

Implementación de Red Neuronal Cuántica en un Circuito Integrado

Implementation of Quantum Neural Network in an Integrated Circuit

Navarro Rubén R.¹; Colombo, Juan C.²; Rubén Egea³; Leal Ángel M.⁴; Ignacio Colombo⁵

1 Departamento Electrónica, Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional
C.P: 4000, rubenrobertonavarro@gmail.com.

2 Departamento Electrónica, Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional
C.P: 4000, colombojcc@arnet.com

3 Departamento Electrónica, Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional
C.P: 4000, rubenegea@hotmail.com

4 Departamento Electrónica, Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional
C.P: 4000, amleal@arnet.com.ar

5 Departamento Electrónica, Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional
C.P: 4000; ignaciocolombo84@gmail.com

Resumen. La implementación de inteligencia artificial basada en Deep learning se realiza actualmente con neuroredes digitales. Estas presentan series inconvenientes para la implementación de ciertas funciones como el entrenamiento de la red dentro de un circuito integrado. Además, las nuevas aplicaciones de la I.A. exigen un número cada vez mayor de capas y neuronas produciéndose un cuello de botella dado el alto consumo de esta tecnología y los límites de integración de componentes. Este trabajo es parte del proyecto de investigación "Optimización de Sistemas de Inteligencia Artificial basados en Deep Learning con Dispositivos Nanoelectrónicos Híbridos, Analógicos y Digitales.", en el mismo se analiza las bases del diseño de una red neuronal cuántica en un circuito integrado como uno de los posibles caminos de solución a las limitaciones citadas anteriormente.

Abstract. The implementation of artificial intelligence based on Deep learning is currently done with digital neuronetworks. These present a series of drawbacks for the implementation of certain functions such as network training within an integrated circuit. In addition, new applications of A.I. they require an increasing number of layers and neurons, producing a bottleneck given the high consumption of this technology and the limits of component integration. This work is part of the research project "Optimization of Artificial Intelligence Systems based on Deep Learning with Hybrid, Analog and Digital Nanoelectronic Devices.", which analyzes the bases of the design of a quantum neural network in an integrated circuit as one of the possible ways of solving the aforementioned limitations.

Palabras Clave: Inteligencia Artificial, Neuroredes Digitales, Neuroredes Cuánticas, perceptrón, computación digital, computación cuántica, compuertas cuánticas. Circuito Integrado óptico Cuántico.

Keywords: Artificial Intelligence, Digital Neuronetworks, Quantum Neuronetworks, perceptron, digital computing, quantum computing, quantum gates. Quantum Optical Integrated Circuit.

1. Introducción

En la actualidad existen gran cantidad de aplicaciones basadas en neuroredes digitales tales como el reconocimiento facial. Sin embargo, esta tecnología se encuentra prácticamente al límite de sus capacidades. Por un lado, tienen un alto consumo de energía eléctrica y por el otro se está llegando al límite de la ley de Moore, el tamaño actual de los transistores es de 7 nanómetros con dimensiones menores los transistores dejan de funcionar como tales. Por lo que en la actualidad hay una intensa búsqueda de tecnologías que permitan reemplazar los dispositivos nanoelectrónicos por otros con mayor escala de integración y menor consumo. Una de estas tecnologías es la computación cuántica que en este trabajo utilizaremos para implementar una red neuronal cuántica en un circuito integrado. Si bien se están fabricando circuitos integrados ópticos cuánticos estos se encuentran todavía en etapa experimental por lo que en este trabajo se utilizara un SoC de Xilin para la implementación de la lógica digital y la emulación de las compuertas cuánticas.

2. Fundamentos de la Computación Cuántica

Para poder entender en que consiste la computación cuántica se debe analizar brevemente los fundamentos y propiedades de la mecánica cuántica. La mecánica cuántica es una rama de la física que estudia la materia a nivel molecular, atómico y subatómico permitiéndonos predecir el comportamiento de la materia en estos ámbitos. Esta

teoría tiene la particularidad de que los valores de las propiedades de la materia se obtienen mediante cálculos con funciones de probabilidades o estadísticas. Los ordenadores cuánticos aprovechan la mecánica cuántica para aumentar la cantidad de información almacenada y la velocidad del procesamiento de la información superando en su desempeño a los supercomputadores actuales. Para ello se utiliza una serie de propiedades tales como estado cuántico, observable, medición, superposición, entrelazado, decoherencia, dualidad onda-partícula, entre otras. Los ordenadores cuánticos no utilizan el concepto de bit que se utiliza en la computación clásica (cuyo valor puede ser 1 ó 0). Estos utilizan los bits cuánticos o cúbits. Gracias a los cúbits podemos ser capaces de obtener mucho más almacenamiento de información y velocidad de procesamiento que con la misma cantidad de bits en la computación clásica. Esto se consigue mediante dos propiedades la superposición de estados y el entrelazamiento cuántico.

2.1. Superposición de estados y Entrelazamiento cuántico

La superposición es la capacidad de estar simultáneamente en múltiples estados lo que permite a los cúbits representar muchas combinaciones de unos y ceros al mismo tiempo. Controlando y variando estos estados podemos utilizar varios cúbits para almacenar una gran cantidad de información.

La superposición da la capacidad de realizar cálculos más complejos rápidamente, es decir, permite que los algoritmos cuánticos procesen la información en un tiempo mucho menor que los sistemas clásicos. Mientras que un bit puede estar únicamente en uno de sus estados (1 ó 0), un cúbit puede estar en una superposición de ambos, una mezcla de los dos estados.

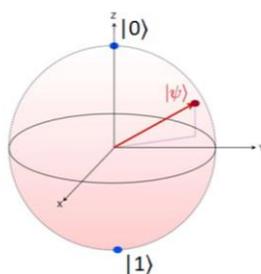


Fig. 1. Esfera de Bloch

Como podemos observar en la esfera de Bloch¹, Fig. 1, el bit puede variar entre 0 o 1 y solo puede tener uno de esos dos estados. Por otra parte, el cúbit se representa como una esfera en cuyos polos están situados el 1 y el 0, y a partir de estos podemos tomar cualquier valor que será determinada por el vector ψ , de forma que, si ψ está más cerca de 0, el estado 0 tendrá una mayor probabilidad, mientras que si está más cerca de 1 este será el estado más probable. Al ser una esfera también podemos acercarnos al 1 por el lado negativo del eje de coordenadas, por lo que también puede tomar estado negativo. No solo eso, sino que los coeficientes de las mezclas pueden hacerse con números complejos, es decir, que un solo cúbit puede configurarse de infinitas formas.

La superposición cuántica es arbitraria, es decir, no sabemos que estados se van a tomar, pudiendo darse el caso de que las probabilidades de que el estado sea 0 o 1 sean prácticamente iguales (p. ej. 0: 58%, 1: 42%) por lo que el resultado final se vuelve impredecible. Si bien esto es habitual cuando se estudian sistemas utilizando probabilidades. No es adecuado para un sistema de computo por lo que se utilizan el entrelazamiento cuántico o la corrección de errores por la decoherencia para “forzar” y “asegurar” un resultado.

El entrelazamiento cuántico es un recurso de la mecánica cuántica que es necesario utilizar en los cúbits para asegurar un resultado predecible. Este permite que los cúbits puedan interactuar entre sí independientemente de la distancia entre estos, pero tiene la exigencia de que para poder utilizarlo los cúbits deben permanecer aislados. Como se puede observar en la figura 2., el entrelazamiento² se da cuando, partículas que han interactuado entre sí, retienen un tipo de conexión y pueden entrelazarse. Este proceso se conoce como correlación. Dos partículas con entrelazamiento giran en sentidos opuestos por lo tanto si conocemos el sentido del giro de una partícula conoceremos el de la otra y esto, evidentemente, es aplicable en los cúbits.

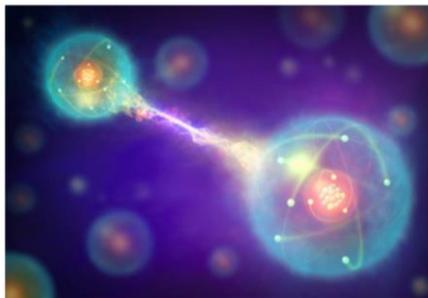


Fig. 2. Entrelazamiento Cuántico

2.2. Teletransportación cuántica

Esta propiedad se fundamenta en una hipótesis, descrita por Albert Einstein³, Boris Podolsky y Nathan Rosen en 1935. En ella si tenemos dos partículas las podemos separar en el espacio y aun seguirían compartiendo sus propiedades. Desde 1998 se realizaron diversos experimentos que lograron el teletransporte cuántico utilizando fotones, átomos y sistemas más complejos. En un primer momento se demostró este teletransporte a distancias cortas, pero se fue aumentando la distancia gradualmente hasta obtener el récord que actualmente existe, un teletransporte de fotones a 1400 kilómetros de distancia desde la Tierra⁴.

2.3. Interferencia cuántica

Hasta ahora se ha explicado generalmente que los cúbits pueden tomar 2 valores a la vez, pero esto es de poco valor en un ordenador cuántico ya que se están dando dos respuestas para un problema con una única respuesta correcta. Es aquí donde sale a la luz otro fenómeno cuántico, la interferencia cuántica. En física, las ondas y las partículas son distintas, pero Albert Einstein en 1905 introdujo la dualidad onda-partícula. Aunque ya se tenían casos, como en el de la luz, donde no era una onda o una partícula sino era ambas cosas. Esto mismo ocurre con los cúbits y es por eso que dos cúbits tienen su propia onda y al interactuar una con la otra pueden ocurrir dos cosas: que la interacción dé como resultado una interferencia destructiva en cuyo caso el resultado es 0, o una interferencia constructiva en cuyo caso el resultado es 1. Estas interferencias se pueden observar en la figura 3.

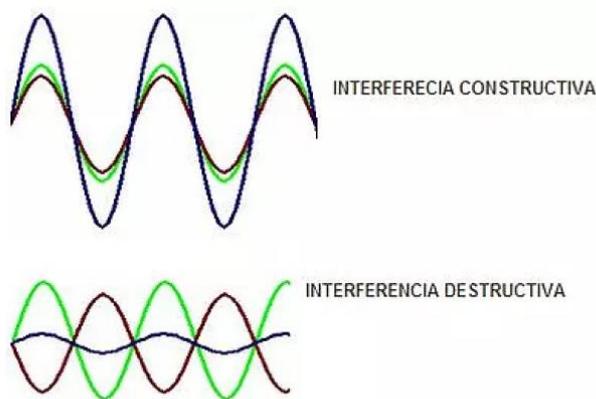


Fig. 3. Interferencia Cuántica

2.4. Compuertas Cuánticas

Las compuertas lógicas digitales son dispositivos electrónicos que poseen funciones capaces de realizar cálculos que operan a nivel de bit. En la figura 4 se pueden observar las diferentes compuertas lógicas con las que contamos, donde la parte izquierda de cada compuerta lógica son los bits entrantes y la parte derecha el bit resultante de la

operación. El resultado de las operaciones de cada compuerta lógica se determina según su tabla de la verdad correspondiente.

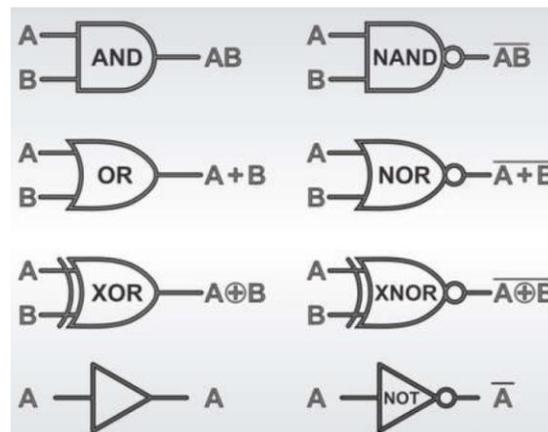


Fig. 4. Compuertas lógicas Digitales

Análogamente a las compuertas lógicas descritas previamente, las puertas cuánticas son circuitos cuánticos básicos que operan sobre cúbits, figura 5. Estas se suelen representar como matrices. Una compuerta que opera sobre n cúbits se representa una matriz unitaria de $2n \times 2n$. Donde el número de cúbits en la entrada debe coincidir con el número de cúbits en la salida. Una característica muy importante de las compuertas cuánticas, es que son reversibles, es decir, siempre va a ser posible obtener las entradas a partir de las salidas, Los estados cuánticos se representan mediante “|binario)” y son denominados kets. De forma que el estado “|0)” se denomina ket 0 y el estado “|1)” se denomina ket 1.

Puerta Cuántica	Qubits	Ecuación
Puerta Hadamard (H)	1	$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
Puerta X	1	$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Puerta Y	1	$Y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$
Puerta Z	1	$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Puerta SWAP	2	$SWAP = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Puerta CNOT	2	$CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
Puerta Toffoli	3	$Toffoli = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Fig. 5. Compuertas Cuánticas

3. Red Neuronal Cuántica en Circuito Integrado

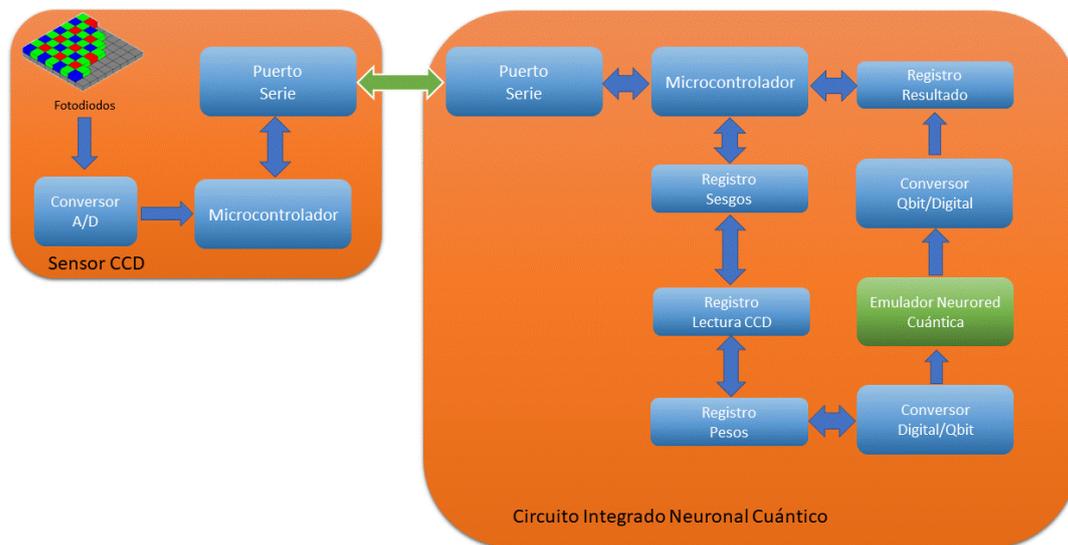


Fig. 6. Diagrama en bloques del Circuito Integrado Neuronal Cuántico

La figura 6 muestra el diagrama en bloques del circuito integrado a implementar, Las imágenes son obtenidas a partir de un sensor CCD estándar. El sensor CCD está compuesto por una matriz de fotodiodos asignados a los colores R, G o B en forma alternada. Estos fotodiodos están conectados a un convertidor A/D cuya información es tomada por un microcontrolador y enviada mediante un puerto serie a los dispositivos externos. El circuito integrado, procesará en la neurored cuántica una imagen de 640x480 píxeles. La neurored estará compuesta por 60 perceptrones en paralelo. Estos se dividen en tres grupos de 20 para cada uno de los colores de entrada. Por lo tanto, cada perceptrón analizará una matriz de 32x24 píxeles monocromática. El microcontrolador interno leerá el valor RGB de cada uno de los píxeles desde el puerto serie y los transferirá al registro de lectura CCD. Una vez terminado este paso el microcontrolador escribe los valores de los pesos de los perceptrones y el valor de sesgo de las funciones en los registros correspondientes. Estos registros alimentan un convertidor Digital/Qbit que ingresa los valores en Qbit a los perceptrones. Un convertidor Qbit/Digital toma la salida de los mismos y lo pasa al registro de resultados. El microcontrolador lee el registro de resultado y lo compara con el resultado correcto ajustando los pesos correspondientes, de esta manera se puede entrenar la red y modificar fácilmente sus parámetros de funcionamiento.

El modelo matemático del perceptrón utilizado se muestra en La fig. 7, este fue presentado por Rosenblatt⁶ y está basado en los trabajos de McCulloch y Pitts⁷. Constituyendo una forma abstracta y simple de representar una neurona artificial. Es el elemento básico de procesamiento de la neurored⁸. Que, si bien en este caso es un modelo simple y con limitaciones, nos permitirá estudiar el comportamiento de las mismas ya que las configuraciones actuales siguen manteniendo los mismos principios de funcionamiento⁹.

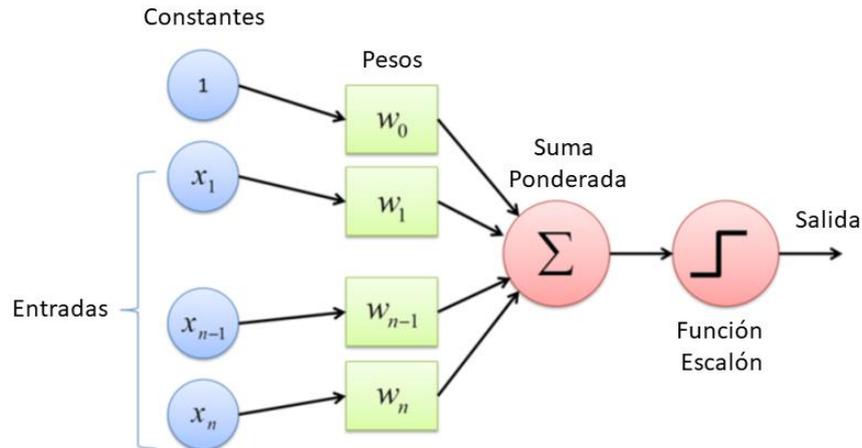


Fig. 7 Modelo matemático del perceptrón

En el mismo tenemos x_n señales de entrada. Cada una de ellas multiplicadas por su respectivo peso w . El microcontrolador normalizara tanto los valores de las señales de entrada como el de los pesos obteniéndose una suma ponderada dada por:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n x_i w_i \quad 0 \leq x_i \leq 1 \wedge 0 \leq w_i \leq 1 \quad (1)$$

El valor de esta suma ponderada es utilizado como entrada de una función escalón, esta se dispara (valor de salida 1) si la función es mayor que el sesgo establecido en el registro correspondiente, siendo entonces:

$$A(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } f(x) \geq s \\ 0 & \text{si } f(x) < s \end{cases} \quad (2)$$

Para la implementación de los perceptrones utilizaremos redes neuronales cuánticas o Quantum Neural Network (QNN) estos modelos de red están orientados a aprovechar al máximo las propiedades de la mecánica cuántica. Las primeras ideas sobre esta disciplina se publicaron en 1995 por Subhash Kak y Ron Chrisley. La fig. 8 muestra el modelo del perceptrón cuántico de una capa, basado en el modelo del equipo de investigación de la Universidad de Pavía en Italia¹⁰.

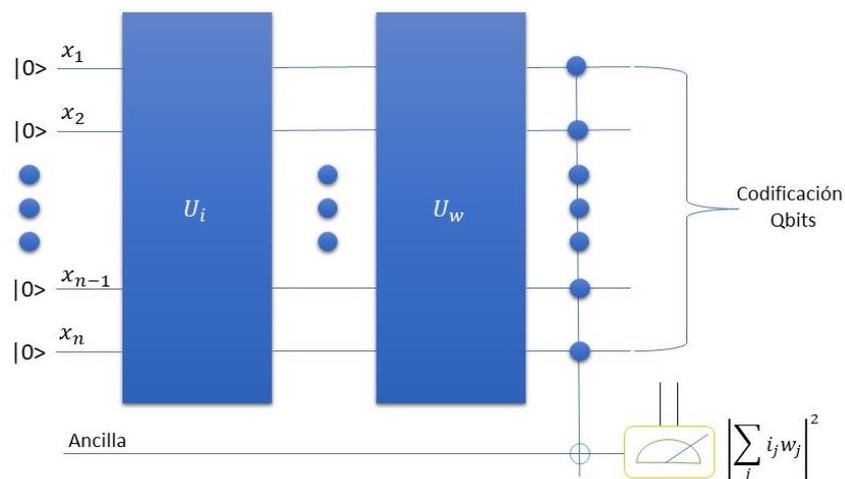


Fig. 8 Modelo matemático del perceptrón cuántico

Este modelo se encuentra en un nivel abstracto, donde la primera capa de la red cuántica codifica el vector de entrada en un estado cuántico. Luego, la segunda capa realiza transformaciones unitarias a los valores de entrada, de forma similar a cómo funciona el vector de peso en una red neuronal clásica. Finalmente, la salida se escribe en el qubit de Ancilla para producir la salida final. La implementación mediante compuertas cuánticas se puede ver en la figura 9.

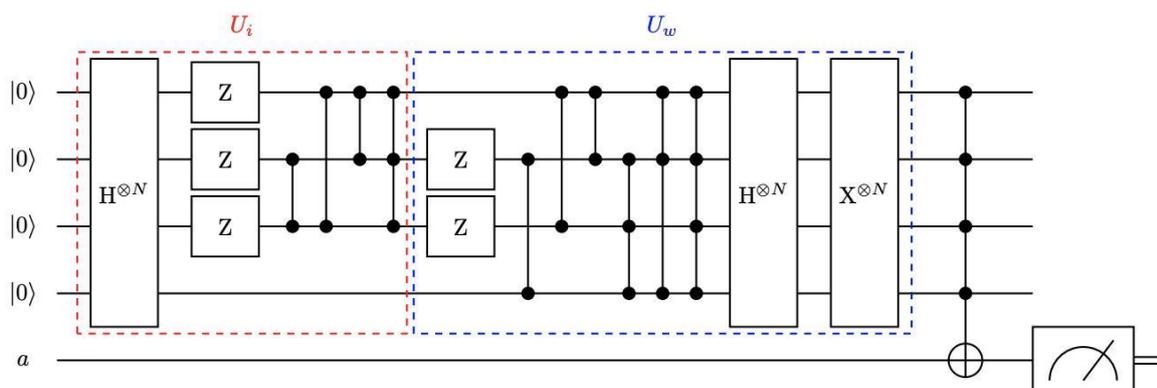


Fig. 9 Perceptrón diseñado con compuertas cuánticas

Si bien en la actualidad se han empezado a fabricar circuitos integrados ópticos cuánticos con los que sería posible la implementación de este sistema, estos se encuentran en la actualidad a un nivel experimental. La lógica de las compuertas que se muestran en la fig. 9 serán simuladas y verificadas inicialmente mediante un software específico como el Q#. Sin embargo, estos softwares no pueden simular todos los módulos y capacidades del circuito integrado que deseamos realizar. Por ello implementaremos el sistema en la placa ZedBoard Zynq™-7000 que se muestra en la figura 10.

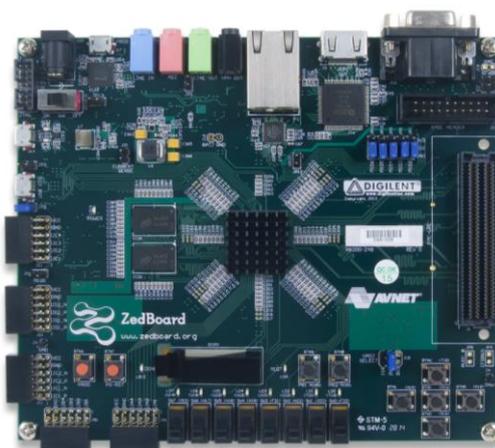


Fig. 10 ZedBoard Zynq™-7000

Esta dispone de un SOC programable XC7Z020-CLG484 pudiendo implementarse en el mismo todas las funciones del circuito integrado descrito en la figura 6, la figura 11 muestra el diagrama en bloques de la placa.

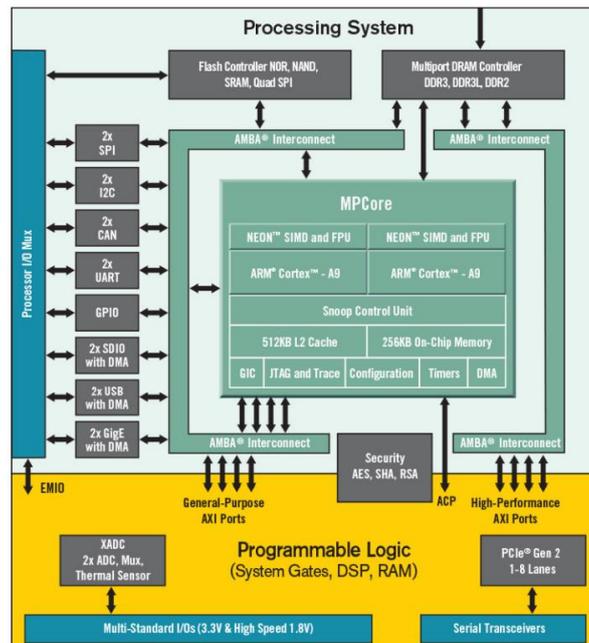


Fig. 11 Diagrama en bloques de ZedBoard Zynq™-7000

La cual tiene como características principales:

- Xilinx Zynq-7000 AP SoC XC7Z020-CLG484
- Dual-core ARM Cortex™-A9
- Memoria Ram de 512 MB DDR3
- Programador USB-JTAG USB-UART y USB OTG 2.0 10/100/1000
- Ethernet
- ADAU1761 SigmaDSP R Stereo, 96 kHz, 24-Bit Audio Codec ADV7511 225 MHz
- HDMI (1080p HDMI, 8-bit VGA, 128x32 OLED)
- Expansiones I/O PS y PL (FMC, Pmod, XADC)
- Memoria Flash de 256 MB Quad-SPI

Las compuertas cuánticas serán emuladas en este dispositivo permitiendo no solo simular los algoritmos, sino que también imite el comportamiento físico en una FPGA. Esto resuelve el problema de los simuladores en software como el Q# que tienen la imposibilidad de estudiar el comportamiento temporal de los algoritmos y el tiempo de procesamiento no crecerá de manera exponencial con la cantidad de qubits debido a la posibilidad de imitar la naturaleza cuántica: realizar múltiples tareas en simultáneo. De esta manera se verificará el funcionamiento y determinar las ventajas y desventajas de la arquitectura utilizada frente a las convencionales obteniéndose la performance exacta del dispositivo.

4. Conclusiones y trabajos futuros

Se ha realizado el diseño de un circuito integrado con una red neuronal cuántica para el procesamiento de imágenes basada en el modelo del perceptrón, utilizando circuitos de compuertas digitales para emular las compuertas cuánticas. Este integrado se ha implementado en un SoC el cual incluye dos microcontrolador con su lógica periférica y está encargado además de controlar la red neuronal. Lo que permite ejecutar funciones complejas tales como el entrenamiento de la misma o cambiar sus parámetros de funcionamiento de forma simple y rápida. Este integrado servirá de plataforma de lanzamiento para realizar una serie de pruebas en busca de la optimización de los módulos digitales y de las compuertas cuánticas que componen la neurored para implementar en una etapa posterior una neurored de múltiples capas.

Referencias

- [1] Cibertux Advanced Technology. *Esfera de bloch*. (22 de noviembre de 2021). Recuperado de <https://tecnologia.cibertux.com/tag/qubits/>.
- [2] SoloEsCiencia. (27 de noviembre de 2021). Recuperado de <https://soloesciencia.com/2018/02/27/entrelazamiento-amor-al-mas-puro-estilo-cuantico/>.
- [3] Albert Einstein, Boris Podolsky, and Nathan Rosen. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical review*, 47(10):777, 1935.
- [4] bbvaopenmind. *Teletransporte cuántico*. (29 de diciembre de 2021). Recuperado de <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/fisica/el-teletransporte-ya-esta-aqui-pero-no-es-lo-que-esperabamos/>.
- [5] Ahmed Banafa. *Computación cuántica e ia: una combinación transformacional*. (8 de abril de 2022). Recuperado de <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/mundo-digital/computacion-cuantica-e-ia/>.
- [6] R. Rojas. *Neural Networks: A Systematic Introduction*, Springer, 1996
- [7] D. Michie, D.J. Spiegelhalter, C.C. Machine Learning, Neural and Statistical Classification, Taylor (eds), 1994
- [8] Graude, D.: Principles of Artificial Neural Networks. Advanced Series on Circuits and Systems, vol. 6., 2nd. Edition. World Scientific Publishing Company (2007)
- [9] Bourzac, Katherine: Neural Networks on the Go. *IEEE Spectrum* (2016)
- [10] *El futuro de la inteligencia artificial*. (4 de diciembre de 2021). Recuperado de <https://programmerclick.com/article/3513859777/>.