Desarrollo de Algoritmos de Procesamiento de Imágenes Basados en "Operadores de Ventana"sobre una FPGA

Desarrollo de Algoritmos Orientados a la Corrección de Defectos en Imágenes Médicas

Jorge Osio*; Walter Aróztegui; Jose Rapallini; Antonio Adrián Quijano; Jesús Ocampo
Centro de Técnicas Analógico – Digitales (CeTAD)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata
La Plata, Argentina
* Becario de Estudios CIC – Comisión de investigaciones Científicas de la prov. de Bs. As.
jorge.osio@gioia.ing.unlp.edu.ar; walter.aroztegui@gmail.com; josrap@gmail.com; quijano@ing.unlp.edu.ar; jmfocampo@ing.unlp.edu.ar

Resumen— Los Filtros de tipo espacial utilizados en el Procesamiento de Imágenes están fuertemente ligados a los Operadores de Ventana.

En este trabajo se presenta el diseño de Módulos específicos para facilitar la implementación de algoritmos Basados en dichos Operadores. Además, se muestra la implementación de varios filtros que requieren de dichos módulos para realizar el Procesamiento de una Imagen. Entre los algoritmos implementados se encuentran los basados en operadores morfológicos, el filtro de mediana y la convolución espacial.

Mediante las diferentes aplicaciones se muestra la reusabilidad de los módulos que implementan los Operadores de Ventana en VHDL y la eficiencia con que se pueden implementar varios filtros en una misma FPGA.

Palabras Clave – Procesamiento Digital de Imágenes; Lógica Programable; Sistemas Embebidos; Diseño Basado en Reusabilidad.

I. INTRODUCCIÓN

Con el avance de la tecnología las FPGAs se han convertido en una herramienta indispensable en el diseño rápido y eficiente de proyectos que requieren procesamiento digital y lógica programable. Es por eso que se ha convertido en la principal herramienta para la implementación de los algoritmos de procesamiento Digital de imágenes presentados en este trabajo [1].

Debido a la gran cantidad de algoritmos para procesamiento de imágenes basados en los Operadores de Ventana, se llega a la necesidad de bloques reusables que permitan implementar los diferentes algoritmos basados en dichos operadores. En base a dichos bloques y mediante el agregado de un bloque adicional específico de cada algoritmo de procesamiento se puede implementar de manera eficiente y con un mínimo desarrollo una diversidad de filtros para procesamiento de imágenes que permiten el realce, acondicionamiento y la obtención de información de las diferentes imágenes en el campo de la Medicina.

Para la implementación del sistema basado en Operadores Morfológicos, previa simulación en matlab [3] [4], se realizó una interfaz serial que permite enviar los pixeles a procesar en la FPGA, y luego del procesamiento, (mediante tres bloques que implementan el algoritmo), recuperar la imagen procesada y acondicionada.

II. OPERADORES DE VENTANA Y SUS APLICACIONES

En procesamiento de imágenes [2] hay varios algoritmos que se pueden encasillar en la categoría operadores de ventana. Los operadores de ventaneo usan una ventana, conjunto de píxeles, para calcular sui salida. Por ejemplo el operador de ventaneo puede desarrollar una operación calculando el promedio de todos los pixeles en el entorno de un píxel. El píxel que se encuentra en el centro de la ventana se denomina original.

En este trabajo los algoritmos a implementar se basan en la utilización de ventanas de píxeles dentro de la imagen, para realiza el procesamientos de los mismos y obtener la salida correspondiente.

Los algoritmos basados en operadores de ventana se pueden dividir en 3 etapas principales. Una etapa de generación de ventana, un contador de filas y columnas y la etapa final específica del algoritmo a implementar.

El objetivo del "Generador de Ventanas" es almacenar en un buffer la cantidad de píxeles necesarios para formar una ventana de nxn, (en donde n define el tamaño de la ventana). Luego de esto el generador de ventana deberá ir realizando un desplazamiento de la ventana a lo largo de toda la imagen hasta lograr el procesamiento de todos los píxeles.

Luego el contador de filas y columnas se encargará de determinar cuáles son los píxeles de los bordes de la imagen, esto se hace porque en los bordes de la imagen no se puede aplicar el procesamiento de ventana por falta de información.

Dentro de los algoritmos que utilizan estos operadores se desarrollarán los filtros de mediana, (muy útiles para eliminar el ruido "sal y pimienta"), los basados en operadores morfológicos y la convolución espacial.

A. Operadores Morfológicos

El término de Operadores Morfológicos en procesamiento de imágenes se refiere a la clase de algoritmos que están interesados en la estructura geométrica de una imagen. La morfología puede ser usada sobre imágenes binarias o en escala de grises, y usada en muchas áreas de procesamiento de imágenes, tales como esqueletización, detección de bordes, restauración y análisis de textura.

Un operador morfológico usa un elemento estructurado para procesamiento de imagen. Normalmente se considera como elemento estructurado una ventana que se pasa sobre una imagen, similar a la ventana de pixeles usada en el filtro de ordenamiento por rango. Los elementos estructurados pueden ser de cualquier tamaño, (ej. 3x3, 5x5, etc).

Cuando el elemento estructurado pasa sobre un elemento en la imagen, el elemento estructurado se ajusta o no se ajusta. En el lugar donde el elemento estructurado se ajusta, se almacena la imagen resultante que representa la estructura de la imagen. La figura siguiente muestra el concepto de un elemento estructurado ajustado y sin ajuste en un objeto imagen.

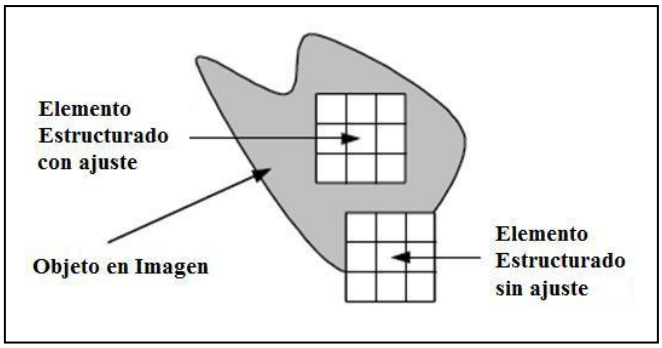


Figura 1. Elementos Estructurados.

Hay 2 operaciones fundamentales en morfología: erosión y dilatación.

Es común pensar erosión como la contracción de un objeto en una imagen. Dilatación es lo opuesto, agranda el objeto en la imagen. Ambos conceptos dependen del elemento estructurado y de cómo se ajusta en el objeto. La salida de una operación de dilatación es un píxel en primer plano para todos los puntos en el elemento estructurado a tal punto que el píxel original se ajusta en un objeto imagen.

La figura siguiente muestra una imagen binaria simple que es erosionada y dilatada, usando un elemento estructurado de tamaño 3x3 que consiste de todos unos.

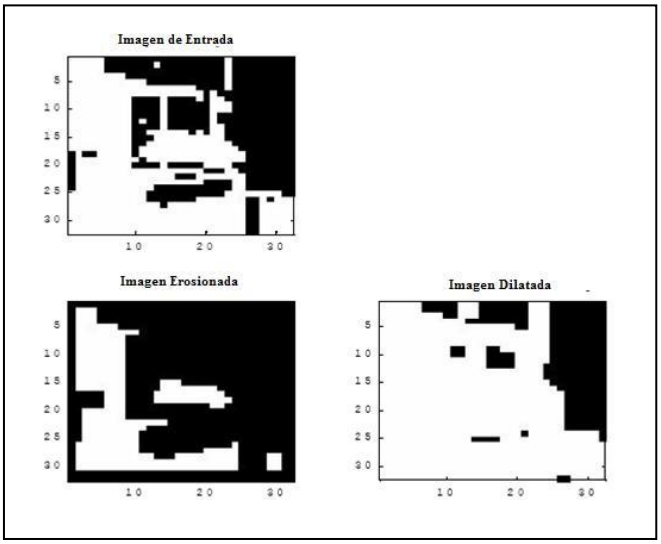


Figura 2. Erosión y Dilatación de una Imagen Binaria.

La erosión y dilatación pueden ser representadas matemáticamente mediante las siguientes relaciones:

Erosión: $A \ominus B = \{x: B + x < A\}$ y

Dilatación: $A \oplus B = U \{A + b: b \in B\}$, Donde A es la imagen de entrada y B es el elemento estructurado.

La morfología en escala de grises es más poderosa y más difícil de entender. El concepto es el mismo, pero en lugar de ajustar el elemento estructurado en un objeto de dos dimensiones, se hace a través de ya sea un ajuste o no ajuste de un objeto tridimensional.

Este tipo de morfología permite el uso de elementos estructurados en escala de grises. Los elementos estructurados binarios son elementos estructurados aplanados en morfología de escala de grises. La combinación de imágenes en escala de grises y elementos estructurados en escala de grises puede ser poderosa.

Uno de las más fuertes características del procesamiento de imágenes morfológico se extiende desde el hecho de que los operadores básicos, realizados en diferentes órdenes, pueden producir muchos diferentes, resultados útiles. Por ejemplo, si la salida de una operación de erosión se dilata, la operación resultante se denomina abierta. El dual de abierto, es llamado cerrado, en una dilatación seguida de una erosión. Estas 2 operaciones morfológicas secundarias pueden ser usadas para restauración de imágenes, y su uso iterativo puede producir nuevos resultados interesantes, como esqueletización y granulometría de una imagen de entrada.

La erosión y dilatación en escala de grises puede ser obtenida también mediante un filtro de ordenamiento por rango. La erosión corresponde a un filtro de ordenamiento por

rango de orden mínimo, y la dilatación corresponde a un filtro de ordenamiento por rango de orden máximo. La razón de esto es que el resultado de un filtro de ordenamiento por rango de orden mínimo es el valor mínimo en la zona del píxel, que es exactamente lo que una operación de erosión hace. Esto también sigue siendo válido para un filtro de ordenamiento por rango de orden máximo y la operación de dilatación. De cualquier manera, el filtro de ordenamiento por rango solo trabaja como una operación morfológica con un elemento estructurado plano. Esto es así porque el filtro de ordenamiento por rango trabaja como una clase de elemento estructurado formada por todos unos. Aun así, esta es una característica poderosa, ya que la morfología en escala de grises usando elementos estructurados planos describe los usos más comunes de la morfología.

B. Filtros de Ordenamiento por Rango

Dentro de los filtros de Ordenamiento por rango se encuentra el filtro de mediana que se implementa mediante una ventana de pixeles que se va desplazando a los largo de la imagen.

En cada desplazamiento se realiza el ordenamiento (ranking) de los píxeles y se reemplaza el valor del píxel central llamado "origen" por el valor medio determinado por el resultado del ordenamiento [2]. En la figura 3 se muestra una ventana de nueve píxeles, en donde luego del ordenamiento de los mismos, se toma como salida el pixel que se encuentra en la posición 5, ya que este es un filtro de ordenamiento por ranking de orden 5 y de esta manera se implementa el filtro de mediana.

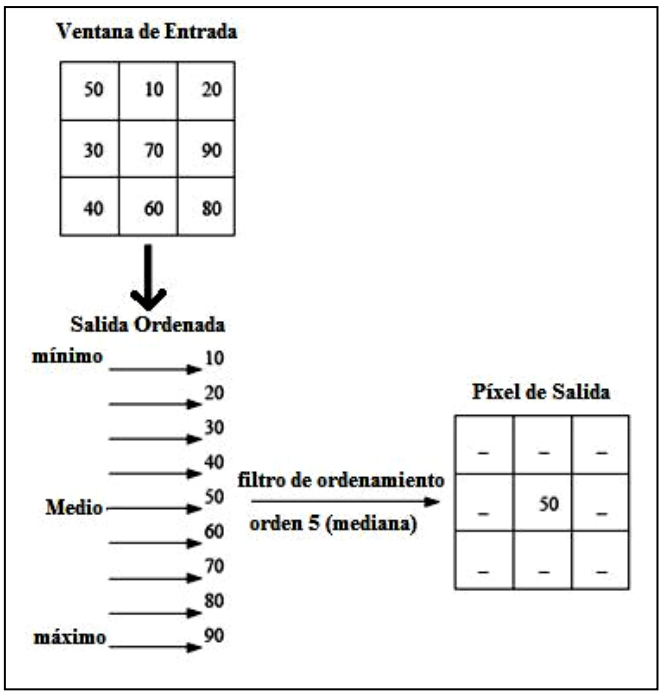


Figura 3. Filtro de Mediana.

De manera similar pero tomando el píxel de mayor intensidad, se obtiene el filtro de máxima el cual permite realizar la erosión que describen los operadores morfológicos. Tomando el píxel de menor intensidad se obtendrá el filtro de mínima que permite implementar la dilatación que también forma parte de dichos operadores.

C. Convolución Espacial

La convolución es comúnmente usada en algoritmos de sistemas de procesamiento Digital de señales. Los filtros espaciales usan una amplia variedad de máscaras, también conocidas como kernels, para calcular diferentes resultados, dependiendo de la función deseada. Por ejemplo, ciertas mascaras implementan el alisado, mientras otras realizan el filtrado pasa bajos o detección de bordes.

La convolución se puede calcular multiplicando cada píxel de una ventana por la mascara (kernel), para luego realizar la suma de cada producto y por último dividir por el número de pixeles de la ventana. Este valor es el píxel de salida en la ubicación del "píxel original" en la imagen de salida. Matemáticamente la convolución se representa mediante la siguiente ecuación:

$y(n_1,n_2)=\sum_{k_1=-\infty}^{\infty}\sum_{k_2=-\infty}^{\infty}A(k_1,k_2)k(n_1-k_1,n_2-k_2)$, Donde A es la imagen de entrada y K es la máscara de la convolución.

La ventana del pixel de entrada es siempre del mismo tamaño que la máscara de convolución. El pixel de salida es redondeado al entero más cercano.

La figura siguiente muestra la ventana de pixeles de entrada, la máscara de convolución, y el resultado de la salida. La máscara de convolución que se muestra en la Figura siguiente es frecuentemente usada como filtro para eliminar ruido.

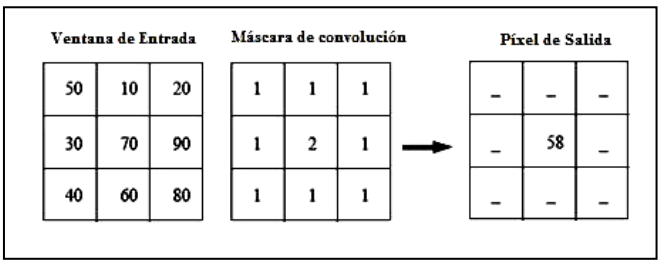


Figura 4. filtro de la Convolución.

III. SIMULACIÓN EN MATLAB DE LOS DISTINTOS ALGORITMOS

La simulación de los algoritmos se realizó en matlab [3], mediante la lectura de una imagen de 512x512. Para dicha simulación se realizó un archivo M que implementa los algoritmos de ordenamiento por rango, esto permite implementar el filtrado de mediana, máxima y mínima de acuerdo al rango que se utiliza. También se realizó un archivo M que implementa la convolución espacial.

A. Simulación en Matlab de Operadores Morfológicos

Para la obtención de la característica de los operadores morfológicos de "erosión y dilatación" en una imagen se aplicó el filtro de máxima y mínima. Los resultados de esta operación se muestran en la Figura 5.

(a) Imagen de Entrada

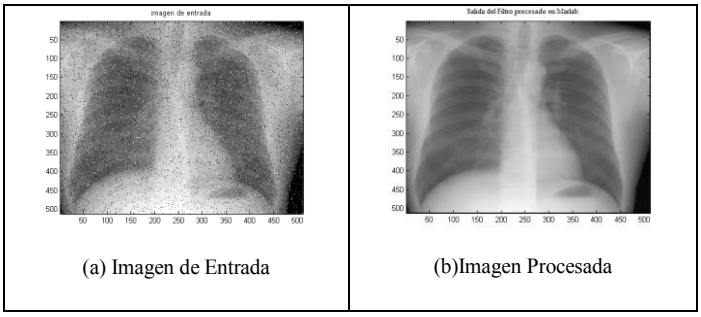
(b)Dilatación de Imagen

(c)Erosión de imagen

Figura 5. Resultado del Procesamiento Morfológico.

B. Simulación en Matlab del Filtro de Mediana

El filtro de mediana simulado en matlab es un filtro de orden 5. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6.



(a) Imagen de Entrada

(b)Imagen Procesada

Figura 6. Filtro de Mediana.

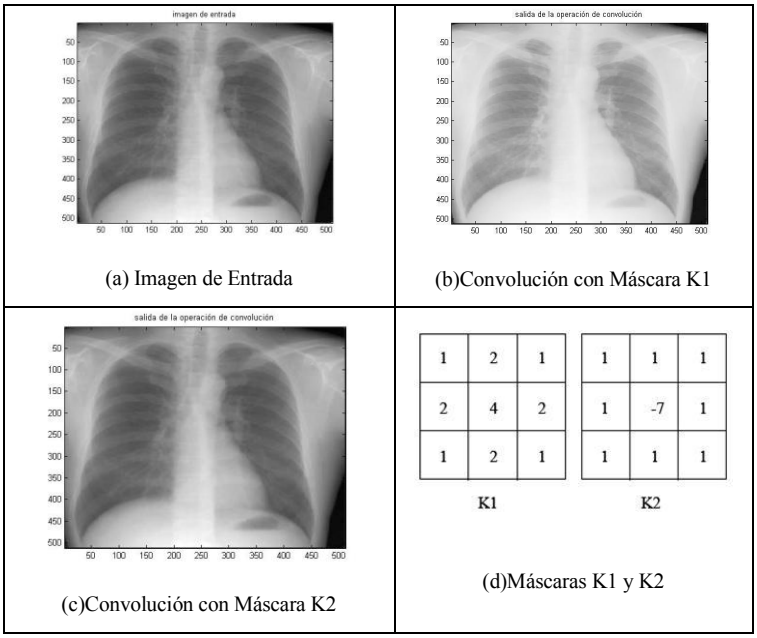
La Figura 6 (a) contiene píxeles con ruido del tipo "sal y pimienta". En dicha figura, los píxeles de color blanco se denominan ruido sal y tiene una intensidad de 0 y los pixeles de color negro se identifican como ruido pimienta con una intensidad de 255.

El filtrado en matlab consiste en la implementación de una ventana móvil de 9 píxeles y una función de ordenamiento "sort" que permita encontrar el píxel de valor medio, el cual formará parte de la imagen de salida [4].

La Figura 6 (b) muestra la imagen de salida del filtro sin indicios de ningún tipo de ruido.

C. Simulación en Matlab dela Convolución Espacial

La convolución espacial en matlab se implementó mediante un generador de ventanas que va recorriendo toda la imagen y una matriz de 3x3 la cual se utilizó como máscara. La Figura 7 muestra los resultados de dicha convolución con 2 máscaras distintas.



(a) Imagen de Entrada

(b)Convolución con Máscara K1

(c)Convolución con Máscara K2

(d)Máscaras K1 y K2

Figura 7. Resultado de la Convolución Espacial.

La Figura 7(b) muestra como la Máscara K1 aumenta el brillo de la imagen. Por otro lado la Máscara K2 realiza un leve suavizado.

IV. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema en la FPGA está formado por 3 módulos principales; el Generador de Ventanas, el Contador de Filas y Columnas y el Módulo que implementa el algoritmo deseado. Por otro lado, el sistema consta de un módulo de comunicación serial para la adquisición y el envío de datos procesados [5].

El filtro de mediana, de Máxima y de Mínima se implementó en VHDL mediante un módulo "generador de ventanas", el cual genera ventanas de 3x3 píxeles, un módulo de "ordenamiento de píxeles" que ordena los píxeles según su intensidad (su valor puede estar entre 0 y 255) y un módulo contador de filas y columnas que tiene por objeto determinar cuáles son los píxeles que se encuentran en los bordes de la imagen y asignarles el valor 0, ya que estos píxeles no pueden ser evaluados por no tener información suficiente para formar la ventana de 3x3. Por otro lado, El algoritmo de la Convolución Espacial contiene el módulo de generación de ventanas, el contador de filas y columnas y un bloque específico que realiza la convolución entre cada una de las ventanas y la máscara a aplicar.

El la Figura 8 se muestra el diagrama en bloques del sistema completo, en donde la imagen se convierte del formato Gif a binario mediante el programa gif_a_bin.m, luego es enviado a la FPGA mediante un software de comunicación serial, en donde se procesa y se envía dicha imagen

nuevamente a la PC vía RS-232. Por último, mediante el programa bin_a_gif.m se transforma la imagen procesada al formato original.

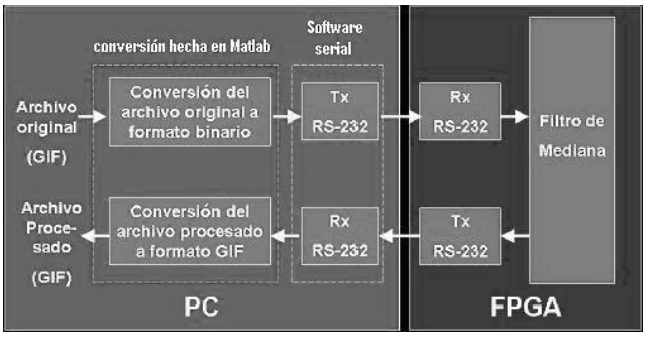


Figura 8. Diagrama en Bloques del Sistema completo.

A. Módulo de Comunicación Serial

El módulo serial implementado en VHDL consiste de un Bloque "generador de baud rate", el cual se implementa mediante un contador que genera una señal de muestreo cuya frecuencia es 16 veces el baud rate seleccionado para la UART. Está señal es utilizada por el bloque de recepción y transmisión serial para detectar los datos de entrada y generar los datos de salida, respectivamente [6].

El modulo Receptor se implementa mediante una máquina de estados que recibe los bits de datos y los envía a un buffer FIFO en donde son almacenados de a 1 byte. La salida del buffer FIFO entrega un Byte de datos en forma paralela, para ser procesado por el sistema.

Por último, el bloque transmisor funciona del mismo modo que el bloque receptor, solo que recibe los datos de a 1 byte en forma paralela y los transmite de forma serial. La Figura 9 muestra el diagrama en bloques completo de una UART implementada en Hardware [6].

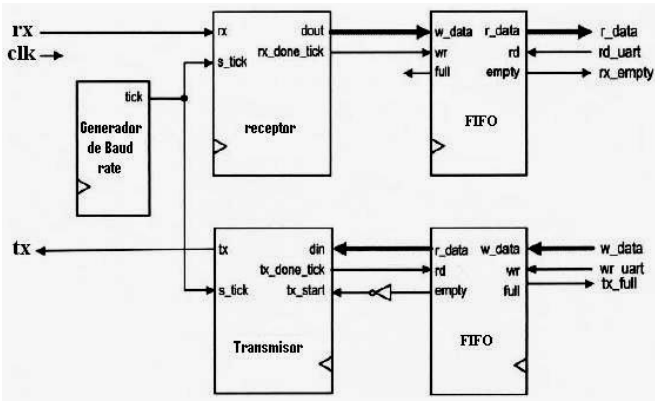


Figura 9. Diagrama en Bloques del módulo UART.

B. Generador de Ventanas

Los filtros de de ordenamiento por rango forman parte del procesamiento de imágenes basado en regiones. Para realizar este tipo de procesamiento es necesario seleccionar los píxeles correspondientes a la región de interés. Esto se hace mediante un "generador de ventanas" [7].

El "generador de ventanas" es un módulo diseñado en VHDL para la selección de los píxeles de la región a procesar. La Figura 10 muestra como se implementa en hardware dicho generador mediante flip flops y 2 buffers FIFO [8]. También se muestran las salidas de los 9 píxeles de la ventana a ser procesados por el bloque de ordenamiento de píxeles.

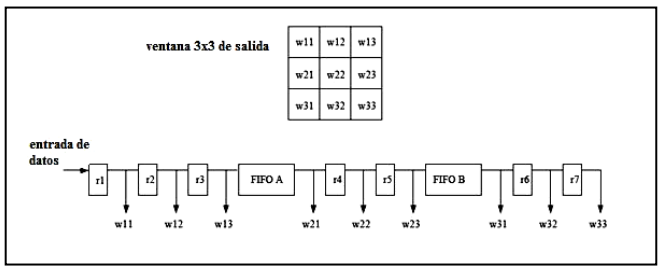


Figura 10. Arquitectura del Generado de Ventanas.

Cabe aclarar que los Bloques FIFO fueron diseñados utilizando una herramienta de Xilinx muy potente llamada CORE GENERATOR que permite personalizar el diseño de una FIFO de manera rápida. En este caso se seleccionó una entrada de 8 bit y 512 bytes de almacenamiento implementados en RAM distribuida.

C. Contador de Filas y Columnas

Cada pixel de salida del filtro es asignado a la posición correspondiente del pixel que se encuentra en el centro de la ventana procesada. Por lo tanto, si se pretendiese conocer este valor en los bordes de la imagen, se requerirían valores que no están disponibles por tratarse del borde. En otras palabras para conocer los valores de la mediana en los bordes sería necesario conocer los pixeles adyacentes a los mismos. El contador de filas y columnas indica si el pixel de salida se encuentra en los bordes de la imagen, para poder asignarle un valor nulo al pixel [9].

La implementación en Hardware de dicho contador tiene en cuenta los píxeles correspondientes a la primer y última fila y los correspondientes a la primer y última columna de una imagen de 512x512. A dichos píxeles les asigna el valor 0 y los envía a la salida.

D. Ordenador de Píxeles

El filtro de mediana es un subconjunto que pertenece a los filtros de orden estadístico (ordenamiento por rango) [7]. La característica principal de estos filtros es que requieren el ordenamiento de menor a mayor (o viceversa) del valor de los píxeles involucrados en la operación. Este bloque se realiza en VHDL para obtener el ordenamiento de los píxeles de la ventana de interés.

Como muestra la figura 11, el bloque de ordenamiento se implementa mediante comparadores que reciben como entradas grupos de 2 píxeles para determinar cuál es mayor y cual es menor. De esta manera y mediante varios ciclos de clock se obtienen los 9 píxeles ordenados. De los cuales se selecciona como salida el de la posición 5, esto es así porque el filtro debe ser de orden intermedio para ser de mediana [8] y [9].

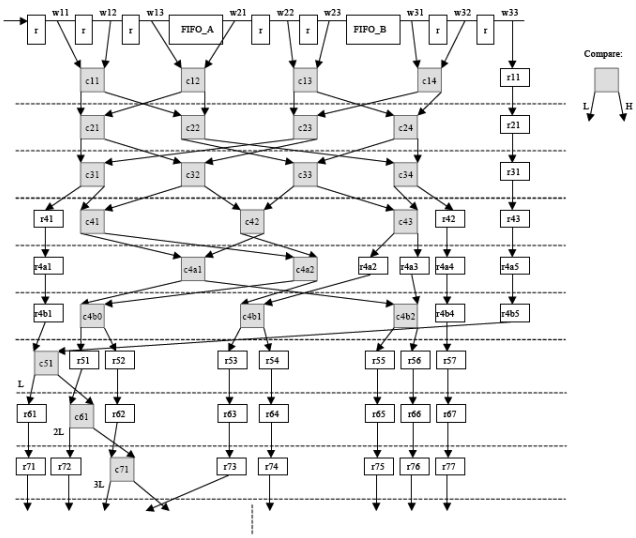


Figura 11. Diseño de Hardware del algoritmo de ordenamiento.

E. Convolución Espacial

El módulo de convolución espacial realiza el producto entre cada ventana y la máscara píxel a píxel, para luego sumar cada resultado y dividirlo por la cantidad de píxeles de la ventana. En la Figura 12 se muestra el diagrama de HW del bloque que realiza la convolución. Cabe aclarar que se realizo una división por 8 mediante desplazamientos, para evitar la utilización de excesivos recursos y la operación de redondeo.

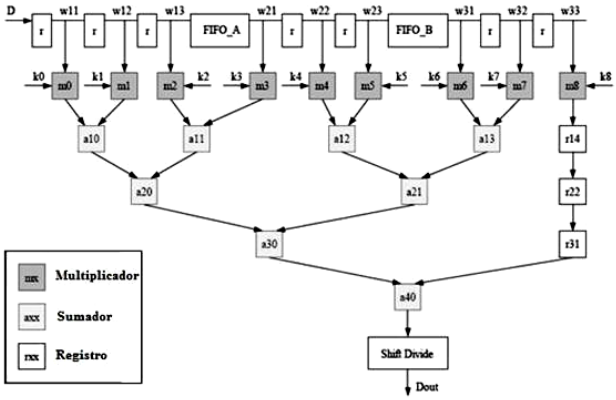


Figura 12. Diseño de Hardware del algoritmo de Convolución.

V. TESTBENCH Y RESULTADOS OBTENIDOS

En las Figuras 13, 14 y 15 se muestra los tesbench respectivos del Generador de Ventanas, el algoritmo de convolución espacial y el algoritmo de ordenamiento (utilizado para los filtros de ordenamiento por rango).

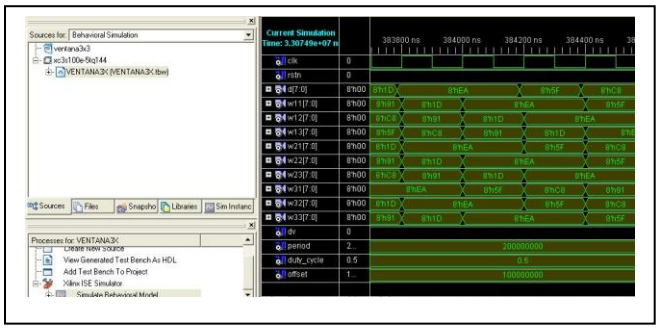


Figura 13. Testbench del Generador de Ventanas.

Las Figuras 16, 17 y 18 muestran los recursos utilizados en la FPGA para la implementación del bloque generador de ventana, de convolución y de ordenamiento, respectivamente. Se debe tener en cuenta que se ha implementado un sistema completo que procesa imágenes de 512x512 píxeles por lo que es de esperarse que se utilicen una gran cantidad de recursos.

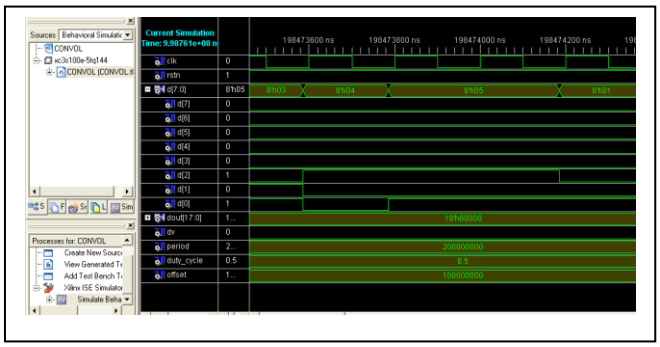


Figura 14. Testbench de la convolución espacial.

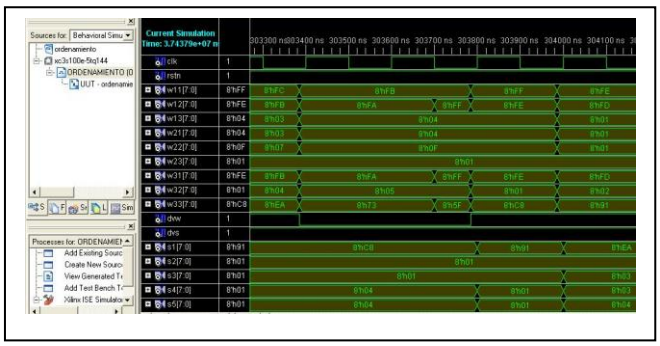


Figura 15. Testbench del algoritmo de ordenamiento.

La implementación del Generador de Ventanas solo utilizó el 5 por ciento de los slices, como se muestra en la Figura 16. El 4 por ciento de flip flops y el 0 por ciento de las 4 input LUTs [10].

La implementación del Ordenador de Píxeles utilizó el 50 por ciento de los slices, el 4 por ciento de flip flops y el 0 por ciento de las 4 input LUTs, como se muestra en la Figura 17 [10].

En cuanto al Módulo de la convolución utiliza un porcentaje insignificante que no influye en los recursos globales.

Device Utilization Summary (estimated values)			
Logic Utilization	**Used**	**Available**	**Utilization**
Number of Slices	56	960	5%
Number of Slice Flip Flops	91	1920	4%
Number of 4 input LUTs	7	1920	0%
Number of bonded IOBs	83	108	76%
Number of GCLKs	1	24	4%

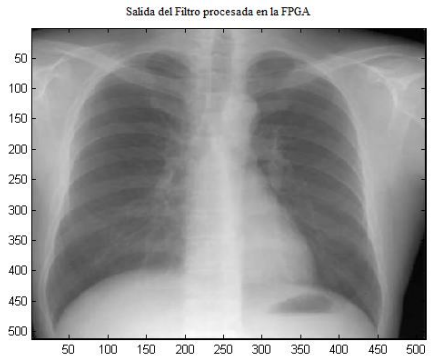
Figura 16. Reporte de recursos empleados para el Generador de Ventanas.

Device Utilization Summary				
Logic Utilization	**Used**	**Available**	**Utilization**	**Note(s)**
Number of Slice Flip Flops	972	1,920	50%	
Number of 4 input LUTs	750	1,920	39%	
Logic Distribution				
Number of occupied Slices	619	960	64%	
Number of Slices containing only related logic	619	619	100%	
Number of Slices containing unrelated logic	0	619	0%	

Figura 17. Reporte de recursos empleados para el ordenador de píxeles.

En la Figura 18(a) se muestra la imagen procesada en la FPGA por el filtro de mediana y en la Figura 18 (b) la imagen procesada por la convolución.

(a) Imagen procesada Por el filtro de mediana.



(b) Imagen Procesada por la convolución.

Figura 18. Resultado del Procesamiento en la FPGA

VI. CONCLUSIONES

Se Puede concluir que La FPGA es una herramienta muy potente para el procesamiento de imágenes, ya que mediante una Spartan 3 con las mínimas prestaciones se pueden implementar algoritmos de procesamiento de imágenes para la corrección de errores que requiere mucho procesamiento y en imágenes de un tamaño aceptable de 512x512 pixeles. Se debe tener en cuenta que solo se están utilizando la mitrad de los recursos de HW. De cualquier manera sería conveniente utilizar una FPGA más potente para imágenes de mayor tamaño o para una ventana de procesamiento mayor a la utilizada de 3x3 píxeles.

También se pudo comprobar el buen funcionamiento del filtro en HW mediante la comparación de la imagen obtenida con una procesada en matlab.

VII. TRABAJO A FUTURO

Se pretende implementar algoritmos más complejos como la transformada wavelet y el filtro de sobel [11], mediante FPGAs (Spartan 6 o Virtex 5) más potentes con Módulos DSPs y otras características que permitan operaciones a muy altas velocidades.

REFERENCIAS

[1] A. Domingo Ajenjo, "Tratamiento digital de imágenes", Anaya, Madrid, 1993.

[2] Rafael C. González, Richard E. Woods, "Digital Image Processing", Addison-Wesley, Massachusetts, 1992.

[3] Banerjee, P. : "MATCH: A MATLAB Compiler for Configurable Computing Systems," Electrical and Computer Engineering, Northwestern University, 1999.

[4] Rafael C. González, Richard E. Woods, Steven L. Eddins, "Digital Image Processing using Matlab", Prentice-Hall, New Jersey, 2004.

[5] Nelson, A.: "An Implementation of t he Optical Flow Algorithm on FPGA Hardware," Independent Study Paper, December 1998.

[6] Pong P. Chu, "FPGA Prototyping by VHDL Examples", Xilinx Spartan 3 Version, John Wiley Cleveland, 2008

[7] Nelson, A.: "Further Study of Image Processing Techniques on FPGA Hardware," Independent Study Paper, May 1999.

[8] The Designer's Guide to VHDL 2nd Edition, Peter J. Ashenden, Editorial Morgan Kaufman, 2002

[9] Chou, C., Mohanakrishnan, S., Evans, J.: "FPGA Implementation of Digital Filters," Proc. ICSPAT, 1993.

[10] Diseño Digital Principios y Prácticas Tercera Edición, John F. Wakerly, Editorial Prentice Hall, 2001

[11] Russ, J.: "The Image Processing Handbook," CRC Press, Boca Raton, FL, 1992.