medio de experimentos ventajas, desventajas, desempeño de su algoritmo, o comparaciones con otros algoritmos.

Recuerde que debe minimizar los “saltos” que el lector deba hacer en su documento. Por tanto, usualmente el análisis se coloca junto a tablas y figuras presentadas, y debe tener un orden de tal modo que se observe cómo los objetivos específicos y el objetivo general del proyecto se han cumplido.

Capítulo 5

Conclusiones

Las conclusiones no son un resumen de lo realizado sino a lo que ha llevado el desarrollo del proyecto, no perdiendo de vista los objetivos planteados desde el principio y los resultados obtenidos. En otras palabras, qué se concluye o a qué se ha llegado después de realizado el proyecto de graduación. Un error común es “concluir” aspectos que no se desarrollaron en la tesis, como observaciones o afirmaciones derivadas de la teoría directamente. Esto último debe evitarse.

Es usual concluir con lo que queda por hacer, o sugerencias para mejorar los resultados.

Bibliografía

- [1] Ieee standard for floating-point arithmetic. *IEEE Std 754-2008*, pages 18–21, Aug 2008. 3
- [2] A. Oppenheim, A. Willsky, and S. H. Nawab. *Señales y Sistemas*. Prentice Hall, 2da edition, 1998. 4
- [3] J. E. Volder. The cordic trigonometric computing technique. *IRE Transactions on Electronic Computers*, EC-8(3):330–334, 1959. 4

Apéndice A

Demostración del teorema de Nyquist

El título anterior es solo un ejemplo ilustrativo. Éste teorema no ameritaría un apéndice pues es parte normal del currículum de Electrónica, pero apéndices usualmente involucran aspectos de esta índole, que se salen de la línea de la tesis, pero que es conveniente incluir por completitud.

Los anexos contienen toda información adicional que se considere pertinente agregar, como manuales de usuario, demostraciones matemáticas que se salen de la línea principal de la tesis, pero que pueden considerarse parte de los resultados del trabajo.

