

Internet Electronic Journal*

Nanociencia et Moletrónica

Diciembre 2009, Vol. 7, N°2, pp. 1355 -1368

Simulación del Circuito de la Transformada de Fourier basada en una Arquitectura DSP 6711

Víctor H. Téllez^{1,3}, Antonio Campero², Gonzalo I. Duchén³

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, ²Departamento de Química, DCBI,
Universidad Autónoma Metropolitana (Iztapalapa) , D.F. **México**

³SEPI ESIME Culhuacan
Instituto Politécnico Nacional, D.F. **México**
e-mail: vict@xanum.uam.mx

recibido: 16.10.09

revisado: 15.11.09

publicado: 31.12.09

Citation of the article;

Víctor H. Téllez, Antonio Campero, Gonzalo I. Simulación del Circuito de la Transformada de Fourier basada en una Arquitectura DSP 6711, Internet Electron J. Nanoc. Moletrón, 2009, Vol. 7, N°2, pp 1355-1368 .

Simulación del Circuito de la Transformada de Fourier basada en una Arquitectura DSP 6711

Víctor H. Téllez^{1,3}, Antonio Campero², Gonzalo I. Duchén³

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, ²Departamento de Química, DCBI,
Universidad Autónoma Metropolitana (Iztapalapa), D.F. **México**

³SEPI ESIME Culhuacán
Instituto Politécnico Nacional, D.F. **México**
e-mail: vict@xanum.uam.mx

recibido: 16.10.09

revisado: 15.11.09

publicado: 31.12.09

Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón., 2009, Vol. 7, N° 2, pp. 1355 - 1368

Resumen

En el presente trabajo se presenta una aproximación a la simulación de las computadoras cuánticas, usando una arquitectura DSP. La propuesta se basa en un simulador, donde la principal preocupación no es simplemente el resultado del algoritmo para una determinada entrada. En cambio, este simulador imita, tan cerca como sea posible, el comportamiento interno de una verdadera computadora cuántica. Para realizarla implementamos la transformada de Fourier cuántica, ya que se utiliza en el algoritmo de Shor, basado en circuitos cuánticos. Los resultados se dan comparando los resultados de nuestro sistema con la tradicional transformada rápida de Fourier.

Palabras clave: DSP, Transformada de Fourier, Computación cuántica, qubits, bra, kets.

1. Introducción

Los fundamentos de la computación moderna fueron establecidos por A. M. Turing en 1936, en su famoso artículo "On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem" [1]. Introdujo una definición matemática de una computadora programable, conocido ahora como máquina de Turing. Demostró la existencia de una máquina de Turing universal, capaz de simular cualquier máquina de Turing, y conjeturó que cualquier tarea que se pueda llevar a cabo sobre un dispositivo (por ejemplo una computadora moderna) también puede realizarse con una máquina de Turing. Este resultado, conocido como tesis de Church-Turing, estableció la base para el espectacular desarrollo de la computación.

Desde la aparición de las computadoras en los años '50, se han dedicado continuos esfuerzos para hacerlas, al mismo tiempo, más potentes y más pequeñas. El hardware se desarrolló rápidamente a partir del descubrimiento del transistor en 1947, desarrollado por John Bardeen, Walter Brattain y Will Shockley. El microprocesador se convirtió en una realidad a mediados de la década de los 70 con la introducción del circuito de integración a gran escala, y más tarde con el circuito de integración a mayor escala con varios miles de transistores interconectados soldados sobre un único sustrato de silicio. Esto marco el inicio de la carrera de la microminiaturización. Actualmente los transistores que conforman los chips de silicio son cada vez mas pequeños, habiéndose llegado a conseguir un tamaño 800 veces más pequeño que el grosor de un cabello humano (0.13 micras).

La conocida ley de Moore originalmente establecía que la potencia de las computadoras se duplica cada dos años, intervalo que posteriormente tuvo que reducirse a 18 meses (figura 1).

Al cabo de muchos años de evolución en ambos sentidos, el proceso de disminución del tamaño parece estar acercándose al límite en que la naturaleza cuántica de los componentes de la computadora comienza a manifestarse. Este hecho, que implica un entorpecimiento en el desarrollo de la computación clásica, también abre las puertas a nuevas posibilidades en la construcción de computadoras que incorporen en su funcionamiento las propiedades cuánticas en cuestión.

La velocidad y el tamaño de los microprocesadores están íntimamente relacionadas, ya que cuanto mas pequeños sean los transistores, menor será la distancia que debe recorrer la señal eléctrica pudiéndose hacer más rápidos. Al ser los transistores cada vez más pequeños, la cantidad de ellos contenidos en un microprocesador y por consiguiente su velocidad, se ha venido duplicando cada dos años. Diversos estudios revelan que este ritmo no se puede mantener, y que el límite será alcanzado tarde o temprano, ya que si se sigue reduciendo el tamaño de estos, las interferencias de un transistor provocarían fallos en los transistores adyacentes.

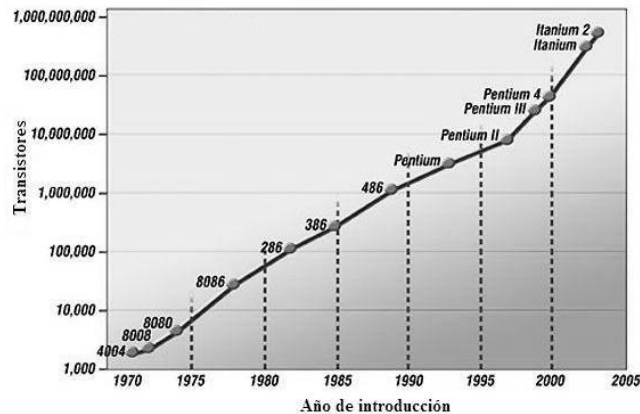


Figura 1 Ley de Moore para capacidad de procesadores

La ley de Moore se ha cumplido aproximadamente desde el 15 de Diciembre de 1967. Sin embargo muchos investigadores esperan que esto no sea así en las primeras décadas del siglo XXI. Los efectos cuánticos empiezan a dificultar el funcionamiento de los dispositivos electrónicos a medida que se miniaturizan. Una posible solución al eventual fallo de la ley de Moore consiste en modificar el modelo de computación y una alternativa posible es el modelo cuántico de computación.

A lo largo de los últimos años ha aumentado la densidad de los circuitos electrónicos sin cesar, gracias a la disminución en el tamaño de los componentes, alcanzándose

La Mecánica Cuántica crea un marco en el que se desarrollan diversas ramas de la física [2,3]. Una de las más recientes es la Computación Cuántica, que nace a partir de notar las diferencias entre el tratamiento de información clásico y cuántico [4,5]. El estudio, entendimiento y aplicación del entrelazamiento cuántico y el principio de superposición, proporcionarían un incremento exponencial en la velocidad de cómputo solucionando muchos problemas totalmente inalcanzables mediante computación clásica. Se diseñaron puertas lógicas cuánticas que permitieron el desarrollo de algoritmos que aprovecharan las ventajas de este nuevo modelo [6,7]. En los últimos años, se han realizado implementaciones experimentales de estas puertas, y si bien aún está por decidir muchas cuestiones acerca de cuales son los mejores materiales y formas de implementarlas de forma general, son un paso adelante en el camino de la construcción de una computadora cuántica.

2. Método

La transformada de Fourier cuántica es similar a la transformada de Fourier discreta. Se utiliza para transformar problemas difíciles en otros de fácil resolución. Hoy en día es una de las bases para los algoritmos cuánticos tales como estimación de fase, búsqueda de orden y factorización [8,9].

La transformada de Fourier se puede representar con el siguiente circuito:

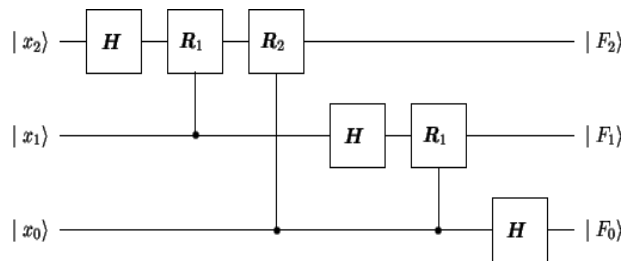


Figura 2. Circuito de la implementación de la transformada de Fourier. Luego de aplicar el circuito, se invierte el orden de importancia de los qubits.

El algoritmo de procesamiento, se basa en la transformada cuántica de Fourier, como una operación unitaria de 'n' qubits tal como se ve en la ecuación 1

$$F : |x\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{y=0}^{2^n-1} e^{2\pi i xy / 2^n} |y\rangle \quad (1)$$

donde x y es un multiplicación decimal normal de los números "x" y "y", que son representados por los registros cuánticos de la ecuación 1

$$|y\rangle = |y_{n-1}\rangle \otimes |y_{n-2}\rangle \otimes \dots \otimes |y_0\rangle \quad (2)$$

donde $|x_k\rangle$ y $|y_k\rangle$ son qubits individuales.

Comparando lo anterior con la notación de la sección acerca de Simon Oracle, donde $x \bullet y = x_0 \bullet y_0 + 2x_1 \bullet y_1 + 2x_2 \bullet y_2 + \dots + 2x_{n-1} \bullet y_{n-1}$

Entonces se tratan "x" y "y" como arreglos de qubits en lugar de números enteros. Desde luego, al tratar computacionalmente un simple número entero, se implementa un arreglo de qubits, pero el punto es como interpretar este arreglo, y si xy en la fórmula de Fourier es la misma que en la fórmula de Simon Oracle. El primero es una operación entera de dos números escalares y la segunda es una operación binaria de dos vectores.

Se observa que una vez que se conoce que F es la base del vector $|x\rangle$, se puede tomar a F como cualquier otro vector. Este otro vector puede ser $\sum_{x=0}^{\infty} f(x)|x\rangle$, que rinde a la siguiente fórmula para la transformada de Fourier cuántica de la función F.

$$F\left(\sum_{x=0}^{N-1} f(x)|x\rangle\right) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x)F(|x\rangle) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \sum_{y=0}^{N-1} e^{2\pi i xy / N} |y\rangle \quad (3)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{2\pi i xy / N} |y\rangle \quad (4)$$

De esta fórmula, el y^{th} componente de F es:

$$F_y(f) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{2\pi i xy / N} \quad (5)$$

que se parece a la transformada discreta de Fourier.

La implementación del circuito de la transformada de fourier cuántica se basa en los siguientes desarrollos:

$$F : |x\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{y=0}^{2^n-1} e^{2\pi i xy / 2^n} |y\rangle \quad (6)$$

La expresión $e^{2\pi i xy / 2^n}$ de la ecuación 6 es continua en el tiempo, y su periodo es 2^n . En la FFT solo se usan los términos $e^{2\pi i xy / 2^n}$ que corresponden al primer ciclo i.e. los términos para que $xy/2^n < 1$. Evaluando a x y $y / 2^n < 1$ mientras trunca precisamente este va al Segundo y tercer circulo.

$$\frac{xy}{2^n} \equiv \frac{1}{2^n} (x_0 + x_1 2 + x_2 2^2 + x_3 2^3 + \dots + x_{n-1} 2^{n-1}) (y_0 + y_1 2 + y_2 2^2 + y_3 2^3 + \dots + y_{n-1} 2^{n-1}) = \dots \quad (7)$$

Descomponiendo a "x" y "y" en sus componentes binarios de la ecuación 7, de tal manera que cada termino de x_k y y_k pertenece a 0 o 1.

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2^n} (y_0 (x_0 + x_1 2 + x_2 2^2 + \dots + x_{n-1} 2^{n-1}) + y_1 2^1 (x_0 + x_1 2 + x_2 2^2 + \dots + x_{n-1} 2^{n-1}) + \dots \\ &\quad \dots + y_{n-1} 2^{n-1} (x_0 + x_1 2 + x_2 2^2 + \dots + x_{n-1} 2^{n-1})) \\ &= \frac{1}{2^n} (y_0 (x_0 + x_1 2 + x_2 2^2 + \dots + x_{n-1} 2^{n-1}) + \\ &\quad y_1 (x_0 2 + x_1 2^2 + x_2 2^3 + \dots + x_{n-2} 2^{n-1}) + \\ &\quad + y_2 (x_0 2^2 + x_1 2^3 + x_2 2^4 + \dots + x_{n-3} 2^{n-1}) + \dots + y_{n-1} x_0 2^{n-1}) \\ &= y_0 \left(\frac{x_0}{2^n} + \frac{x_1}{2^{n-1}} + \frac{x_2}{2^{n-2}} + \dots + \frac{x_{n-1}}{2} \right) + y_1 \left(\frac{x_0}{2^{n-1}} + \frac{x_1}{2^{n-2}} + \frac{x_2}{2^{n-3}} + \dots + \frac{x_{n-2}}{2} \right) + y_2 \left(\frac{x_0}{2^{n-2}} + \frac{x_1}{2^{n-3}} + \frac{x_2}{2^{n-4}} + \dots + \frac{x_{n-3}}{2} \right) + \dots + y_{n-1} \frac{x_0}{2} = \dots \quad (8) \end{aligned}$$

Existe una notación especial que cubre la suma de brakets.

$$\frac{x_0}{2} \rightarrow (x_0), \frac{x_0}{2} + \frac{x_1}{2} \rightarrow (x_0 x_1), \frac{x_0}{2^3} + \frac{x_1}{2^2} + \frac{x_2}{2} \rightarrow (x_0 x_1 x_2) \dots \quad (9)$$

Usando esta notación:

$$\begin{aligned} \frac{xy}{2^n} &\equiv y_0 (x_0 x_1 \dots x_{n-1}) + y_1 (x_0 x_1 \dots x_{n-2}) + \\ &\quad y_2 (x_0 x_1 \dots x_{n-3}) + \dots + y_{n-1} (x_0) \end{aligned} \quad (10)$$

Escribiendo la transformada de fourier cuántica utilizando las ecuaciones 9 y 10, se obtiene la ecuación 11.

$$\begin{aligned}
 F|x\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{y=0}^{2^n-1} e^{2\pi i xy/2^n} |y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{y=0}^{2^n-1} e^{2\pi i (y_0(x_0x_1\dots x_{n-1})+\dots+y_{n-1}(x_0))} |y\rangle \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{y=0}^{2^n-1} e^{2\pi i y_0(x_0x_1\dots x_{n-1})} |y_0\rangle \otimes e \otimes \dots \otimes e^{2\pi i y_{n-1}(x_0)} |y_{n-1}\rangle
 \end{aligned} \tag{11}$$

Observando que y_k esta dentro de 0 o 1, suponiendo que es 0

$$e^{2\pi i 0(x_0x_1\dots x_{n-3})} |0\rangle = |0\rangle \tag{12}$$

Si es 1, entonces corresponde a los términos siguientes:

$$e^{2\pi i 1(x_0x_1\dots x_{n-3})} |1\rangle = |1\rangle \tag{13}$$

La suma sobre todos los posibles valores de “y” asigna en las ecuaciones 11 y 12, eventualmente ambos estados (0,1) a cada y_k , entonces la superposición es equivalente a:

$$\begin{aligned}
 F|x\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{2\pi i (x_0x_1\dots x_{n-1})} |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{2\pi i (x_0x_1\dots x_2)} |1\rangle) \otimes \dots \\
 &\otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{2\pi i (x_0)} |1\rangle)
 \end{aligned} \tag{14}$$

Estos puntos implementan el circuito de la QFT de la figura 2. Aquí, H es el operador de Haddamard y R_d es una compuerta definida por:

$$R_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2^d} \end{pmatrix} \tag{15}$$

donde d es la distancia entre las líneas. Analizando este circuito paso a paso: a la salida de la primera compuerta Hadamard, las líneas de arriba se convierten en la ecuación 16.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{y=0}^1 (-1)^{x_2 y} |y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{y=0}^1 e^{2\pi i x_2 y/2} \tag{16}$$

El Segundo paso aplica R_1 a la línea de arriba bajo el control de la línea media. Observe que R_1 no hace nada a $|0\rangle$ y una fase de cambios de $|1\rangle$. El factor de la fase de cambios es $e^{i\pi/2}$ si la línea de control $|x_1\rangle$ es $|1\rangle$ y no existe una fase de cambios si $|x_1\rangle = |0\rangle$. Entonces podemos escribir que la fase de cambios infligida por R_1 sobre $|1\rangle$ es siempre $e^{i\pi x/2}$ donde x es la señal de control. Aplicando esto a los estados sobre las líneas superiores y medias.

$$\begin{aligned}
 R_1|x_1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{2\pi i (x_2)} |1\rangle) &= |x_1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{2\pi i (x_2)} e^{i\pi x_1/2} |1\rangle) \\
 &= |x_1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{2\pi i (x_2/2+x_1/4)} |1\rangle) = |x_1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{2\pi i (x_1x_2)} |1\rangle)
 \end{aligned} \tag{17}$$

La tercera compuerta trabaja R_2 a la línea superior, pero este tiempo esta bajo el control de la línea inferior. Este operador, otra vez, no hace nada a $|0\rangle$, pero puede permitir cambio de fase $|1\rangle$ sumándole $e^{i\pi x_0/4}$ tal que el estado de todo el sistema se convierte en:

$$\begin{aligned} R_2|x_0\rangle \otimes |x_1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_1x_2)}|1\rangle) &= \\ = |x_0\rangle \otimes |x_1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_1x_2)}e^{i\pi x_0/4}|1\rangle) & \\ = |x_0\rangle \otimes |x_1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_0/8+x_1/4+x_2/2)}|1\rangle) &= \\ = |x_0\rangle \otimes |x_1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_0x_1x_2)}|1\rangle) & \end{aligned} \quad (18)$$

Razonando como se hizo anteriormente, se pueden ver inmediatamente que las siguientes dos compuertas aplicadas a $|1\rangle$ se convertirán en $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_0x_1)}|1\rangle)$, tal que el estado del sistema es:

$$|x_0\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_0x_1)}|1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{e\pi i(x_0x_1x_2)}|1\rangle) \quad (19)$$

Finalmente la transformación Hadamard, en la línea superior convierte $|x_0\rangle$ a $|0\rangle + e^{2\pi i(x_0)}|1\rangle/\sqrt{2}$, tal que el efecto del estado final del sistema es:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_0)}|1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_0x_1)}|1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{2\pi i(x_0x_1x_2)}|1\rangle) \quad (20)$$

Pero esta es una QFT de 3 puntos, tal que el circuito mostrado es un circuito de la QFT

3. Resultados

Se realizó la implementación y operación de algoritmos cuánticos en un sistema clásico de procesamiento digital de señales, utilizando a la ecuación 6 con 3 qubits implementados en la ecuación 17 y 18, con el fin de verificar el comportamiento en el tiempo de diferentes sistemas cuánticos, desde un qubit hasta circuitos cuánticos. Los resultados indican el comportamiento de la matriz de densidad en términos probabilísticos. Para validar la confiabilidad de estos resultados, se compara el procesamiento de 256 datos en una DFT y QFT.

El código de la simulación de los circuitos cuánticos fue desarrollado con el paquete computacional CCS (Code Composer Studio), usando un compilador de MATLAB para el procesador digital de señales DSP 6711 de Motorola. Primero se cargó el programa fuente, y se realizó la compilación utilizando el MATLAB. En un segundo paso, el código generado en el lenguaje del DSP 6711 se transfirió a la PC.

En un primer paso, se realizaron los procedimientos de simulación en las operaciones básicas de los Qubits, para después realizar procesos de transformaciones

y crear las compuertas cuánticas utilizadas [10], y con estas últimas realizar los circuitos cuánticos. El tiempo del proceso de simulación puede variar dependiendo del tipo de operación a realizar. Los resultados entregados por el DSP se transfirieron a la PC (vía ambiente CCS) para su análisis.

A continuación se presenta la simulación de la Transformada de Fourier Cuántica (QFT) utilizando 256 datos de 8 bits de longitud, los cuales fueron introducidos al DSP. Los resultados de las transformaciones se presentan en las tablas 1 y 2. En estas tablas, n representa el número de datos y Q la precisión.

Se pueden observar los resultados comparando al simulador del circuito cuántico de Fourier con una transformada rápida de Fourier (FFT) desarrollada en un software comercial (MATLAB). Los límites de la simulación nos permiten elegir el número de datos (N) a una precisión (Q) determinada. Sin embargo al escoger L y M en enteros impares podría ser inapropiado. Por ejemplo, la siguiente tabla nos muestra, para diferentes combinaciones de N y Q

Tabla 1, Valores para el simulador del circuito de la QFT

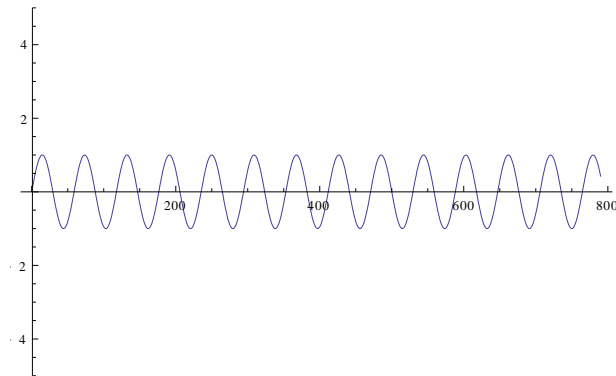
q	N=13	N=25	N=51	N=101	N=251	N=501
.001	45,45,28	47,47,28	48,48,29	50,50,29	52,52,30	53,53,30
.01	36,35,21	37,37,22	38,38,23	40,40,23	42,42,23	43,43,24
.05	29,28,17	30,30,17	31,31,18	33,33,18	35,35,19	36,36,19
.10	26,25,15	27,27,15	28,28,16	30,30,16	32,32,17	33,33,17
.20	23,22,13	24,24,13	25,25,14	27,27,14	29,29,15	30,30,15
.30	21,20,12	22,22,12	24,24,12	25,25,13	27,27,13	29,28,14
.40	20,19,11	21,21,11	22,22,12	24,24,12	26,26,13	27,27,13

Tabla 2, Valores para la clásica FFT

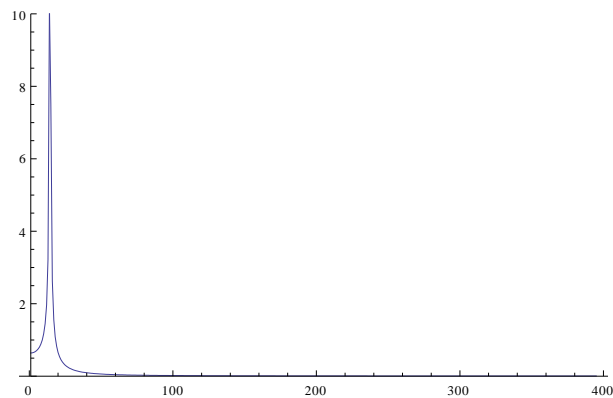
q	N=13	N=25	N=51	N=101	N=251	N=501
.001	43,43,27	46,46,27	48,49,30	54,51,28	51,532,31	52,52,29
.01	35,34,22	36,36,23	39,39,22	41,41,22	41,41,22	42,42,23
.05	30,29,19	31,31,16	32,32,19	34,34,19	34,33,19	38,39,16
.10	25,25,16	26,26,15	27,28,15	31,32,15	31,31,15	32,32,16
.20	23,21,13	25,24,14	26,24,15	26,26,14	30,30,16	31,32,16
.30	20,20,11	22,21,10	26,25,13	27,26,14	28,26,12	28,27,16
.40	21,14,16	23,27,12	23,24,14	25,23,13	27,28,14	26,28,12

Para comprobar el comportamiento de las simulaciones anteriores, se utilizó la FFT y se comparó con la QFT. Se generaron varias señales conocidas (onda senoidal)

a las cuales posteriormente se aplicó la FFT y la QFT, y se compararon. Los resultados se muestran a continuación en las figuras 3, 4 y 5.



a) Señal senoidal original a 200 datos de 8 bits.

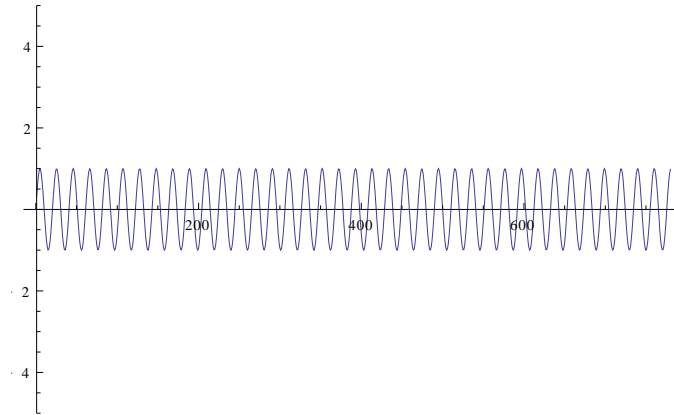


b) Transformada de FFT clásica aplicada a la señal original.

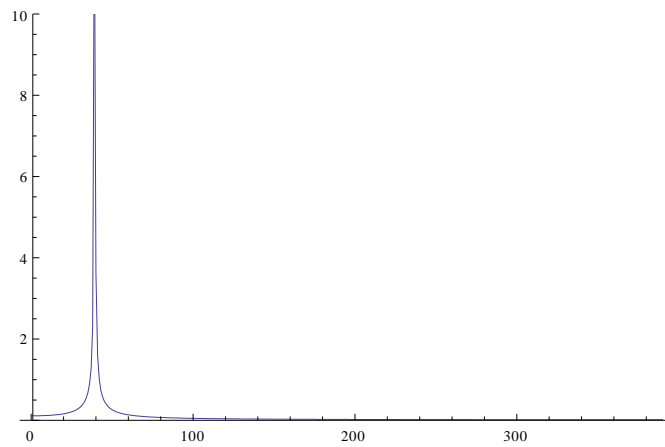


c) Transformada de QFT aplicada a la señal original.

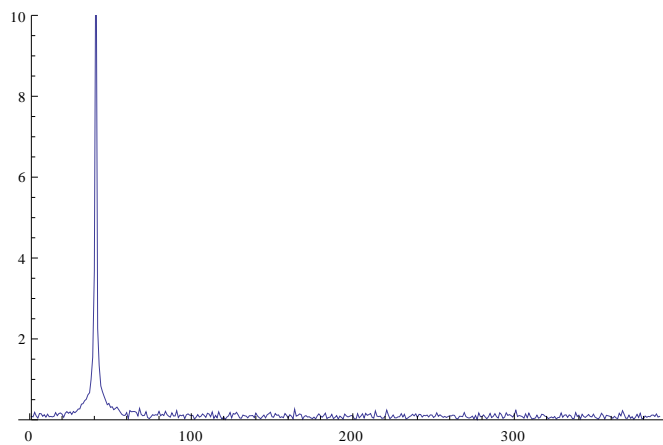
Figura 3 Transformadas FFT y QFT aplicadas a una señal senoidal de 500 kHz



a) Señal senoidal original a 200 datos de 8 bits.

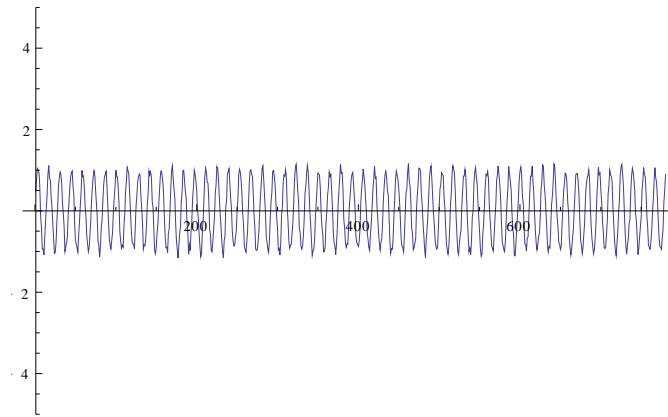


b) Transformada de FFT clásica aplicada a la señal original.

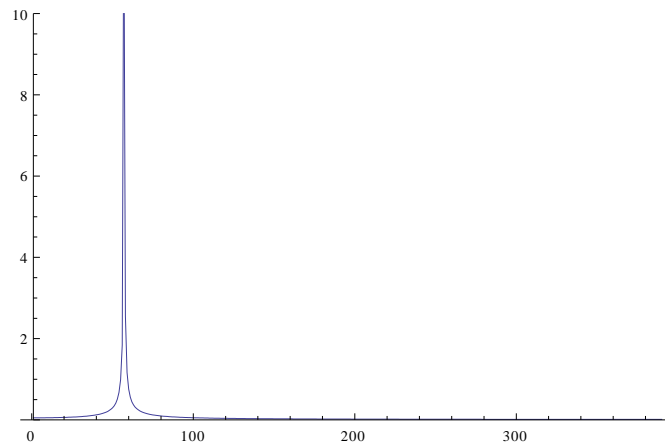


c) Transformada de QFT aplicada a la señal original.

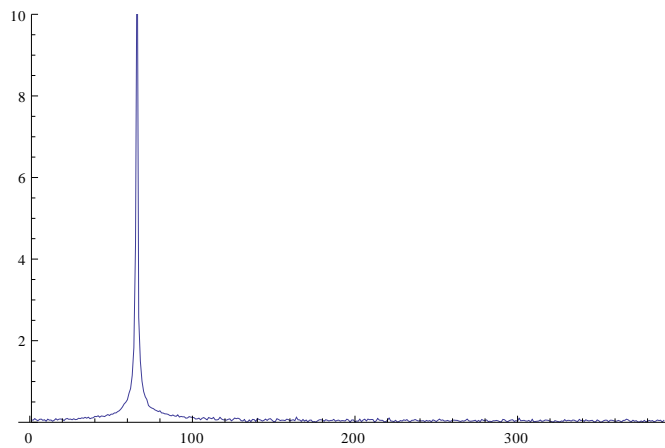
Figura 4. Transformadas FFT y QFT aplicadas a una señal senoidal de 2.5 MHz



a) Señal senoidal original a 200 datos de 8 bits.



b) Transformada de FFT clásica aplicada a la señal original.



c) Transformada de QFT aplicada a la señal original.

Figura 5. Transformadas FFT y QFT aplicadas a una señal senoidal de 9 MHz

Se observa que los dos métodos entregan resultados similares, lo que implica que nuestra metodología es fiable.

4. Discusión y conclusiones

Las computadoras actuales están llegando al límite de la miniaturización y la frecuencia de pulsaciones de los relojes de cuarzo, pronto no podrán ser más rápidos. La computación cuántica es una gran promesa que podría permitirnos seguir construyendo computadoras más veloces. La arquitectura cuántica es muy similar a las arquitecturas actuales, sin embargo la computación cuántica introduce elementos arquitecturales cuánticos que obedecen a los fenómenos causados por la interacción cuántica como la corrección de errores. En este trabajo se realizó la implementación de dispositivos basados en qubits, utilizando un procesador digital de señales clásico (DSP6711), con el fin de simular compuertas y circuitos cuánticos para la solución de problemas que requieren el uso de una computadora cuántica. El avance de la computación cuántica esta limitada por sus principales ventajas. Con lo referente a la superposición cuántica, que permite el paralelismo masivo y mantener una gran cantidad de múltiples estados en un mismo instante, el mayor inconveniente esta en la imposibilidad de leer toda esa información sin desestabilizar el sistema.

La importancia de este trabajo radica en el hecho de haber demostrado que es posible implementar y operar algoritmos cuánticos en un sistema clásico de procesamiento digital de señales. Sin embargo, en este trabajo no se pretende mejorar la velocidad de cálculo, sino verificar el comportamiento en tiempo de diferentes sistemas cuánticos, desde un qubit hasta circuitos cuánticos. Los resultados indican el comportamiento de la matriz de densidad en términos probabilísticos. Para validar la confiabilidad de estos resultados, se compara el procesamiento de 256 datos en una DFT y QFT. Se observa que no los dos métodos entregan resultados similares, lo que implica que nuestra metodología es fiable.

En la parte lógica, mantener la coherencia en un dispositivo cuántico es un desafío, principalmente debido a la gran cantidad de información adjunta que se necesita para garantizar la ausencia de errores, por lo que es necesario el desarrollo de mejores mecanismos de corrección de errores. Prevenir la incoherencia y preservar los frágiles estados cuánticos es relativamente fácil en sistemas pequeños, pero más complejo en grandes sistemas cuánticos.

5. Bibliografía

- [1] A.R. Calderbank and P. Shor. "Good Quantum Error-Correcting Codes Exist" *Physical Review A*. Vol. 54, 2. 1996
- [2] E. Knill, R. Laflamme, and W. Zurek. "A Theory of Quantum Error-Correcting Codes" Los Alamos National Laboratory Report LAUR-96-1300, 1996.
- [3] P. Benioff. "Quantum Mechanical Models of Turing Machines that Dissipate no Heat" *Physical Review Letters* 48, 1581. 1982.
- [4] M. Boyer, G. Brassard, P. Hoyer, and A. Tapp. "Tight bounds on quantum searching." *Proceedings, Physics of Computation Phys Comp96*. Nov.1996.
- [5] C.H. Bennett, D. Divincenzo, J.A. Smolin, and W.K. Wothers. "Mixed State Entanglement and Quantum Error Correction" *Physical Review A* 54, 3824. 1996.

- [6] S. Lloyd. "Quantum-Mechanical Computers." *Scientific American*. Vol. 273, No. 4, pp 140-145. October 1995.
- [7] J.S. Bell. "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox" *Physics*, 1:195. 1964. Also in *Quantum Theory and Measurement*. J.A. Wheeler and W.Z.Zurek eds. Princeton University Press.1983.
- [8] D.J. Wineland, C. Monroe, W.M. Itano, D. Leibfried, B.E. King, D.M. Meekhof. "Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped atomic ions." *NIST J. Research*. 1998.
- [9] A. Yao. "Quantum Circuit Complexity." in *Proceedings of the 34th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. IEEE Computer Society Press. 1993.
- [10] A. Barenco, C. Bennett, R. Cleve et al. "Elementary Gates for Quantum Computation" *Physical Review A*. March 1995.