

Revista de



TECNOLÓGICO

RIDTEC | Vol. 12, N.º 1, enero - junio 2016

ISSN 1680-8894

Edición Semestral

Publicación Regional

Revista indexada en

latindex

www.latindex.unam.mx



Director del Comité Editorial

Dra. Deyka García

Dirección de Investigación, UTP¹

Comité Editorial

Dr. Humberto Álvarez

Centro de Investigación e Innovación Eléctrica,
Mecánica y de la Industria, UTP¹

Dr. Wedleys Tejedor

Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales, UTP¹

Dr. Carlos Medina

Facultad de Ingeniería Eléctrica, UTP¹

Dra. Jazmina Urriola

Dirección de Investigación y Desarrollo (I+D) SENACYT²

Ing. Eli Faskha

Miembro del CONEP³ y de la Junta Directiva de CAPATEC⁴

Ing. Julio Mario Daza Escorcía

Docente Investigador⁵ y Estudiante doctorando,
Universidad de Valencia, España

Suplentes

Dr. Ramfis Miguelena

Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Tecnologías
de la Información y las Comunicaciones, UTP¹

Afiliaciones

1 Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.

2 Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación
(SENACYT), Panamá.

3 Consejo Nacional de la Empresa Privada (CONEP), Panamá.

4 Cámara Panameña de Tecnología y Comunicaciones
(CAPATEC), Panamá.

5 Politécnico de la Costa Atlántica, Colombia.



Ing. Libia Batista

Directora

Licda. Sandra Siebert

Sr. Armando Pinillo

Mercadeo y Ventas

Sección de Diseño Gráfico

Diseño y diagramación

Licdo. Rafael Saturno

Idea y diseño original de la portada

Lcda. Klenya Morales

Corrección de estilo

Ing. Eduardo Caballero

Coordinación y logística

Dirección de Investigación, UTP.

Escribir en I+D Tecnológico

<http://utp.ac.pa/publicaciones-digitales-de-la-revista-de-id-tecnologico>

Plataforma para la Recepción de Artículos

<http://www.redinvestigadores.utp.ac.pa/revista+D/openconf/openconf.php>

© Derechos reservados, UTP

Impreso en Panamá, Ciudad de Panamá
Imprenta de la Universidad Tecnológica de Panamá

Tiraje: 300 ejemplares.

resentación

La Universidad Tecnológica de Panamá se complace en presentar a la comunidad científica en general la primera edición del año 2016 de la Revista I+D Tecnológico, correspondiente al volumen 12, número 1. En esta edición se han incluido trabajos en las áreas de consumo y eficiencia energética para unidades de procesamiento gráfico, ciencias de los materiales, cambio climático, Aplicaciones con celdas solares, microestructuras y nanoindentación, así como soluciones tecnológicas para rehabilitación física.

En el primer artículo de este volumen, Rafael A. Vejarano de la Universidad Tecnológica de Panamá y Jeong-Gun Lee de Hallym University, nos presentan una metodología para analizar el rendimiento energético en formación de haz (beamforming) utilizando GPGPU – Sim; el cual ejecuta códigos escritos con variadas configuraciones mediante un simulador de nivel de ciclo de cargas de trabajo de computación, con la finalidad de determinar la arquitectura con óptimo rendimiento en las unidades de procesamiento gráfico, GPU.

Mientras que, Julio C. Villalobos de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y colaboradores, nos presentan un análisis sobre la influencia de tiempos y temperaturas entre 200 y 600°C a una densidad de corriente de 40 mA/cm² durante una y 12 horas de exposición de revenido en la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno para las propiedades mecánicas de un acero microaleado experimental, que es sometido a ensayos de tensión y ensayos de permeabilidad de hidrógeno a fin de determinar los coeficientes de difusión efectivos.

El trabajo presentado por Verónica Castillo, se enfoca en el establecimiento de una línea base de parámetros de calidad físico-químicos y microbiológicos de agua marina costera, para la evaluación de los posibles efectos del cambio climático en varias zonas costeras del Pacífico y Caribe de Panamá.

Los autores liderados por Héctor Miranda nos presentan los resultados de un trabajo de investigación cuyo objetivo

fue la preparación y caracterización de películas delgadas de SnO₂:F depositadas mediante la técnica de rocío pirolítico como una alternativa económica y viable para la producción en masa de óxidos conductores transparentes y dispositivos opto-electrónicos entre otros. Un equipo de deposición semi-automatizado permitió controlar el espesor de las muestras de películas sinterizadas a una temperatura de 500 °C, con espesores de 140 nm a 732 nm. Su morfología superficial fue estudiada por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y sus propiedades ópticas, por espectroscopía UV-Visible.

E. López-Martínez y colaboradores nos muestran un análisis del efecto de los ciclos térmicos de soldadura en la microestructura y nanoindentación de un acero microaleado experimental martensítico-bainítico. Mediante el uso de pruebas de microdureza, observan que se presenta un ablandamiento en las subzonas de recristalización, intercrítica y subcrítica, el cual está relacionado con la microestructura presente. Además, analizan aspectos de endurecimiento en la frontera que separa a la sub zona intercrítica de la subcrítica probablemente relacionado con el endurecimiento secundario producto de la precipitación de carburos de los elementos aleantes. En el borde de granola la ferrita poligonal y la vainita se comportan con nano dureza similar.

Para finalizar, en el último artículo de esta edición, Vladimir Villarreal presenta un interesante aporte para la rehabilitación física de pacientes que requieren ejercicios de fisioterapia desde la comodidad de su hogar, previo análisis y recomendación del médico responsable. Consiste en una aplicación a través de un teléfono móvil que genera informes de los resultados de las actividades físicas realizadas tanto para el paciente como el médico.

DRA. DEYKA GARCÍA
Directora del Comité Editorial
Junio de 2016



Universidad Tecnológica de Panamá

AUTORIDADES

Dr. Oscar M. Ramírez R.
Rector

Ing. Rubén D. Espitia P.
Vicerrector Académico

Dra. Casilda Saavedra de Madrid
Vicerrectora de Investigación, Postgrado y Extensión

Ing. Esmeralda Hernández P.
Vicerrectora Administrativa

Ing. Luis A. Barahona G.
Secretario General

Lic. Jeremías Herrera D.
Coordinador General de los Centros Regionales

Contenido

- 5** **Rendimiento y análisis energético en formación de haz con GPGPU-Sim**
Performance and Power Analysis of Beamforming with GPGPU-Sim
Rafael Alejandro Vejarano | Jeong-Gun Lee
- 14** **Acero microaleado experimental sometido a tratamientos térmicos de revenido y su efecto sobre la fragilización por hidrógeno**
Experimental microalloyed steel subjected to tempering heat treatments and its effect on hydrogen embrittlement
Julio C. Villalobos | Sergio A. Serna | Bernardo Campillo | Osvaldo Flores | Edgar López
- 22** **Establecimiento de una línea base de parámetros de calidad de agua marina costera para la evaluación de los posibles efectos del cambio climático en Punta Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa y Playa La Marinera**
Establishing baseline parameters of coastal seawater quality for the evaluation of possible climate change effects at Punta Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa y Playa La Marinera.
Verónica Castillo | Gisselle Guerra | Kathia Broce
- 33** **Preparación y caracterización de películas delgadas de SnO₂:F depositadas mediante la técnica de rocío pirolítico y sus aplicaciones como TCO's**
Preparation and characterization of SnO₂:F thin films deposited by spray pyrolysis technique for TCO's applications
Héctor Miranda | Amanda Watson | Ildemán Abrego | Eleicer Ching-Prado
- 40** **Microestructura y nanoindentación de la zona de la soldadura de un acero microaleado experimental**
Microstructure and nanoindentation of the welding zone of an experimental microalloyed steel
Edgar López Martínez | Sergio Serna | Osvaldo Flores | Bernardo Campillo
- 47** **Rehabilitación física de pacientes: una solución móvil para facilitar los ejercicios de fisioterapia básicos**
Physical rehabilitation of patients: a mobile solution to facilitate basic physiotherapy exercises
Vladimir Villarreal
- 54** **Instructivo para autores**
Guide for authors

Revista indexada en:



www.latindex.unam.mx

Rendimiento y análisis energético en formación de haz con GPGPU-Sim

Performance and Power Analysis of Beamforming with GPGPU-Sim

Rafael Alejandro Vejarano¹, Jeong-Gun Lee²

¹Centro Regional de Coclé, Universidad Tecnológica de Panamá, ²Departamento de Ingeniería Computacional, Hallym University
¹rafael.vejarano@utp.ac.pa, ²jeonggun.lee@hallym.ac.kr

Resumen— Las unidades de procesamiento gráfico (GPU) se utilizan actualmente en una amplia gama de aplicaciones científicas y comerciales. Estos son de las primeras plataformas de energía eficientes y asequibles para el procesamiento de datos en paralelo. En el campo de las imágenes médicas, las GPU son en algunos casos cruciales para hacer uso práctico de algoritmos computacionalmente exigentes. Por esta razón, en esta investigación se explora el área de consumo y eficiencia energética al utilizar GPU como procesadores de señal e imagen primaria para sistemas médicos portátiles futuros de imágenes de ultrasonido. Como metodología de estudio se utilizó la aplicación GPGPU-Sim, un simulador de nivel de ciclo de cargas de trabajo de computación GPU ejecutando código escrito en CUDA, realizando variadas configuraciones a fin de determinar la arquitectura con óptimo rendimiento para nuestra aplicación de formación de haz (beamforming).

Palabras claves— Formación de haz, CUDA, Rendimiento, Consumo energético, GPPGU-Sim, GPUWatch.

Abstract— Graphics processing units (GPUs) are used today in a wide range of scientific and business applications. They have emerged as one of the first affordable and energy efficient platforms for data-parallel processing. In the field of medical imaging, GPUs are in some cases crucial for enabling practical use of computationally demanding algorithms. For this reason, this paper explores the suitability of using GPUs as the primary signal and image processors for future portable ultrasound systems. The case study method embraces the full set of procedures needed to test the beamforming application by changing different parameters in the architecture of GPGPU-Sim, a cycle-level simulator running GPU computing workloads written in CUDA.

Keywords— Beamforming, CUDA, Performance, Power consumption, GPPGU-Sim, GPUWatch.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 12 de octubre de 2015

Fecha de aceptación: 7 de abril de 2016

1. Introducción

El cofundador de Intel, Gordon Moore predijo, en la llamada ley de Moore, que el número de transistores por pulgada en los circuitos integrados se duplicaría cada 18 meses y que esa tendencia continuaría al menos durante dos décadas. Para aquel entonces, 1956, el chip más complejo contaba con 64 transistores. Hoy, un procesador i7 tiene 731 millones.

Los avances progresivos de la tecnología y la reducción en costo, hacen posible que los dispositivos computacionales sean accesibles a un creciente número de personas en el mundo.

El rendimiento, consumo energético y la eficiencia son un asunto que preocupa a científicos y consumidores. En este sentido, emergen las unidades de aceleración gráfica

como plataforma para computación paralela ya que estas arquitecturas de GPU poseen miles de procesadores de flujo diseñados para proveer un alto rendimiento para flujos de trabajo en paralelo. La programación de propósito general, tal como la Arquitectura de Cómputo Unificada, CUDA, por sus siglas en inglés (Compute Unified Device Architecture), son a menudo utilizadas para facilitar el desarrollo de aplicaciones en GPGPU. El rendimiento en las computadoras modernas es principalmente afectado por el procesador y la memoria, las cuales afectan la velocidad de respuesta, por lo que es importante priorizar su relación con rendimiento y potencia. El problema aumenta cuando nos dirigimos a los dispositivos móviles, ya que estos poseen un pequeño presupuesto de energía que requiere un rendimiento que excede los niveles de las computadoras de escritorio, sin considerar las técnicas de reducción de energía y las arquitecturas de ahorro energético. La vida de las baterías limita las capacidades de los dispositivos.

Por otro lado, los escáneres modernos de ultrasonido son capaces de producir imágenes de las estructuras anatómicas con gran detalle. Estos utilizan ondas sonoras de alta frecuencia para observar los tejidos blandos, así como músculos y órganos internos. Una imagen de *beamforming* (conformación de haces) es una tecnología de procesamiento de señal que se utiliza para dirigir la recepción o transmisión de un haz de una matriz de transductores con una orientación angular elegida de transmisión de ondas sonoras de alta frecuencia, y la generación de imágenes utilizando ecos. El *beamforming* puede aumentar sus unidades a través del rendimiento gráfico de procesamiento (GPU). Sin embargo, hoy en día, el rendimiento por vatio y el consumo de energía se ha planteado como una medida importante para la evaluación de la eficiencia de una GPU.

Actualmente los escáneres de ultrasonido son muy pequeños como para ser portable, incluso un dispositivo de tableta portátil. El uso eficiente de energía en estos dispositivos portátiles es importante, ya que afecta la vida de la batería. Una nueva gama de posibilidades se puede realizar con herramientas como OpenCL en dispositivos móviles basados en Android.

La potencia de las GPU no se limita solo al procesamiento gráfico, esta refleja la intención de procesos de alto rendimiento que se realizan en la GPU. Sin embargo, en los últimos diez años o más, los desarrolladores e ingenieros han logrado adaptar la potencia de procesamiento de las GPU para propósitos de cálculos más generales. Esta mejora está motivada por su máximo rendimiento teórico, que supera con creces la de las CPU. No obstante, las GPU todavía se consideran como altamente consumidoras de energía y han sido cuestionables su liderazgo de diseño en computación de alto rendimiento. Hoy en día, representa solo una pequeña fracción del consumo total de energía, en torno al 2%. Sin embargo, este consumo está creciendo muy rápido, a un ritmo de dos dígitos por año [1]. La batería es una de las principales preocupaciones para los dispositivos móviles en cuanto a la gestión de los costos, energía / enfriamiento, que domina gran parte del costo de los equipos en los centros de datos. En la actualidad, muchas aplicaciones de datos paralelos utilizan unidades gráficas de procesamiento para alcanzar aceleraciones impresionantes, en el rango de 100X para muchas aplicaciones. Las tecnologías de información

representan solo una pequeña fracción del consumo total de energía, en torno al 2%. Sin embargo, este consumo está creciendo muy rápido, a un ritmo de dos dígitos por año [1]. Tienen consumos de energía de hasta 300W [2]. El consumo de energía de un GPU típico es también mucho más alta que la de una CPU multinúcleo. Por ejemplo, la GPU NVIDIA Tesla consume más de 250 Watts en carga pico, más del doble del consumo de potencia pico de una CPU multinúcleo. Ren [3] y Huang [4] demuestran que la eficiencia energética de las GPU es alta en comparación con las CPU de núcleos en una operación de multiplicación de matriz.

Existen pocos estudios sobre los efectos especiales de la tecnología, con conciencia en el uso de energía en las GPU. El pionero en la conservación energética en GPU es Hong [5]. Él utiliza el análisis de código PTX para predecir los ciclos de ejecución del núcleo de la GPU y estimar el consumo de energía por núcleo. Él propone utilizar menos SM (Stream Multiprocesor) cuando sea posible para reducir el consumo de energía de la GPU.

Jiao [6] ha estudiado el rendimiento y potencia de tres kernel sobre una GPU ejecutándose en una NVIDIA GeForce GTX 280, con diferentes procesadores y frecuencias de memoria en diferentes núcleos. Él observó que al aumentar la frecuencia de la GPU se mejora el rendimiento, excepto para aplicaciones que implican principalmente acceso a la memoria. Para aquellas aplicaciones que no requieren una gran cantidad de acceso a memoria, la reducción en el consumo de energía es solo del 5%, con una mejora relativa en la eficiencia de energía de solo el 4%.

ABE [7], informó que cambiando el voltaje y la frecuencia de la GPU se logra reducir el consumo de energía en un 28%, en un sistema que realiza una multiplicación de una matriz 64 x 64 con un incremento de frecuencia sobre la memoria en una NVIDIA GeForce GTX 480.

Rong Ge [8], ofrece varias métricas para evaluar el impacto de la GPU, rendimiento, potencia y energía. En este estudio se concluye que un mayor ajuste en el Voltaje Dinámico y Escalado de Frecuencia (DVFS, Dynamic voltage and frequency scaling) de la GPU es óptima en términos de rendimiento y eficiencia energética.

Dos importantes contribuciones en el análisis de potencia y rendimiento de la GPU, usando un simulador, son suministrados por Wilson WL Fung y JinwenLeng

[9]. Wilson WL Fung en el Manual de GPGPU-Sim [10], en el cual proporcionan una amplia información sobre el modelo implementado en la microarquitectura GPGPU-Sim. JinwenLeng integra GPU-Wattch y GPGPU-Sim y demuestra el ahorro de energía mediante la variación de voltaje y frecuencia de escalamiento dinámico (DVFS). Sus aportes, son una referencia básica para nuevas investigaciones, que suministran una buena guía experimental sobre la validación de modelos de energía sobre GPU. También ofrecen un buen ejemplo de cómo validar el modelo de energía que puede ser utilizada para estudios de *software* de eficiencia energética. El modelo es configurable, capaz de realizar cálculos a nivel de ciclo y se puede validar cuidadosamente contra el soporte físico real.

El objetivo de esta investigación es observar cómo la energía (E) varía en función de esas variables. Por ejemplo, para la CPU en general, se cree que con una tensión fija, utilizando frecuencias de procesador se reduciría la energía debido a un menor tiempo de ejecución. Sin embargo, esto no siempre es cierto para las GPU. Se trata de un problema de investigación interesante el encontrar la frecuencia de base óptima que puede ahorrar la mayor cantidad de energía para una aplicación particular, especialmente cuando se requiere alta intensidad operativa.

Este trabajo describe el análisis de rendimiento y consumo de energía de *Beamforming* para un solo frame (un solo cuadro de imagen). El mismo se organiza de la siguiente manera: la arquitectura de la GPU, la arquitectura del modelo de programación CUDA, la arquitectura del simulador GPGPU-Sim, la GPU para uso en imágenes médicas, *beamforming*, la estructura de nuestro código de prueba en *beamforming*, resultados y conclusiones.

2. Arquitectura GPU

En la micro arquitectura GPU, los núcleos están conectados a controladores de memoria usando una red de interconexión en *chip* y fuera de *chip*, mediante una matriz de celdas de memoria que se comunican con los núcleos a través de controladores en *chip*. La arquitectura NVIDIA Fermi contiene hasta 16 multiprocesadores de flujo. En cada multiprocesador de flujo (SM, StreamvMultiprocesador), hay varios núcleos en orden, cada una de los cuales se conocen como procesadores de

flujo (SP, StreamvProcessors). Cada SP tiene una unidad aritmética lógica y una unidad de punto flotante que puede ejecutar instrucciones en hilos, por ciclo de reloj. El número de SP por SM varía con las generaciones de GPU. Cada SM posee una caché de instrucciones, una caché de memoria constante, una memoria compartida, registros, instrucción multihilo y unidades funcionales especiales. Cada GPU, actualmente viene con 4 *gigabytes* de memoria gráfica de velocidad doble (GDDR) DRAM, conocido como memoria global. Cada SM cuenta con dieciséis unidades de carga / almacenamiento y cuatro unidades de funciones especiales (SFU). Un conjunto puede contiene 32 hilos paralelos, ejecutando una sola instrucción sobre múltiples datos (SIMD). Dos o más SM se agrupan para compartir una única unidad de procesamiento de textura y caché L1 entre el SM. Una red de interconexión en el *chip* conecta diferentes SM al caché de memoria y a controladores L2. Además de la memoria principal de la CPU, la GPU tiene su propia memoria (fuera de *chip*), que está conectada a los controladores de memoria en el *chip*. La CPU y la GPU están en diferentes *chips*, y se comunican a través de la PCIe o PCI Express tal como se observa en la figura 1.

La memoria de la GPU está organizada en forma jerárquica: memoria global, caché de textura, caché constante, memoria compartida y registros.

Una GPU tiene cuatro variables escalables: la frecuencia del núcleo, voltaje del núcleo, frecuencia DRAM de E/S, y voltaje DRAM [8]. Los equipos modernos son principalmente afectados por el procesador y la memoria.

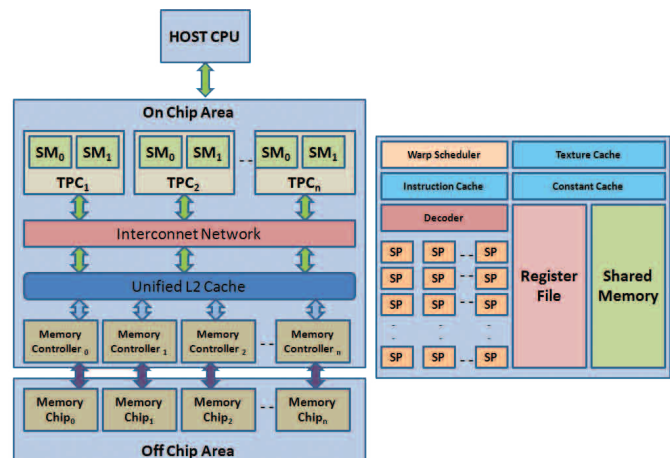


Figura 1. Arquitectura de la GPU.

Estos dos elementos tienen un fuerte efecto en el tiempo de respuesta y los accesos de memoria de la computadora. Por lo tanto, se hace necesario considerar lo más importante, el rendimiento o la potencia. El problema se incrementa si nos movemos al campo de la computación móvil, donde los dispositivos cuentan con poca carga energética y requieren tiempos de respuestas que exceden los niveles de las computadoras de escritorio, limitando las capacidades de esos dispositivos.

3. Arquitectura CUDA

CUDA, Arquitectura Unificada de Dispositivos de Cómputo por sus siglas en inglés (Compute Unified Device) es un modelo y plataforma de programación creado por NVIDIA y ejecutado en las unidades de procesamiento gráfico (GPU) que fabrican. El lenguaje de programación es conocido como CUDA C / C++ para la computación de propósito general, y es una extensión del lenguaje de programación C / C++.

Usando CUDA, miles de hilos en paralelos y concurrentes pueden ser lanzados por la CPU y agrupados en una entidad de ejecución denominada bloque. Un programa CUDA consiste en una o más fases que se ejecutan, ya sea en el anfitrión (CPU) o un dispositivo (GPU). La arquitectura CUDA consta de tres partes básicas: el grid, el bloque y los hilos tal como se observa en la figura 2.

Un hilo de CUDA es solo la ejecución de una función llamado kernel o núcleo, con un índice dado. Cada hilo utiliza su índice para acceder a elementos en un arreglo. El chip de la GPU se organiza como una colección de multiprocesador (MP), cada uno responsable del manejo de uno o más bloques en una cuadrícula. Un bloque, es simplemente un grupo de hilos de ejecución simultánea en ningún orden en particular, que es coordinar de alguna manera mediante el uso de funciones de sincronización. Los diferentes bloques se agrupan en una entidad llamada grid con ninguna sincronización entre los bloques. Durante la ejecución, un bloque se asigna a un SM determinado. Los bloques que se ejecutan en diferentes SM no pueden comunicarse entre sí.

Sobre la base de los recursos disponibles en un SM, uno o más bloques se pueden asignar al mismo SM. Todos los registros del SM se asignan a los diferentes hilos de diferentes bloques.

En la GPU, los hilos se ejecutan basados en un modelo denominado SMIT, es decir, una sola instrucción sobre múltiples datos. Las peticiones se agrupan en unidades de carga y almacenamiento, dentro de un paquete de memoria independiente con patrones de acceso. Así, la memoria mejora su rendimiento al ocultar los accesos pequeños de memoria en accesos más grande. Este fenómeno se denomina coalescencia de memoria, donde los hilos se ejecutan de manera sincronizada.

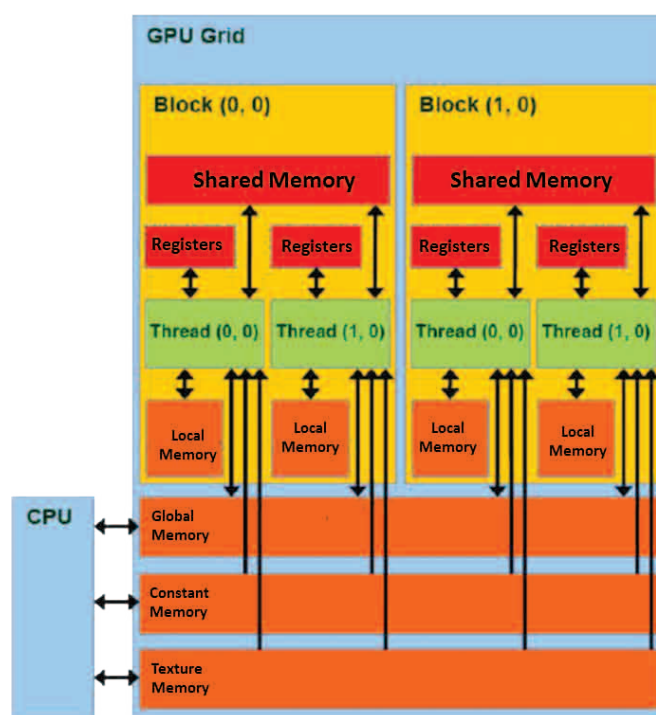


Figura 2. Arquitectura CUDA GPU.

4. Arquitectura de GPGPU-Sim

GPGPU-Sim es un simulador de rendimiento de nivel de ciclo detallado para GPU, integrado con GPUWatch para predicción energética de ciclo a ciclo que puede ejecutar CUDA u OpenCL. GPGPU-Sim se desarrolla en la Universidad de British Columbia y ofrece resultados estadísticos detallados, tales como permitir la más amplia gama de opciones de diseño y simulación. GPGPU-Sim informa sobre los ciclos en la GPU que está ocupando, no modela los tiempos en la CPU o el momento de transferencia sobre la PCI Express (es decir, el tiempo de transferencia de memoria entre la CPU y la GPU) [10]. La arquitectura modelada en GPGPU-Sim es una arquitectura Fermi, que constituye una completa plataforma para la investigación y optimización del rendimiento y la energía.

GPGPU-Sim utiliza el modelo de una sola instrucción sobre múltiples datos (SIMT) que ejecutan lotes de hilo en un mismo paso. Estos núcleos están acoplados a través de una conexión de red en chip a particiones de memoria GDDR DRAM. Una estructura de pipeline (tubería), SIMD altamente multihilo (NVIDIA llaman Corriente multiprocesador o SM), es modelada por la organización GPGPU-Sim. La organización de un núcleo SIMT se describe en la figura 3 y muestra la arquitectura general de GPGPU-Sim.

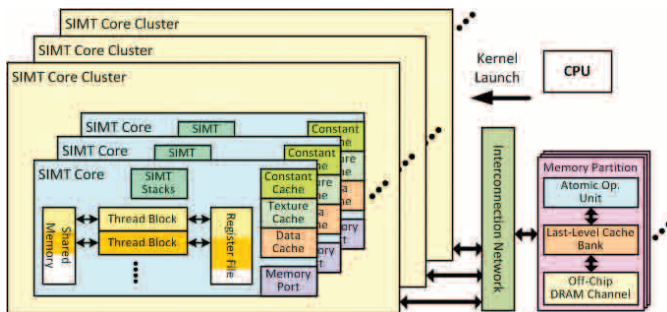


Figura 3. Arquitectura general modelada por GPGPU-Sim.

GPGPU-Sim soporta cuatro dominios de reloj independientes: a nivel de núcleo, interconexión de red, reloj y caché L2. Los valores de ese dominio pueden ser cambiados arbitrariamente (sin dependencia entre ellos). También, GPGPU-Sim logra integrar a GPUWatch, creando una fusión de estructura perfecta de rendimiento y energía para optimizar arquitecturas multinúcleo. La figura 4 muestra la estructura de GPGPU-Sim / GPUWatch integrada en una sola estructura.

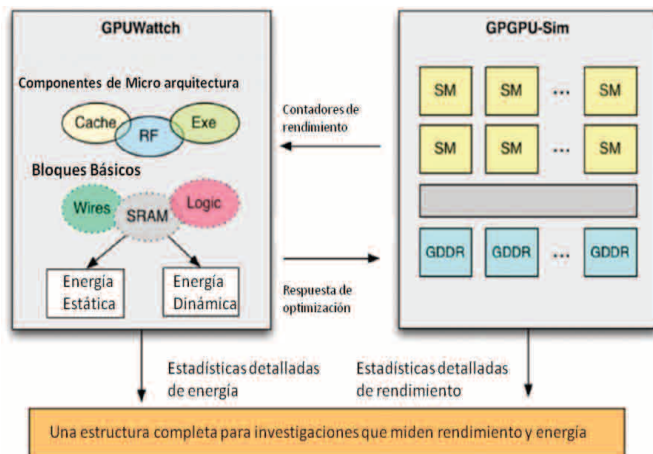


Figura 4. Estructura GPGPU-Sim / GPUWatch.

GPGPU-Sim, ofrece dos tipos de simulación: funcional y de rendimiento. En la simulación funcional, se simula la arquitectura general mientras que en la simulación de rendimiento se simula el tiempo de ejecución de informes por ciclo mediante la ejecución de los núcleos de CUDA.

5. GPU para imágenes médicas

El ultrasonido ha sido una técnica de imagen médica muy popular durante muchos años. Las unidades de procesamiento gráfico (GPU) son hoy en día utilizados en una variedad de tecnologías para imágenes médicas. El uso de la GPU en este campo ha madurado hasta el punto de que hay varias modalidades médicas que soportan los GPU Tesla [11].

Todos estos desarrollos se han orientado hacia el apoyo de gráficos en tiempo real, los cuales toman ventajas de estos procesadores para obtener considerables beneficios de rendimiento en la operación de análisis de imágenes. Las GPU rápidamente se han transformado de un dispositivo especializado a un elemento de cálculo de gran alcance.

El ultrasonido es una de las técnicas de imagen más utilizadas que permiten al médico ver el interior del cuerpo de un paciente para el diagnóstico y la intervención mediante imagen guiada, libre de radiación, no invasiva y en modalidad de tiempo real de imagen. Los ultrasonidos son ondas longitudinales que causan una oscilación hacia atrás y hacia adelante y que producen una serie de compresiones y refracciones [12]. Las imágenes se producen cuando las ondas de sonido se dirigen hacia el cuerpo y se refleja de regreso a un escáner que los mide. Cada línea de exploración es producida por un pulso de ultrasonido. Los impulsos reflejados se registran, y la amplitud y el tiempo de los impulsos devueltos dan una imagen de la estructura del tejido a lo largo de la trayectoria del haz. El Modo de brillo (B-Mode) es el modo básico que se utiliza generalmente y que es utilizado en esta investigación.

6. Beamforming

Las ondas de ultrasonido para diagnóstico transportan información sobre el cuerpo de regreso al sistema de imagen [13]. El modo B-Mode, produce una imagen en dos dimensiones, blanco y negro. El cuerpo puede ser dibujado en diferentes planos dependiendo de la posición de la sonda.

Beamforming es una técnica de procesamiento de señal utilizado para controlar la direccionalidad de la recepción o transmisión de una señal en una matriz de transductores [14]. El pulso de ultrasonido se transmite desde un transceptor que tiene una serie de pequeños elementos piezoeléctricos. Cada elemento puede transmitir y recibir impulsos de ultrasonidos de forma independiente a otros elementos. Los elementos transceptores individuales serán afectados por los pulsos que se reflejan de vuelta y se guardan en diferentes momentos en función de su origen.

El *beamforming* que se recibe, retarda las señales de cada canal (elemento), de manera que se sincronizan las señales generadas por los pulsos. Cuando se transmite el pulso, solo es posible centrarse en un punto dado y cuando se recibe, el retraso se puede ajustar de forma dinámica para centrarse en todos los puntos a lo largo del haz. La tecnología GPU ha ido en aumento y ha superado a la CPU tan rápido, que ahora podría ser posible llevar a cabo la formación de haz en *software*.

7. Estructura del código de *beamforming*

El B-Mode convencional consiste en una serie de pasos: adquisición de datos RF, la formación de haz, demodulación en cuadratura, detección envolvente, compresión logarítmica y generación de imagen. Nuestra imagen B-Mode implementa el algoritmo en tres núcleos a los que se han llamado: *delay_intpol*, *quad_demod*, *env_detect*. Todos los núcleos son limitados en memoria y directamente afectados por la arquitectura de memoria (bus de memoria, tamaño de caché y ancho de banda de memoria) [15].

Pinned memory es utilizada con el fin de evitar el intercambio con la memoria de la CPU. Esto proporciona velocidades de transferencia mejoradas.

El *kerneldelay_intpol* ejecuta el cálculo por retardo y filtrado de interpolación, el cual es una parte esencial de la formación del *beamforming* que calcula las diferencias en el tiempo de llegada de la onda entre los elementos de la matriz. Mientras que el filtrado de interpolación proporciona una serie de filtros con el fin de construir nuevos puntos de datos dentro de la gama de un conjunto discreto de puntos de datos conocidos. El pulso transmitido desde cada componente transductor independiente, determina la forma del haz donde el cálculo de retardo depende de la posición de un punto focal en el mismo tiempo.

La memoria constante se utiliza debido a que los hilos deben leer varias veces la misma dirección de memoria. La salida del *kerneldelay_intpol*, es el punto central que contiene el índice de dirección de memoria para los valores pares e impares.

El *kernelquad_demod* recibe del *kerneldelay_intpol* los datos como parámetro de entrada, que es la señal de *beamforming* después de realizada la suma de todos los pulsos de señal en todos los canales. El resultado es almacenado en memoria compartida y debido a su ubicación, la latencia es menor que en un *buffer* típico. Durante el proceso de demodulación de cuadratura, la señal es convertida a una banda base y en señales de cuadratura.

En el *kernelenv_detectkernel*, todos los I/Q son combinados en una imagen B-Mode para obtener la señal de envoltura. El I/Q utiliza un filtro de paso bajo que se combina para producir una data envolvente. Este kernel, también utiliza memoria compartida para la entrada de datos así como memoria constante. La salida de este kernel es enviado de regreso al CPU para mostrar la imagen. Otras tareas como comprensión logarítmica, conversión de escaneo y formación de imagen se realizan del lado del CPU.

8. Experimentación y resultados

Para esta investigación se ha utilizado GPGPU-Sim, un simulador de rendimiento a nivel de ciclo para la computación GPU y para la estimación de energía con GPUWatch, el cual está integrado a GPGPU-Sim. El simulador está configurado para que coincida con una arquitectura GTX470 con frecuencias reducidas a la mitad en los pasos: 600, 800, 1000 y 1200MHz (núcleo) y 900 MHz (memoria) para un total de 9 diferentes SM, variando de 12SM y 20SM. Para configurar correctamente nuestro ambiente, es necesario modificar ciertos parámetros en tres archivos diferentes del simulador: en GPGPU-SIM (*gpgpusim.config*), en GPUWATTCH (*gpuwattch_gtx480.xml*) y la Red de interconexión (*config_fermi_islip.icnt*).

GPGPU-sim ofrece una serie de estadísticas de rendimiento que ponen a disposición una buena comprensión de cómo la aplicación CUDA se ejecuta con la arquitectura de un GPU simulado. El contador de ciclo *global.gpu_tot_sim_cycle*, es compartida por todos los núcleos SIMT y muestra el número de ciclos simulado para todos los núcleos lanzados hasta el momento.

Después de cada simulación del núcleo, se añade el valor de `gpu_sim_cycle` a `gpu_tot_sim_cycle`. Si solo hay un núcleo, será lo mismo al final de la simulación. Si hay varios lanzamientos del kernel, `gpu_tot_sim_cycle` será la suma de todos `gpu_sim_cycle` por lanzamientos del kernel.

Aquí se evalúa el rendimiento, consumo de energía, tiempo de ejecución y la eficiencia energética de diferentes situaciones:

En primer lugar, el código CUDA para *Beamforming* está configurado para adaptarse a 224, 112 y 56 líneas de escaneo con el fin de observar su comportamiento con 15SMs, con un reloj fijo de 1.200 MHz y un reloj de memoria fija de 900 MHz.

En segundo lugar, se ha variado la frecuencia de reloj de 400MHz a 1200MHz y desde 12SMs a 20SMs con un reloj de memoria fija a 900MHz para investigar el impacto de agregar más SMS a la GPU, sobre la frecuencia de reloj del núcleo.

En tercer lugar, se ha variado la frecuencia de memoria entre 400 MHz y 1200 MHz a fin de investigar el impacto de la memoria sobre la GPU. En este experimento, se ha configurado un conjunto de 15SMs con GPGPU-Sim. También se ha investigado el impacto cuando se utiliza paginación o no paginación.

La formación de *beamforming* consta de 224 líneas de exploración. Como se muestra en la figura 5, el número de ciclo varía según el número de línea de exploración debido a la carga de trabajo.

Para examinar el impacto de DVFS, cuatro clases de métricas se utilizan en esta investigación:

- Rendimiento: es la cantidad de trabajo ejecutado por un sistema informático en comparación con el tiempo cumplido para ejecutar esa tarea.
- Potencia: describe el consumo de energía por unidad de tiempo y se mide en vatios.
- Energía: se define como la habilidad o la capacidad para hacer el trabajo.
- Eficiencia energética: es un indicador combinado de rendimiento y potencia. En la física, la energía se define como la cantidad de trabajo que puede ser realizado por la fuerza y se mide en Julios.

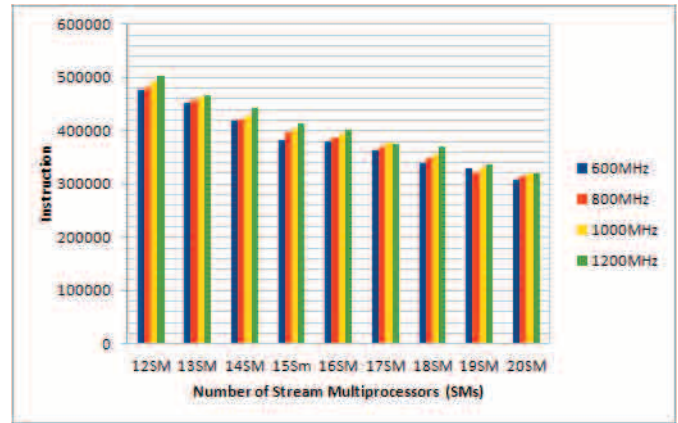


Figura 5. Rendimiento en *beamforming*.

El experimento muestra una escalada del SM 12 al SM 14 en cuatro frecuencias de reloj diferentes. La figura 6 muestra el rendimiento de la conformación del haz y la relación de la variación del número de SMS, así como la frecuencia de reloj. El impacto de este ajuste mejora el tiempo de ejecución, pero en detrimento de la conservación de la energía, como se muestra en la figura 7.

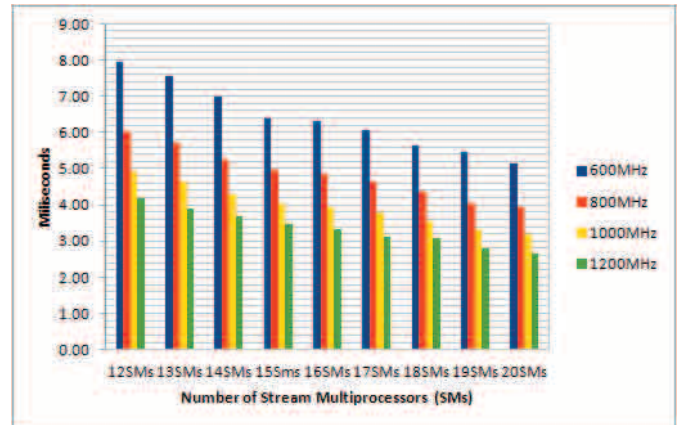


Figura 6. Tiempo de ejecución de *beamforming*.

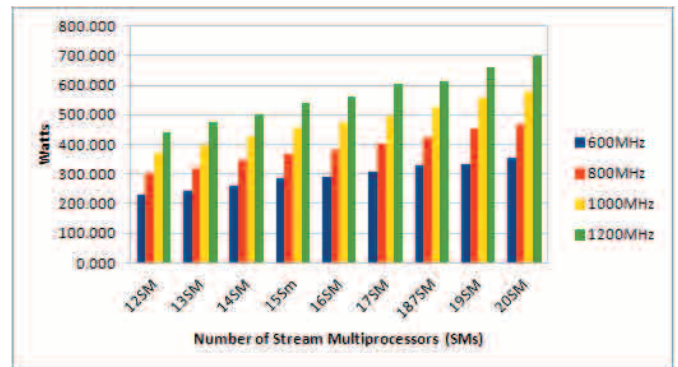


Figura 7. Consumo energético en *beamforming*.

La potencia y rendimiento viene dado por GPGPU-Sim. La eficiencia de energía se calcula según la siguiente ecuación propuesta por Ed Grochowski [16]:

$$\frac{\text{Joules}}{\text{Instructions}} = \frac{\left(\frac{\text{Joules}}{\text{Instructions}}\right)}{\left(\frac{\text{Instructions}}{\text{Second}}\right)} = \frac{\text{Watt}}{\text{IPS}} \quad (1)$$

y su gráfico correspondiente se muestra en la figura 8.

Cuando se reduce el número de línea de exploración y se mantiene la configuración anterior, se observa que el tamaño del problema disminuye, pero el consumo de energía se mantiene casi igual.

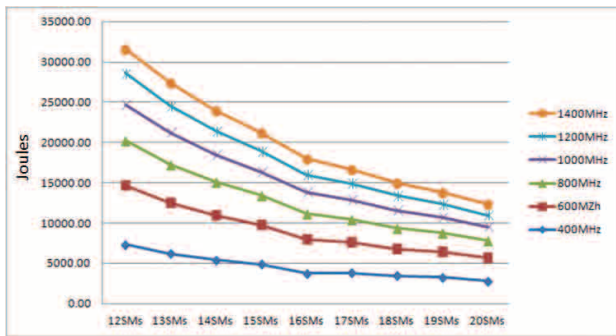


Figura 8. Eficiencia energética en *beamforming*.

Teniendo en cuenta el rendimiento, tiempo de ejecución y el consumo, una buena configuración para nuestra formación de haz es un conjunto de 17SM funcionando a una frecuencia de reloj de 800 MHz. Esta configuración consume un promedio de 401 vatios en un tiempo de 4 ms. El análisis de componentes de energía muestra que los 5 componentes más consumidores de energía son el registro de archivo (REF), FPUP (Unidad de Punto Flotante), SFUP (Unidad Flotante Especial), PIPE y NOCP (Red en Chip) como se muestra en la figura 9. Este dato es proporcionado por `gpgpusim_power_trace_report.log.gz`

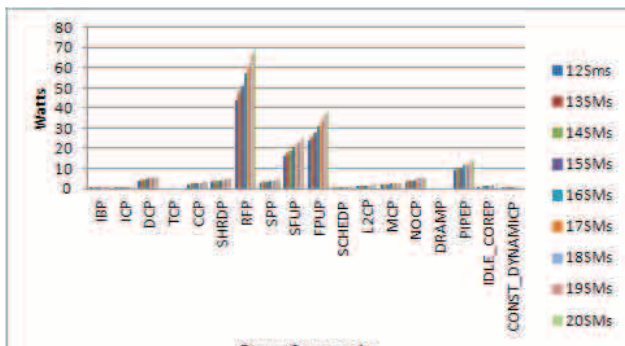


Figura 9. Consumo energético por componentes.

9. Conclusión

Escalar el número de SM y la frecuencia del núcleo no logra una ganancia sobre la energía. La combinación de SM y la frecuencia de reloj producen como resultado un alto consumo de energía para la aplicación de *beamforming*. Sin embargo, podemos observar que aumentar el número de SM a una frecuencia de reloj baja puede lograr conservar mejor la energía y mantener un buen rendimiento. El uso de GPU en la próxima generación de sistemas de ultrasonido es prometedor. Además, la portabilidad tecnológica que posee procesadores de múltiples núcleos permite la paralelización. Las imágenes en sistemas de ultrasonido deben ser de bajo consumo energético, bajo costo, portables, de fácil programación y flexible.

En conclusión, se recomienda un *overclock* de la GPU y la memoria individualmente para aislar cualquier inestabilidad que se puede introducir en ese componente en particular. Una vez que la frecuencia máxima es conocida, la GPU y la memoria se pueden configurar a esas velocidades simultáneamente y luego, se debe realizar una prueba de estabilidad una vez más.

10. Referencias

- [1] Michel Bénard: "Energy Efficient HPC in Metropolitan Environments," in International Conference on Energy-Aware High Performance Computing, Hamburg, 2010.
- [2] David Defour: Arnaud Tisserand, and Sylvain Collange, "Power Consumption of GPUs from a Software Perspective," in ICCS '09 Proceedings of the 9th International Conference on Computational, Berlin, 2009, pp. 914-923.
- [3] Reiji Suda and Da Qi Ren: "Power Efficient Large Matrices Multiplication by Load Scheduling on Multi-core and GPU Platform with CUDA," in IEEE CSE'09, 12th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering, Vancouver, 2008, pp. 424-429.
- [4] S. Huang, S. Xiao, and W. Feng: "On the Energy Efficiency of Graphics Processing Units," in Parallel & Distributed Processing, 2009. IPDPS 2009. IEEE International Symposium on, Rome, 2009, pp. 1-8.
- [5] Sunpyo Hong: "Modeling performance and power for energy-efficient GPGPU computing," Georgia Institute of Technology, Tesis Doctoral 2012.
- [6] Y. Jiao, H. Lin, P. Balaji, and W. Feng: "Power and Performance Characterization of Computational Kernels on the GPU," in Green

- Computing and Communications (GreenCom), 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing (CPSCoM), Hangzhou, 2010, pp. 221 - 228.
- [7] Y. Abe; H. Sasaki; S. Kato; K. Inou; M. Edahiro; M. Peres: "Power and Performance Characterization and Modeling of GPU-Accelerated Systems," in HotPower'12 Proceedings of the 2012 USENIX conference on Power-Aware Computing and Systems, Berkeley, 2012, p. 10.
- [8] Rong Ge, Ryan Vogt, Jahangir Majumder, and Arif Alam: "Effect of Dynamic Voltage and Frequency Scaling on K20 GPU," in Parallel Processing (ICPP), 2013 42nd International Conference on, Lyon, 2013, pp. 826 - 833.
- [9] Leng, J.; Hetherington, T.; Tantawy, A E; Gilani, S; Kim, N.; Aamodt, T.; Reddi, V. (2013) GPUWattch Energy Model Manual. <http://www.gpgpu-sim.org/gpuwattch/>
- [10] Wilson W.L. Fung, Tayler H. Hetherington Tor M. Aamodt. (2012) GPGPU-Sim. http://gpgpu-sim.org/manual/index.php/Main_Page
- [11] NVIDIA. High Performance Computing. Vertical Industry Solutions. http://www.nvidia.com/object/medical_imaging.htm
- [12] James A. Zagzebski: Essentials of Ultrasound Physics, New Edition ed.: Elsevier Health Sciences, 1996.
- [13] Thomas L. Szabo: Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out, 1st ed. London: Elsevier Academic Press, 2004.
- [14] Andrew A. Ganse. An Introduction to Beamforming. <http://research.ganse.org/physics/beamforming/>
- [15] Paweł Gepner and Michał F. Kowalik: "Multi-Core Processors: New Way to Achieve High System Performance," in Parallel Computing in Electrical Engineering, 2006. PAR ELEC 2006. International Symposium on, Białystok, 2006, pp. 9-13.
- [16] Ed Grochowski and Murali Annavaram. (2006, Marzo) Energy per Instruction Trends in Intel Microprocessors. <http://www.intel.com/pressroom/kits/core2duo/pdf/epi-trends-final2.pdf>

Acero microaleado experimental sometido a tratamientos térmicos de revenido y su efecto sobre la fragilización por hidrógeno

Experimental microalloyed steel subjected to tempering heat treatments and its effect on hydrogen embrittlement

Julio C. Villalobos¹, Sergio A. Serna², Bernardo Campillo³, Osvaldo Flores⁴, Edgar López⁵

^{1,2}Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Col. Chamilpa 1001. C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos.

^{3,3}Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

⁴Instituto de Ciencias Físicas, UNAM, Campus Morelos. Col. Chamilpa 1001. C.P. 62209, Cuernavaca Morelos.

⁵Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, México.

¹julio.villalobos@uaem.mx, ²aserna@uaem.mx, ³bci@fis.unam.mx, ⁴osvaldo@fis.unam.mx⁴, ⁵edgar0902@yahoo.com.mx⁵

Resumen— La influencia del tiempo y temperatura de revenido en la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno, fue evaluada en un acero microaleado experimental. Los tratamientos térmicos de revenido se llevaron a cabo en un intervalo de temperaturas de 200 a 600 °C con diferentes tiempos. El proceso de cargado catódico de hidrógeno se realizó en una solución de H_2SO_4 , utilizando una densidad de corriente de 40 mA/cm² durante una y 12 horas de exposición. La susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno y su efecto sobre las propiedades mecánicas del acero fue evaluado en las distintas condiciones de tratamientos mediante ensayos de tensión. Además, se llevaron a cabo ensayos de permeabilidad de hidrógeno para determinar los coeficientes de difusión efectivos (D_{eff}). Los resultados mostraron que las propiedades mecánicas disminuyen en sus valores de resistencia a la tracción (UTS) y límite elástico (YS) con un mayor tiempo de exposición de cargado catódico de hidrógeno, sin tener una tendencia definida con el tiempo y la temperatura de tratamiento térmico.

Palabras claves— Acero microaleado, fragilización por hidrógeno, tratamientos térmicos.

Abstract— The influence of both, time and annealing temperature over the susceptibility to hydrogen embrittlement was evaluated in experimental microalloyed steel. Tempering heat treatments were carried out in a temperature range of 200-600 °C with several heat treatment times. They were hydrogen charged cathodically in a solution of H_2SO_4 , using a current density of 40 mA/cm² during 1 and 12 hours of exposure. Susceptibility to hydrogen embrittlement and its effect on the mechanical properties in different treatment conditions were evaluated by tensile test. Also, were conducted hydrogen permeability tests to determine effective diffusion coefficients (D_{eff}). The results showed that the mechanical properties decrease in ultimate tensile strength (UTS) and yield stress (YS) values as function of charging cathodic hydrogen times, without a clear trend over time and temperature heat treatment.

Keywords— Microalloyed steel, hydrogen embrittlement, Heat treatment.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 13 de noviembre de 2015

Fecha de aceptación: 7 de abril de 2016

1. Introducción

Los aceros microaleados se caracterizan por sus bajos contenidos de C y la utilización de elementos microaleantes, como son el Nb, el Ti, el V y el Al en muy pequeñas cantidades para alcanzar valores de límite elástico (YS) mayores a los 700 MPa una vez laminados en caliente o al ser normalizados [1]. La combinación de propiedades mecánicas es lo que realmente hace especial a este grupo de aceros, pueden alcanzar al mismo tiempo una alta resistencia (< 800 MPa) y tenacidad debido a su proceso de laminación controlada en caliente conocido como proceso termomecánico

(TMCP) [2]. Debido a su bajo contenido de C esta clase de acero tiene una muy buena soldabilidad la cual posibilita su uso como acero estructural, para la construcción de tuberías para el transporte de hidrocarburos, etc.

Los aceros microaleados son susceptibles al tratamiento térmico de revenido, para el aumento de tenacidad o para el ajuste de las propiedades mecánicas finales sin comprometer sus niveles de resistencia adquiridos durante el TMCP y no afectar su microestructura. Los efectos del revenido dependen del tiempo y la temperatura de tratamiento.

Por otro lado, el hidrógeno tiene diversos efectos sobre los aceros microaleados. Generalmente en detrimento de sus propiedades mecánicas. Entre estos efectos el hidrógeno puede ocasionar fisuras internas por presión de hidrógeno, pérdida de ductilidad, corrosión bajo tensión

y falla por debajo del límite de fluencia del material [3]. Estos efectos pueden incrementarse debido a la presencia de esfuerzos residuales y/o microestructuras susceptibles. Es una práctica común que en la industria se minimice la posible absorción de hidrógeno en el ambiente durante este tipo de procesos, para evitar su fragilización que se produce debido a un proceso de absorción y difusión del hidrógeno, cuando este se incorpora en la red cristalina de forma permanente o temporal. El objetivo principal de este trabajo es evaluar los efectos de fragilización por hidrógeno en un acero microaleado experimental sometido a tratamientos térmicos de revenido sobre sus propiedades mecánicas, y así como determinar los parámetros de permeabilidad de hidrógeno.

2. Materiales y métodos

El acero microaleado experimental utilizado para el presente trabajo fue procesado termomecánicamente como se menciona a continuación. Se partió de una placa con un espesor de 4.4 cm, 15 cm de largo y 5 cm de ancho. Se recalentó a 1250 °C a una velocidad de calentamiento de 0.4 °C/seg, se mantuvo por 90 minutos y luego se laminó en caliente. Se deformó a esta temperatura un 50% hasta concluir aproximadamente a los 920 °C, hasta un espesor 2.2 cm; posteriormente a esta temperatura se inició la segunda deformación en caliente hasta obtener un espesor de 1.1 cm y se enfrió a temperatura ambiente. Se recalentó a 950 °C y se templó en agua.

Para determinar su composición química se realizó una prueba de espectroscopía de emisión de chispa; el resultado de estos análisis se muestra en la tabla 1. Se puede observar un bajo contenido de C y la presencia de elementos microaleantes como son Nb, Ti, Mo y Cr. De estos elementos, principalmente el Nb y el Ti tienen una fuerte tendencia a formar carburos y/o carbonitruros que precipitan en la matriz del acero durante el proceso termomecánico y al ser sometidos a tratamientos térmicos, modificando así sus propiedades mecánicas finales.

Tabla 1. Composición química en % en peso

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	Ti
.027	.244	1.00	.003	.005	.422	.180	1.35	.045	.024	.015

El acero en condición de recepción fue sometido a tratamientos térmicos de revenido en temperaturas de 200, 400 y 600 °C en tiempos de permanencia de 1, 3 y 10

minutos. La selección de tiempos de revenido cortos en este rango de temperaturas, se debió a que en el presente trabajo se pretendía observar la respuesta de la microestructura de recepción presente después del proceso termomecánico en lapsos cortos de tiempo en el rango de temperaturas, para observar si a través de estos tiempos era posible detectar cambios en los carburos presentes y su efecto en las propiedades mecánicas y en su comportamiento ante la presencia de hidrógeno. Por lo que, el objetivo de realizar estos tratamientos fue el de evaluar el efecto de los precipitados presentes conformados por los elementos microaleantes sobre las propiedades mecánicas de un acero microaleado experimental y su susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno.

Una vez realizados los tratamientos térmicos, el acero fue sometido a carga catódica de hidrógeno utilizando una solución de 0.5 M de H₂SO₄ + 0.2 gr de As₂O₃ durante una y 12 horas, aplicando una densidad de corriente de 40 mA/cm² (ver figura 1).

Se realizaron ensayos de tracción de acuerdo a la Norma ASTM-E8 [4] para determinar la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno y el cambio de las propiedades mecánicas en función del tiempo de carga catódica.

Para determinar los coeficientes de permeabilidad, velocidad de difusión, concentración aparente y flujo de hidrógeno en los aceros tratados, se llevaron a cabo ensayos de permeabilidad de acuerdo a la Norma ASTM-G148 [5].

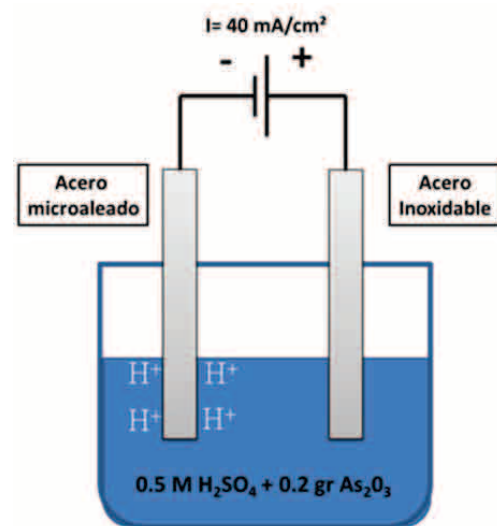


Figura 1. Esquema del cargado catódico de hidrógeno en el acero microaleado, en tiempos de 1 a 12 horas.

La técnica electroquímica para medir la permeabilidad de hidrógeno fue originalmente desarrollada por Devanathan y Stachurski [6], esta fue empleada para determinar los coeficientes de difusión efectivos (D_{eff}) a través de láminas de 1 mm de espesor del acero microaleado en condición de recepción y con tratamiento térmico de revenido.

Estas láminas fueron recubiertas con Pd solo por el lado expuesto a la celda de detección, esto con la finalidad de evitar la oxidación de las mismas y así permitir la difusión de hidrógeno atómico a través de la lámina; fueron colocadas en la parte central de la celda de permeabilidad y conectada a un potencióstato Gill AC, como se muestra en la figura 2.

La celda de carga (reducción) fue galvanostáticamente polarizada a una densidad de corriente constante (40 mA/cm²) en una solución de 0.5 M H₂SO₄ con la adición de 0.2 gr de As₂O₃ para promover la entrada de hidrógeno atómico. La celda de detección (oxidación) fue mantenida a un potencial constante de +300 mV respecto a un electrodo de Ag/AgCl, en una solución de 0.1 M NaOH a temperatura ambiente.

Se utilizó N₂ en el lado de la celda de detección con la finalidad de remover el O₂ de la solución. El resultado del cambio de la densidad de corriente en función del tiempo nos da una medición directa del flujo de hidrógeno a través de la membrana de acero.

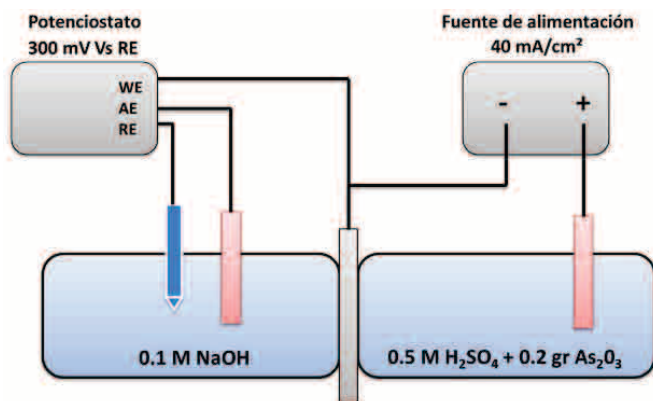


Figura 2. Esquema de la celda de permeabilidad, consiste en una celda de carga y una celda de detección de hidrógeno.

3. Resultados

3.1 Propiedades mecánicas del acero de llegada

La microestructura en la condición de recepción, esto

es, después del tratamiento termomecánico, se muestra en la figura 3, que consiste en una microestructura compuesta por martensita, bainita y ferrita acicular.

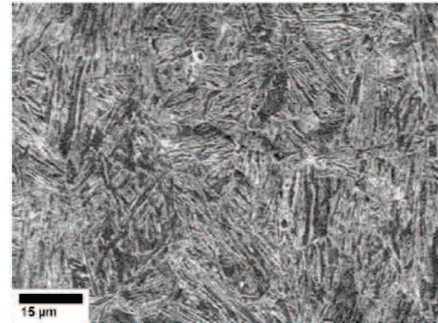


Figura 3. Microestructura del acero en la condición de recepción.

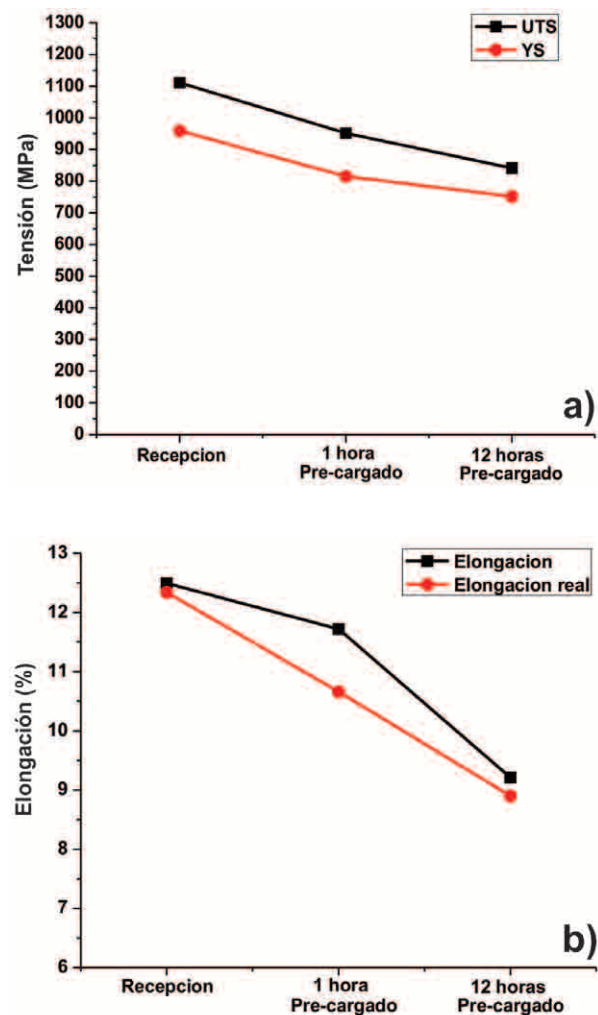


Figura 4. Propiedades mecánicas obtenidas a partir de las curvas tensión-deformación del acero en condición de recepción, con tiempos de cargado catódico, 1 y 12 horas a) UTS y YS. b) %E.

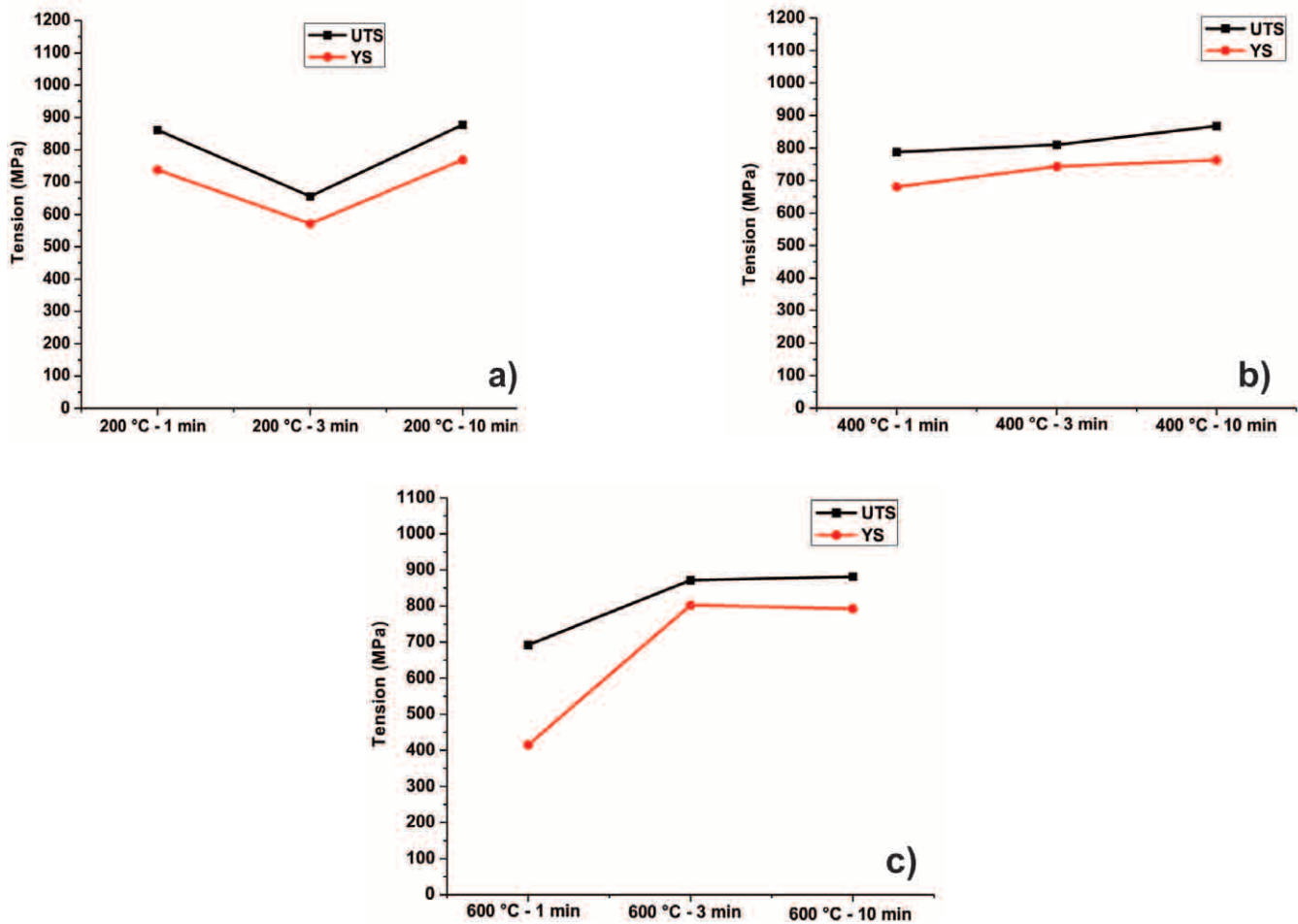


Figura 5. UTS y YS obtenidas a partir de las curvas tensión-deformación de los aceros tratados térmicamente. a) 200 °C, b) 400 °C y c) 600 °C. En un tiempo de 12 horas de carga catódica.

En esta condición se realizaron los ensayos de tracción. A partir de los cuales se obtuvieron los valores de UTS, YS, así como el porcentaje elongación (%E), para determinar la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno del acero en recepción (cargado catódicamente durante una y 12 horas, sin tratamiento térmico de revenido). Se observa en la figura 4 que el UTS y YS presentan una disminución en sus valores de tensión con el incremento en el tiempo de carga catódica. Presentando el primero 1100 MPa en condición de recepción y 814 MPa en un tiempo de 12 horas de carga catódica, esto representa una disminución de un 26 % aproximadamente en la resistencia del acero. Se observa también que el %E disminuye a 12 horas de cargado, de 12.5 % hasta 9.5 % (ver figura 4b), indicando una menor ductilidad. Estos cambios en las propiedades mecánicas son atribuidos a los efectos de fragilización por hidrógeno, debido a

la presencia de ampollamiento; y que al momento de que el acero es sometido a carga mecánica se genera la nucleación y el crecimiento de grietas, ocasionando la falla del acero. Este mecanismo de fractura no apareció con una hora de carga catódica.

Es bien conocido que esta tendencia se debe a la absorción y difusión de hidrógeno durante la carga catódica, donde éste puede ser atrapado en trampas irreversibles (partículas de segunda fase, límites de grano, dislocaciones, etc.) [7].

3.2 Propiedades mecánicas del acero tratado térmicamente

La figura 5 muestra las propiedades mecánicas de UTS y YS obtenidas a partir de los ensayos de tracción realizados a las muestras tratadas térmicamente y cargadas catódicamente durante 12 horas. Se puede observar de manera general, que en las distintas temperaturas de

revenido se presentaron valores menores de UTS y YS en comparación con el acero de recepción, oscilando en un intervalo de 700 - 900 MPa. No se observa una tendencia en estas variaciones de esfuerzo en función de la temperatura y tiempo de revenido. Sin embargo, las condiciones que presentaron una mayor fragilización por hidrógeno fueron a los 200 °C - 3 min y 600 °C - 1 min, con valores de UTS de 655 y 690 MPa respectivamente.

Los aceros revenidos a los 400 °C, tienden a mantener sus valores de UTS y YS independiente al tiempo de tratamiento, presentándose a esta temperatura la menor susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno.

Estas variaciones podrían ser debido a la evolución microestructural durante el proceso de revenido como la recuperación y movimiento de dislocaciones, precipitación de carburos y/o carbonitruros de transición [8]. Estos defectos pueden actuar como trampas de atrapamiento de hidrógeno irreversibles, ocasionando fragilización y debilitando la interfaz matriz-precipitado [9]. Además, el hidrógeno puede favorecer el movimiento de dislocaciones, aumentando el flujo plástico localizado, resultando en un ablandamiento; contribuyendo así a una fractura frágil y la reducción del % E y ductilidad [10].

A partir de las curvas tensión-deformación se calculó la tenacidad a la fractura del acero en las distintas condiciones de revenido y carga catódica. Se puede observar en la figura 6, que la tenacidad disminuye considerablemente a 12 horas de cargado catódico (58 MJ/m³) en relación a la condición de llegada. Los valores de tenacidad en las probetas tratadas térmicamente oscilan entre los 35 y 65 MJ/m³. La condición que presentó una menor tenacidad y por consiguiente una mayor fragilización, fue a los 600 °C - 1 min.

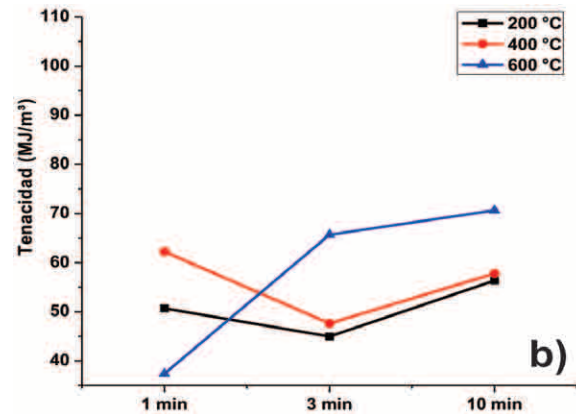
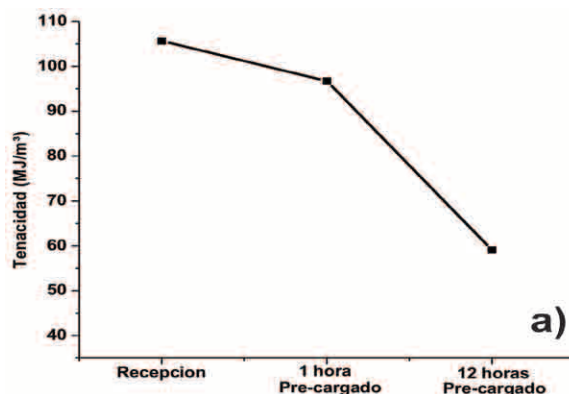


Figura 6. Tenacidad a la fractura obtenida a partir del área bajo la curva de los ensayos de tracción. a) En función del tiempo de la carga catódica en condición de recepción, b) en función del tiempo y la temperatura de tratamiento térmico de revenido.

3.3 Curvas de permeabilidad

En la figura 7, se presentan las curvas de permeabilidad obtenidas a partir de los ensayos de permeación electroquímica. Esto provee una valiosa información sobre la difusión del hidrógeno a través de la membrana de acero.

Los parámetros de permeabilidad: velocidad de difusión (D_{eff}), concentración aparente (C_{app}) y flujo de permeabilidad en estado estable (J_{ss}), son medidos y calculados a partir del transiente de permeación de hidrógeno [11]. Una disminución en D_{eff} , J_{ss} y el incremento en C_{app} , sugiere que una mayor cantidad de hidrógeno puede ser atrapado en el acero [12].

En general, se observa que las curvas obtenidas, presentan un estado transitorio una vez que el hidrógeno comienza a difundir a través del metal, y otro estado estable, que es cuando el metal está completamente saturado con hidrógeno en trampas reversibles e irreversibles [13]. La forma de estas curvas difiere en función del tiempo de tratamiento y en función de la temperatura. Las diferencias entre ellas, es que unas presentan un mayor tiempo en el estado transitorio, y otras presentan un menor tiempo de estado transitorio. Por lo anterior, poseen diferentes pendientes, esto debido a que el hidrógeno presenta diferente velocidad de difusión en estas condiciones de revenido y sumado a esto las distintas trampas asociadas (carburos, dislocaciones, etc.), que se producen y/o modifican durante las distintas etapas de revenido.

A partir de las curvas de permeabilidad y de acuerdo a la Norma ASTM G148 [5], se obtuvieron los coeficientes

de permeación en función de la temperatura de revenido (ver figura 8). Las condiciones donde se presenta una mayor susceptibilidad de fragilización por hidrógeno de acuerdo a los parámetros de permeabilidad, se obtuvo para las temperaturas de 200 y 600 °C. Esto debido a que presentaron una mayor concentración de hidrógeno en su estructura cristalina. De acuerdo a los datos de UTS y YS obtenidos a partir de los ensayos de tensión; bajo estas condiciones también se presenta una disminución en las propiedades mecánicas y tenacidad.

La disminución de UTS y YS en función del tiempo de carga catódica se debe principalmente la acumulación de hidrógeno en sitios de atrapamiento tales como carburos y/o carbonitruros, límites de grano y dislocaciones. Esto genera un debilitamiento de la matriz del acero, ocasionando la formación de ampollamiento. El hidrógeno difunde a regiones con altos esfuerzos tri-axiales o algunas áreas microestructurales que contienen defectos. Cuando el hidrógeno alcanza presiones críticas, la formación de grietas será iniciada con la eventual fractura del acero [14].

Durante las pruebas de tensión en condición de revenido y con pre-cargado de hidrógeno durante 12 horas, las propiedades mecánicas se comportan de manera diferente, esto debido en gran medida a las características

microestructurales como dislocaciones y precipitados existentes, que tienden a modificarse en las distintas etapas durante el revenido descritas anteriormente. Está ampliamente reportado que los precipitados son trampas más irreversibles que las dislocaciones y límites de grano, no obstante, las dislocaciones se consideran también como sitios irreversibles [15]. La irreversibilidad es la capacidad de mantener al hidrógeno atrapado por un tiempo prolongado, dando pauta a sus efectos de fragilización en los precipitados y debilitamiento de la interfase matriz-precipitado.

Debido a la deformación plástica ocasionada durante los ensayos de tracción, las dislocaciones deslizan disminuyendo la energía libre y favorecen la formación de precipitados, posiblemente los campos de tensiones ocasionados por las deformaciones son compensados por el crecimiento de precipitados. La difusión del hidrógeno es afectado por la cinética de precipitación de carburos debido a que el coeficiente de difusión de hidrógeno en el acero varía de acuerdo a la cantidad y tipo de precipitados presentes [16] obteniéndose un comportamiento oscilatorio del coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}) obtenido a partir de los ensayos de permeabilidad.

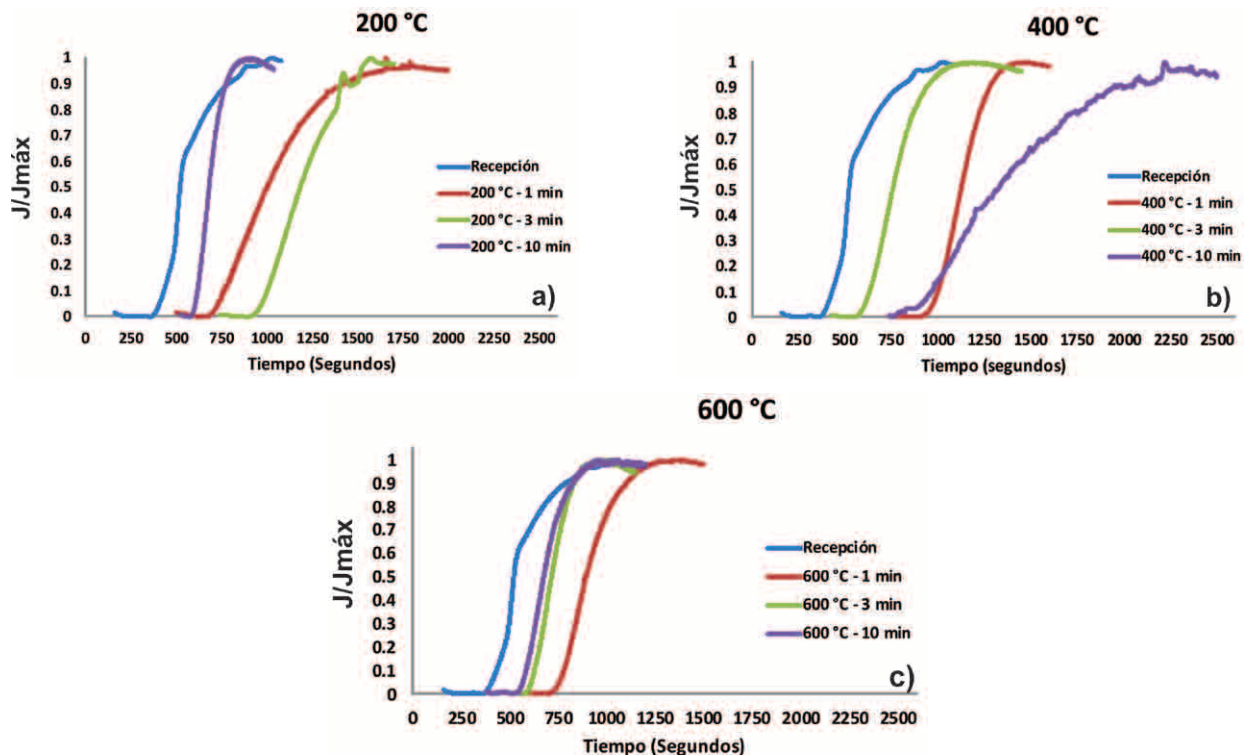


Figura 7. Curvas de permeabilidad utilizadas para determinar los parámetros de difusión. a) 200 °C, b) 400 °C y c) 600 °C.

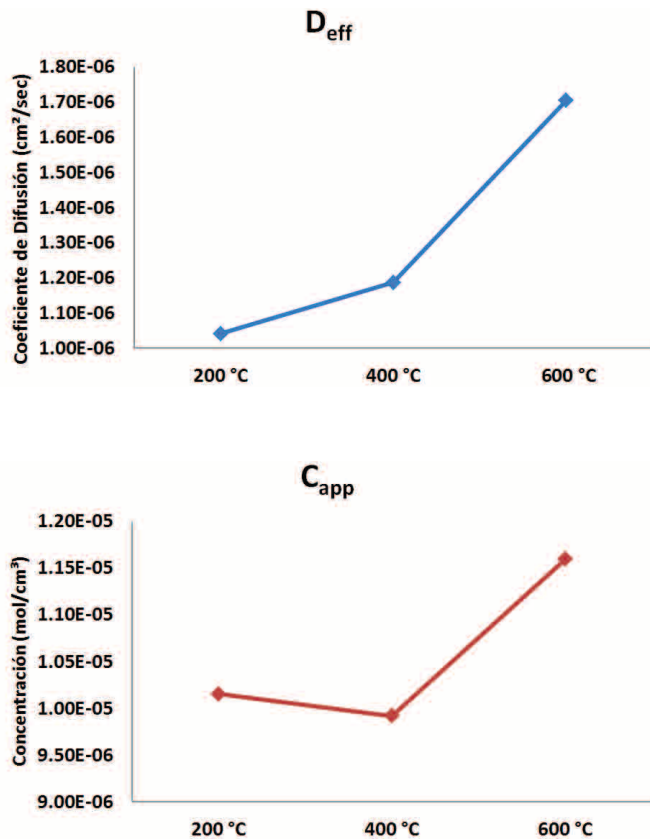


Figura 8. a) Velocidad de difusión, b) concentración aparente de hidrógeno en función de la temperatura de revenido.

4. Conclusiones

- El acero microaleado experimental mostró una disminución en sus propiedades mecánicas debido al efecto fragilizante del hidrógeno. Esto ha sido atribuido a la presencia de ampollamiento por la acumulación de hidrógeno.
- Las muestras tratadas térmicamente y cargadas a 12 horas, mostraron variaciones de UTS siempre por debajo de las propiedades mecánicas de la condición de recepción.
- La condición de revenido a la temperatura de 400 °C mostró una menor susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno, debido a valores bajos de C_{app} .
- La mayor susceptibilidad a fragilización por hidrógeno debido a la mayor disminución de UTS, YS y $\%E$, se presentó en las condiciones de 200 °C-3 min y 600 °C-1 min.
- El parámetro de permeabilidad (D_{eff}) tiende a incrementarse a medida que la temperatura se incrementa.

5. Agradecimiento

Agradecemos al Q. Iván Puente por su apoyo técnico. Agradecemos también al programa de apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT, No. IN118714-2) de la UNAM, a través del proyecto: IN 118714. También se agradece al proyecto Ciencia Básica No.178777 del Conacyt.

6. Referencias

- [1] VERVYNCKT, Stephanie, et al. Modern HSLA steels and role of non-recrystallization temperature. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, no 4, p. 187-207.
- [2] KOO, J. Y., et al. Metallurgical design of ultra-high strength steels for gas pipelines. *The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers*, 2003.
- [3] BARTERI, M., et al. *Corrosion Science*, 1997, p. 1239.
- [4] Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials Annual Book of ASTM Standards, ASTM E-8. Vol. 03.01, 1984, p. 130-150.
- [5] Standard Practice for Evaluation of Hydrogen Uptake, Permeation, and Transport in Metals by an Electrochemical Technique. Annual Book of ASTM Standards, ASTM G-148. Vol. 0.3.02, 1997.
- [6] DEVANATHAN M. A. V., Stachurski Z. J. *Electrochem. Soc.* 1964. V. 111. P. 619-623.
- [7] COTTIS, R. A. *Electrochemical Methods. Shreir's Corrosion*, 2010, p. 1341-1373.
- [8] ELIAZ, N., et al. Characteristics of hydrogen embrittlement, stress corrosion cracking and tempered martensite embrittlement in high-strength steels. *Engineering Failure Analysis*, 2002, vol. 9, no 2, p. 167-184.
- [9] MOODY, Neville R.; THOMPSON, Anthony W. *Hydrogen effects on material behavior*. Warrendale, PA (USA); The Metallurgical Society Inc., 1990.
- [10] CRAIG, B. *Hydrogen Damage, Corrosion: Fundamentals, Testing and, Protection*. ASM Handbook, ASM International, 2003, vol. 13, p. 367-380.
- [11] Method of measurement of hydrogen permeation and determination of hydrogen uptake and transport in metals by electrochemical technique. ISO 17081, International Standard Organization, 2004.
- [12] HUANG, F., et al. Effect of microstructure and inclusions on hydrogen induced cracking susceptibility and hydrogen trapping efficiency of X120 pipeline steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527, no 26, p. 6997-7001.

- [13] CABRINI, M. et al. Acciaio-Effetto della microstruttura sulla diffusione dell'idrogeno in acciai al carbonio per pipeline. *Metallurgia Italiana*, 2003, vol. 95, no 3, p. 13-20.
- [14] LUNARSKA, E. et al. *Int. J. Hydrogen Energy*, 23, 1998, p. 279–284.
- [15] BIRNMAUN, H. K. Hydrogen Effects on Material Behavior in TMS AIME Conf. Proc., eds. NR Moody, AW Thompson (Warrendale PA: TMSAIME 1990), p. 639.
- [16] LUPPO, M. et al. The influence of microstructure on the trapping and diffusion of hydrogen in a low carbon steel. *Corrosion science*, 1991, vol. 32, no 10, p. 1125-1136.

Establecimiento de una línea base de parámetros de calidad de agua marina costera para la evaluación de los posibles efectos del cambio climático en Punta Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa y Playa La Marinera

Establishing baseline parameters of coastal seawater quality for the evaluation of possible climate change effects at Punta Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa and Playa La Marinera

Verónica Castillo¹, Gisselle Guerra², Kathia Broce³

¹Universidad Tecnológica de Panamá, ²Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá,

³Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá

¹veronica.castillo@utp.ac.pa, ²gisselle.guerra@utp.ac.pa, ³kathia.broce@utp.ac.pa

Resumen— Una de las formas de ver un cambio en un proceso ambiental, es la utilización de parámetros adecuados que nos indiquen un antes y un después de estos procesos. Con esto abordamos principalmente el estudio del cambio climático, específicamente en zonas costeras. Por ello, se ha establecido una línea base de parámetros de calidad de agua marina costera con el fin de evaluar la posible relación con el cambio climático y sus efectos sobre los ambientes marinos en las costas del Pacífico y el Caribe del istmo de Panamá. Por consiguiente, se colectaron muestras de aguas marinas costeras en Punta Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa y Playa La Marinera, cuatro veces al año, dos veces por temporada desde el año 2013. Estas muestras fueron analizadas según parámetros físico-químicos y microbiológicos, siguiendo metodologías estandarizadas. Los resultados obtenidos permiten la realización de un análisis descriptivo de la calidad del agua marina costera en cada sitio de muestreo en un tiempo y espacio determinado. Se concluye que sí existe una posible relación entre la calidad del agua marina costera y la influencia de las condiciones climáticas sobre la concentración de los parámetros y su comportamiento estacional en las costas del Pacífico y Caribe de Panamá. Este estudio permite establecer una investigación a largo plazo que contribuye al conocimiento científico sobre la calidad del agua en las costas de Panamá, impulsando nuevos estudios de investigación sobre estos ecosistemas y permitiendo conocer la vulnerabilidad a la que están expuestas para prevenir y mitigar los posibles efectos del cambio climático.

Palabras claves— Agua marina costera, cambio climático, costas, parámetros de calidad.

Abstract— One way to see a change in environmental process is the use of appropriate parameters to tell us before and after these processes. With this we address primarily the study of climate change, particularly in coastal areas. Therefore, we have established a base of quality parameters of seawater coastline in order to evaluate the possible relation to climate change and its effects on marine environments in the Pacific and the Caribbean, the Isthmus of Panama. Therefore, samples of coastal seawater at Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa and Playa La Marinera, four times a year, twice per season since 2013. These samples were analyzed by physical, chemical and microbiological parameters, following standard methodologies. The results allow carrying out a descriptive analysis of the coastal marine water quality sampling at each site on a given time and space. We conclude that there exists a possible link between the coastal marine water quality and the influence of climatic conditions on the concentration of the parameters and their seasonal pattern in the Pacific and Caribbean coasts of Panama. This study allows to establish a long-term research that contributes to scientific knowledge about water quality off the coast of Panama, promoting new research on these ecosystems and allowing to know the vulnerability to which they are exposed to prevent and mitigate the possible effects of climate change.

Keywords— Coastal marine water, climate change, coasts, quality parameters.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 13 de noviembre de 2015

Fecha de aceptación: 7 de abril de 2016

1. Introducción

Los ambientes marino-costeros incluyen diferentes tipos de hábitat, albergan una enorme riqueza de especies, son parte fundamental en

la regulación hidrológica y climática, y constituyen una importante fuente de carbono y oxígeno [1], que son elementos necesarios para la vida en la Tierra.

Debido a sus características físico-naturales y las actividades humanas que en ellas influyen, estos ambientes son altamente vulnerables a los impactos adversos de los fenómenos climáticos. Estos impactos no solo se dan en la dirección que señala el ascenso acelerado del nivel del

mar, sino también por los impactos sobre los recursos hídricos, las actividades agropecuarias, ecoturísticas, los asentamientos humanos, la diversidad biológica, migraciones humanas, migraciones de faunas, etc. [2].

Panamá tiene costas a ambos lados de su territorio, por lo tanto, es de vital importancia contar con una base de datos que describa la calidad del agua y llevar a cabo un mejor manejo y gestión sobre estos ecosistemas.

El propósito de esta investigación es el de establecer una línea base de parámetros de calidad de agua marina costera, con el fin de evaluar los posibles efectos del cambio climático en Punta Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa y Playa La Marinera. Se realizó bajo los lineamientos de la Red Mesoamericana de la Calidad de las Aguas (REMECA) y representando el inicio de las mediciones de aguas marinas costeras en Panamá.

La REMECA fue establecida en el año 2012 tras la culminación del Primer Curso Internacional sobre Monitoreo de la Calidad de las Aguas Costeras en la Región Mesoamericana y el Caribe para la medición de parámetros indicadores del Cambio Climático, organizado por la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA) con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXID) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT).

2. Áreas de estudio

Las muestras de agua de mar fueron colectadas en Punta Galeta (Costa Caribe) y Playa Teta, Playa Hermosa y Playa La Marinera (Costa Pacífica). La ubicación geográfica de los puntos de muestreo se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Puntos de muestreo.

2.1 Generalidades de los sitios de muestreo

La preselección de los sitios de muestreo se realizó siguiendo los criterios de accesibilidad, seguridad, representatividad y trazabilidad establecidos en el Manual Calibrador de la red primaria de monitoreo de la calidad del agua, CONAGUA.

Posteriormente para la selección final de los sitios de muestreo se realizaron evaluaciones ambientales de sitio donde se identificaron las características básicas del lugar (tipo, posición, límites), características del hábitat (parámetros físicos, vegetación, fauna), características del cuerpo de agua (viento, fauna marina), alteraciones del cuerpo de agua (desechos, olores, color), relación de actividades humanas con el cuerpo de agua, croquis y fotografías.

2.1.1 Punta Galeta

Se localiza en el Corregimiento de Cristóbal, Provincia de Colón. Según la clasificación climática de A. McKay el clima es tropical oceánico con estación seca corta, caracterizado por una temperatura media anual de 25.6 °C en las costas y unas precipitaciones máximas de 4,760 mm y mínimas entre 40 mm y 90 mm [3].

Presenta una baja intervención antropogénica, este sitio forma parte del Paisaje Protegido Isla Galeta establecido bajo la ley 21 de 1997, con una superficie de 6.05 km² encontrándose dentro de la clasificación de bosque Húmedo Tropical [4].

2.1.2 Playa Teta

Se encuentra en el Corregimiento de San José, Provincia de Panamá Oeste. Según la clasificación climática de A. McKay el clima es tropical con estación seca prolongada, caracterizado por tener promedios anuales de temperaturas de 27 a 28°C y una precipitación anual inferior a 2,500 mm [3].

Playa Teta es drenada por el río Teta y es una zona de importancia turística por las fuertes olas.

2.1.3 Playa Hermosa

Se ubica en el Corregimiento de Boca Chica, Provincia de Chiriquí. Según la clasificación climática de A. McKay el clima es subecuatorial con estación seca, caracterizado por tener promedios anuales de temperatura de 26.5 a 27.5 °C en las tierras bajas (< 20 msnm) y una precipitación anual superior a los 2,500 mm [3].

Playa Hermosa se encuentra en una zona rural con baja actividad antropogénica y desarrollos urbanísticos, es una playa de poca pendiente y se encuentra dentro de la Ensenada de Chuchecal.

2.1.4 Playa La Marinera

Se localiza en el Corregimiento de Guánico, Provincia de Los Santos. Según la clasificación climática de A. McKay el clima es tropical con estación seca prolongada, caracterizado por tener promedios anuales de temperaturas de 27 a 28°C y una precipitación anual inferior a 2,500 mm [3].

Esta playa es una zona de anidamiento de tortugas, específicamente la *Lepidochelys olivácea* que realiza sus arribadas desde mediados del mes de julio hasta mediados del mes de diciembre, por lo tanto, se declara Zona de Reserva el 12 de agosto de 2010, contando con una superficie de 9.68 km² de los cuales 9.29 km² corresponden al área marina [5].

2.2 Zona de convergencia intertropical (ZCIT)

Según la presencia y ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en Panamá, la temporada seca se extiende desde finales del mes de diciembre hasta el mes de abril, cuando la ZCIT se desplaza hacia el sur del país y dominan los vientos intensos que provienen normalmente del Noroeste, por consiguiente, la temporada lluviosa se presenta desde el mes de mayo hasta mediados de diciembre, cuando la ZCIT se localiza al norte del país y los vientos son suaves y moderados [6].

Estas temporadas pueden variar sustancialmente de año en año y afectar los patrones de precipitación, las descargas de agua dulce proveniente de los ríos y el patrón de los vientos [7].

2.3 Geología costera

En general, los resultados obtenidos muestran que los parámetros físico-químicos presentan una mayor variación en el Litoral del Pacífico que en el Caribe.

Esto puede explicarse desde el punto de vista de la geología costera, según estudios previos citados [6], se aprecian diferencias marcadas en cuanto a la estructura de la plataforma continental, que conlleva a condiciones oceanográficas específicas para cada uno de los litorales. En el litoral del Caribe, donde se ubica Punta Galeta,

la formación es reducida y similar a lo largo de toda la costa, sin embargo, en el litoral del Pacífico, presenta una mayor variedad en la forma.

La plataforma continental a lo largo de la costa del Pacífico se encuentra entre las más dinámicas de la región; la zona del Golfo de Panamá, donde está ubicada Playa Teta, se caracteriza por una plataforma continental amplia, las regiones costeras de la Península de Azuero, donde encontramos a Playa La Marinera, presentan una plataforma continental relativamente pequeña y en la zona del Golfo de Chiriquí, donde está ubicada Playa Hermosa, el zócalo continental es mucho más variado en su extensión [8].

2.4 Fenómeno de afloramiento marino-costero

Estas características propias de cada litoral, conducen a condiciones oceanográficas distintas, que en algunos casos son más marcadas. Por ejemplo, en la Costa del Pacífico, específicamente en el Golfo de Panamá, se presenta el fenómeno de afloramiento costero, durante la temporada seca, trayendo consigo variaciones en los parámetros físico-químicos de las aguas superficiales como: disminución significativa de la temperatura del agua, aumento pronunciado de la salinidad, aumento significativo en la concentración de nitrato, fósforo total y clorofila *a* y una disminución del oxígeno disuelto por debajo de la termoclina.

Este afloramiento periódico es responsable por la alta productividad biológica de la Bahía de Panamá [7], su intensidad está correlacionada directamente, con la fuerza y tiempo de permanencia de los vientos alisios provenientes del noroeste [8].

En el Golfo de Chiriquí no se presenta este fenómeno, porque estos vientos son atravesados por la cordillera central, lo que impide el desplazamiento de la capa superficial de las aguas marino-costeras [8]. En ambos golfos durante las condiciones de no afloramiento el nivel de nutrientes en la superficie es pobre y el máximo de clorofila sucede alrededor de los 30 m, donde la termoclina intersecta la zona eutrófica y aguas pobres en oxígeno bajo la termoclina [9].

En la Costa del Caribe, estudios previos han determinado que no se presenta el fenómeno de afloramiento, por lo tanto, existe muy poco cambio en la temperatura, los nutrientes y en los organismos. Esto favorece las condiciones oligotróficas y el desarrollo

de los arrecifes de coral, los cuales son un componente importante en los hábitats de esta costa [10].

2.5 Descargas continentales y precipitación

Las descargas continentales y los niveles de precipitación son aspectos importantes que afectan las propiedades del agua marina. Según el IGNTG, la vertiente del Caribe abarca el 30% del territorio nacional, con 18 cuencas hidrográficas, mientras que la del Pacífico abarca el 70% restante, con 34 cuencas hidrográficas.

Según datos hidrometeorológicos históricos registrados por ETESA, la región del Pacífico se caracteriza por abundantes lluvias, de intensidad entre moderada a fuerte, esto se asocia, generalmente, con los sistemas atmosféricos bien organizados, como las ondas y ciclones tropicales (depresiones, tormentas tropicales y huracanes), y a la ZCIT.

La región del Caribe se caracteriza por registrar lluvias durante todo el año, asociadas a los sistemas atmosféricos tropicales que se desplazan sobre la cuenca del Caribe, a la brisa marina y al calentamiento diurno de la superficie terrestre.

2.6 Mareas y corrientes costeras

Otros aspectos importantes son las mareas y las corrientes costeras. La costa del Pacífico presenta una marea semi-diurna, dependiendo de la zona litoral, la amplitud de la marea puede alcanzar 6 o 7 m, mientras que la costa del Caribe presenta una marea mixta (diurna/semi-diurna), poco predecible, muy influenciada por las condiciones meteorológicas estacionales, con una amplitud máxima de unos 50 centímetros [6]. Estas variaciones tienen impacto sobre la calidad del agua [7].

En cuanto a las corrientes en la costa del Pacífico se observan dos patrones de corrientes dominantes que viajan en direcciones opuestas. La corriente de Colombia que asciende por la provincia de Darién y realiza un recorrido en dirección este-oeste, atenuándose en la provincia de Los Santos; en términos generales, se presenta con más fuerza durante la estación lluviosa y la corriente que prima en el Golfo de Chiriquí proviene de Costa Rica, viaja en dirección oeste-este, comienza su recorrido en la Península Burica y termina en la región de la Península de Azuero [6].

En la Costa del Caribe, la Corriente de Panamá es la principal corriente oceánica que ejerce influencia sobre esta costa. Consiste de una deriva superficial con

dirección Este, producto de la colisión de la corriente del Caribe (que tiene dirección preponderantemente Oeste) con las costas de Nicaragua y Costa Rica.

Este fenómeno crea un contragiro perpetuo, que ejerce una gran influencia en la distribución de los organismos en las costas de Nicaragua, Costa Rica, Panamá y Colombia, habitualmente las corrientes oceánicas se acercan más a la costa durante la estación seca, cuando los vientos predominantes del norte, la empujan contra las costas del Caribe panameño [6], estas corrientes afectan la calidad del agua.

3. Cambio climático

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (PICC) define el cambio climático como una alteración sobre los parámetros meteorológicos con respecto al historial climático local, regional o global, por causas naturales y antropogénicas. Sin embargo, la definición dada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), describe el término solo para referirse al cambio climático atribuido por causas humanas.

De esta manera, se entiende por cambio climático como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables” [11].

Un cambio en el clima puede ser ocasionado por: forzamientos externos que incluye inestabilidad en la atmósfera o el océano y forzamientos internos que incluyen cambios en la intensidad de la radiación solar recibida o cambios provenientes de las actividades humanas [12].

3.1 Cambio climático en las regiones costeras

Los océanos forman parte de un sistema climático global en conjunto con el aire, la tierra, el hielo y la vegetación, siendo el sol la principal fuente de energía. Los océanos también sustentan el ciclo hidrológico de la Tierra por su interacción constante con la atmósfera por medio de la precipitación, la evaporación, los vientos y la radiación solar [13].

Las variaciones inusuales que pueda experimentar esta interacción entre el océano y la atmósfera producto del uso de combustibles fósiles y de la gran contaminación que están

sufriendo nuestros océanos entre otros factores, pueden propiciar cambios en el sistema climático global, por lo tanto, puede afectar a los sistemas sociales y económicos.

Para conocer, medir y describir de manera apropiada la variabilidad oceánica que pudiera identificarse como una manifestación del cambio climático, es necesaria la medición y el registro sistemático regularizado de variables hidrográficas, de superficie, cinemáticas y de condición de frontera [12].

- Variables Hidrográficas Físicas, Químicas y Biológicas: temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes (nitratos, fosfatos, etc.), clorofila y productividad primaria.
- Variables de Superficie: nivel del mar, temperatura del aire, presión atmosférica, radiación incidente, emitida y neta; nubosidad, evaporación, precipitación y temperatura de la superficie del mar.
- Variables Cinemáticas: perfiles de la velocidad del agua de mar (corrientes marinas).
- Variables de Condición de Frontera: viento y esfuerzo del viento sobre el mar, descarga de ríos y batimetría de alta resolución.

4. Metodología

Siguiendo los criterios que desarrolla la REMECA, la colecta de las muestras para el estudio de la calidad del agua se realizó cuatro veces al año, dos veces por cada temporada desde el año 2013.

4.1 Colecta y medición de las muestras

- Como reconocimiento del sitio se midieron las siguientes condiciones ambientales: temperatura, humedad relativa y presión barométrica, además se determinó el color aparente del agua utilizando tablas de color para el agua de mar, se anotó en la bitácora de campo.
- Las coordenadas de los puntos de muestreo se determinaron utilizando la modalidad de navegación del GPS.
- Las muestras de agua se colectaron en la zona de subida y bajada de las olas a una profundidad de 30 cm desde la superficie del agua, utilizando botellas de plásticos estériles de 250 mL para el parámetro de enterococos, de vidrio color ámbar de 1 L para el parámetro de clorofila *a* y de plástico de boca grande de 1 L para los nutrientes inorgánicos.
- Las botellas para las muestras de agua se llenaron en

el siguiente orden: enterococos, clorofila *a*, nitrito, nitrato y fósforo total. Cada envase con su etiqueta indicado las características de cada muestra.

- Se realizaron blancos de campos y duplicados de muestras para cada uno de parámetros con el propósito de garantizar la calidad analítica.
- En campo se midieron los siguientes parámetros físico-químicos: potencial de hidrógeno, conductividad, salinidad, oxígeno disuelto y temperatura del agua, se anotó en la bitácora de campo.
- Las muestras colectadas para el análisis de enterococos, clorofila *a* y nitrito fueron preservadas con hielo para mantenerlas a una temperatura menor de 4°C y las muestras para el análisis de nitrato y fósforo total con 2 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) por litro a una temperatura menor de 4°C.

4.2 Análisis de las Muestras

- Los métodos analíticos de laboratorio se realizaron siguiendo las metodologías estandarizadas que se describen en el Manual establecido en el Curso Internacional sobre monitoreo de la Calidad de las Aguas Costeras en le Región Mesoamericana para la Medición de Parámetros Indicadores del Cambio Climático, bajo la dirección del Centro de Referencia Especializada de Aguas Salinas (CREAS), fundamentados en metodologías estandarizadas de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y el Standard Methods para el análisis de aguas y aguas residuales [14], como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Métodos analíticos

Parámetro	Prueba y Nomenclatura
Potencial de Hidrógeno	Análisis de agua - Determinación del pH (SM-4500HB).
Salinidad / Conductividad	Análisis de agua - Determinación de la Conductividad Electrolítica (SM-2510B).
Oxígeno Disuelto	Análisis de agua - Determinación de Oxígeno Disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (SM-4500).

Enterococos	Establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de Calidad de Playa (SM 9223-B).
Clorofila <i>a</i>	Determinación de Clorofila <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c1</i> + <i>c2</i> y Feopigmentos por In Vitro en alga marina y de agua dulce por electrofotometría visible (EPA-446.0).
Nitrógeno de Nitritos	Análisis de Agua - Determinación de Nitrógeno de Nitritos en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas (SM-4500-NO ₂ B).
Nitrógeno de Nitratos	Análisis de Agua – Nitrógeno; Nitratos – Nitritos (Espectrofotométrico, Reducción con Cadmio) (EPA-353.3).
Fósforo Total	Análisis de Agua – Medición de Fósforo (en todas sus formas) Colorimetría, Ácido Ascórbico, 2 Reactivos (EPA-365.3).

5. Resultados y discusión

Los resultados de las mediciones y los análisis correspondientes a los muestreos realizados durante los meses de marzo, mayo, agosto y octubre del año 2014

fueron complementados con datos previos obtenidos durante los meses de marzo, mayo y septiembre del año 2013, correspondientes a la temporada seca y lluviosa. En la tabla 2 se presenta el promedio y la desviación estándar de los resultados medidos durante los años 2013 y 2014.

A continuación, se presenta un análisis descriptivo de los datos preliminares obtenidos en la implementación de la línea base de los parámetros de calidad de agua marina costera en Punta Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa y Playa La Marinera.

5.1 Temperatura

La temperatura del agua de mar en Punta Galeta estuvo entre un rango de 28.20 °C hasta 29.80 °C y en las Playas de la costa del Pacífico, estuvo entre un rango de 24.4 °C hasta 31.9 °C. Es notable que las temperaturas en la superficie del agua de mar sean siempre cálidas, por la incidencia directa de los rayos del sol, el agua de mar es un parámetro conservativo muy importante, ya que solo varía al ocurrir una mezcla entre masas de agua diferentes, por lo tanto, puede presentar variaciones en la temporada lluviosa al ocurrir una mayor incidencia de agua dulce [15]. Según ETESA las temporadas seca y lluviosa son más marcadas en la costa del Pacífico

Tabla 2. Media y desviación estándar de los resultados

Parámetros	Punta Galeta	Playa Teta	Playa Hermosa	Playa La Marinera
	Media ± DS	Media ± DS	Media ± DS	Media ± DS
pH	8.049 ^a ± 0.245	7.503 ^{ab} ± 0.648	7.118 ^b ± 0.362	7.433 ^{ab} ± 0.614
Salinidad (ppm)	33.689 ^a ± 1.192	30.995 ^a ± 3.735	29.132 ^a ± 4.158	32.132 ^a ± 4.101
Temperatura del Agua (°C)	29.214 ^a ± 0.537	29.338 ^a ± 2.695	30.190 ^a ± 1.306	27.937 ^a ± 1.079
OD (mg/L)	8.034 ^a ± 0.438	7.743 ^a ± 1.754	6.484 ^a ± 0.981	7.023 ^a ± 1.066
Chl <i>a</i> (mg/L)	0.034 ^a ± 0.039	0.069 ^a ± 0.032	0.099 ^a ± 0.031	0.044 ^a ± 0.052
NO ₂ (mg/L)	0.005 ^a ± 0.001	0.003 ^a ± 0.002	0.002 ^a ± 0.001	0.004 ^a ± 0.002
NO ₃ (mg/L)	0.006 ^a ± 0.006	0.108 ^a ± 0.098	0.014 ^a ± 0.008	0.100 ^a ± 0.089
PT (mg/L)	0.030 ^a ± 0.040	0.188 ^a ± 0.261	0.124 ^a ± 0.144	0.261 ^a ± 0.199

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (a,b).

El análisis de Tukey no muestra diferencias significativas entre los sitios de muestreo, con excepción del pH que sí mostró diferencias significativas entre Punta Galeta y Playa Hermosa, los demás parámetros no mostraron diferencias significativas.

panameño que en la Costa del Caribe, por lo tanto, existe una mayor variación en la costa del Pacífico en relación a la Costa del Caribe.

Además de lo anteriormente expuesto, la temperatura puede variar en consecuencia al fenómeno de afloramiento, el cual se registra durante los meses correspondientes a la temporada seca en el Golfo de Panamá, bajando la temperatura a menos de 20 °C [16].

Por esta razón para la medición de marzo de 2013 la temperatura registrada en Playa Teta fue de 24.4 °C. Esta disminución de temperatura en comparación con las temperaturas registradas en los demás meses del año, podría ser consecuencia de la reciente presencia del afloramiento en los meses de enero y febrero; sin embargo, en el Golfo de Chiriquí no se observa este fenómeno y la temperatura del agua se mantiene entre 27 y 29 °C [16], por esta razón, para esta misma fecha en Playa Hermosa la temperatura registrada fue de 28.8 °C.

En un estudio realizado por Kwiecinski y D' Croz (1994), en la Bahía de Panamá, durante la temporada lluviosa, sus resultados indicaron una distribución uniforme de las propiedades físico-químicas, los nutrientes y la clorofila *a*, además de presentar una ausencia de estratificación térmica, con una temperatura cerca de 29 °C desde la superficie al fondo de las estaciones en el área. Esta característica es completamente normal para el área y la temporada del año [17].

Para este mismo estudio, durante la temporada seca, los datos hidrometeorológicos históricamente indican una fuerte correlación entre el promedio anual de índice de vientos del norte y la disminución del nivel medio del mar en la Bahía de Panamá, esto es seguido por una disminución simultánea en la temperatura, sus resultados mostraron una disminución de ± 28 °C en noviembre de 1992 a 24 °C en marzo de 1993.

5.2 Potencial de hidrógeno

El valor de pH es un dato de importancia en la oceanografía, establece las características de alcalinidad o acidez de las aguas. Para el agua oceánica está establecida entre 7.5 y 8.4. La costa del Caribe tiende a ser más alcalina que la Costa del Pacífico. El pH puede variar en función de la temperatura, la salinidad, la profundidad y de las actividades de los organismos vivos [18].

Punta Galeta presentó los promedios de pH más altos en la estación seca y lluviosa con un promedio anual de

8.05 en comparación con los demás sitios de muestreo, localizados en la vertiente del Pacífico.

Playa Teta en el muestreo correspondiente a marzo de 2013 registró un valor de pH bajo durante la estación seca de 2013, esto podría ser a consecuencia del fenómeno de afloramiento [18].

Todos los valores medidos de pH se encuentran dentro de los rangos establecidos para aguas marinas y costeras; según los requisitos de calidad permisibles para las aguas marinas y costeras destinadas para uso recreativo mediante contacto directo o indirecto, establecidos en el Anteproyecto de Norma de Calidad de Aguas Marinas y Costeras de Panamá, los valores de pH deben ser menores a 6.0 o mayores a 9.0.

Un estudio realizado en la Bahía de Manzanillo, mostró valores promedios de pH entre 6.5 a 8.3, considerados dentro de los valores normales para aguas marino-costeras [19].

5.3 Salinidad

La salinidad es el parámetro más notable desde el punto de vista químico en el agua de mar y su distribución se caracteriza por incrementarse al aumentar la profundidad [15].

La salinidad es el resultado de la combinación de diferentes sales que se encuentran en las aguas marinas, siendo el cloruro de sodio conocido como sal común, que se encuentra en una mayor cantidad ocupando un 80% del total de las sales. En estudios anteriores se ha determinado que la salinidad en la costa del Caribe fluctúa entre 24.5 ppm a 37.2 ppm, mientras que, en la costa del Pacífico la misma fluctúa entre 21.5 ppm a 34.9 ppm [6].

En términos generales la salinidad también puede sufrir variaciones según la temperatura y las aportaciones de agua dulce, por lo tanto, en las zonas costeras de los trópicos la salinidad presenta variaciones estacionales notables, aumentando en la temporada seca y disminuyendo en la temporada lluviosa [18].

En la costa del Caribe no se registraron grandes fluctuaciones de salinidad en comparación con la Costa del Pacífico, que presenta mayores fluctuaciones entre las temporadas.

En la Costa del Pacífico, los sitios que presentan una salinidad más baja, están sujetos a descargas de agua dulce como pequeñas quebradas en Playa Hermosa y el Río Teta en Playa Teta.

En un estudio realizado por Kwiecinski y D' Croz (1994), en la Bahía de Panamá para la temporada lluviosa, el promedio de salinidad fue de 30 ppm, concluyéndose que esto se relaciona a la influencia del drenaje continental, proveniente de los ríos más cercanos. Esta característica es completamente normal para el área y la temporada del año [17].

Para este mismo estudio, durante la temporada seca, debido al afloramiento, se registró un aumento en la salinidad de ± 27 ppm en noviembre de 1992 a ± 34 ppm en marzo de 1993.

Para la costa del Caribe, específicamente en la Bahía de Limón, para la temporada lluviosa, se observó una muy baja salinidad variando entre 25 y 20 ppm.

Los resultados de un estudio realizado en el Golfo de Panamá y el Golfo de Chiriquí, mostraron que las características de las aguas superficiales en el Golfo de Chiriquí son cálidas y de baja salinidad durante todo el año [8].

5.4 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el agua de mar puede ser un indicador del grado de contaminación y de su capacidad para dar soporte a la vida vegetal y animal.

Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica que el agua es de mejor calidad, por el contrario, si el nivel de oxígeno es demasiado bajo, algunos peces y otros organismos no podrían sobrevivir. El rango de oxígeno disuelto en los océanos puede variar entre 0 a 11.9 mg/L [18].

El oxígeno es uno de los factores que relacionan los océanos con la atmósfera formando un ciclo. Cuando el oxígeno llega al mar, este se disuelve y es utilizado por los vegetales y animales para su respiración, luego el ciclo se completa con el proceso de fotosíntesis donde los vegetales verdes absorben el carbono y liberan el oxígeno nuevamente a la atmósfera, esta producción orgánica recibe el nombre de producción primaria. Por lo tanto, a una menor profundidad la cantidad de oxígeno disuelto en el mar es mayor [18].

En la tabla 2, se observa que los valores de oxígeno disuelto siguieron un patrón típico de las aguas superficiales bien oxigenadas en la superficie del mar y esto se debe a que se mantiene un equilibrio con la cantidad de oxígeno que existe en la atmósfera, caso contrario ocurre en las profundidades donde la cantidad de oxígeno depende de la temperatura [18].

En un estudio realizado en la Bahía de Panamá para la temporada lluviosa, la concentración del oxígeno disuelto en el agua varió entre 6.0 y 8.0 mg/L y para la temporada seca disminuyó en la columna de agua, por efecto del afloramiento estacional [7]. Para la costa del Caribe, específicamente en la Bahía de Limón, para la temporada lluviosa, la concentración del oxígeno disuelto en el agua superficial varió entre 5.7 a 7.0 mg/L.

Según los requisitos de calidad permisibles para las aguas marinas y costeras destinadas para uso recreativo mediante contacto directo o indirecto, establecidos en el Anteproyecto de Norma de Calidad de Aguas Marinas y Costeras de Panamá, los valores de oxígeno disuelto deben ser menores a 3.0 mg/L.

5.5 Enterococos

Los enterococos son el indicador bacteriológico más eficiente para evaluar la calidad del agua de mar para uso recreativo de contacto primario [20].

Según la Organización Mundial de la Salud, los enterococos resisten las condiciones del agua de mar y están relacionados directamente con las enfermedades gastrointestinales, respiratorias, de la piel, entre otras [21].

Tabla 3. Niveles de enterococos

Enterococos NMP/100 ml	Clasificación de la playa
0 - 500	Para uso Recreativo
> 500	No apta para uso Recreativo

La Secretaría de Salud de México establece que los criterios para clasificar las playas son de acuerdo a los niveles de la tabla 3 sobre la calidad de las aguas en cuanto al número más probable de enterococos en 100 mL. Las playas de Punta Galeta en el Caribe y Playa Hermosa y Playa La Marinera son aptas para uso recreativo, debido a que su clasificación se encuentra entre 0 y 500 NMP/100 mL.

Las playas que presentaron una baja presencia de enterococos fueron: Punta Galeta y Playa La Marinera, estos sitios se caracterizan por la conservación de la vida acuática, ya que existen normativas nacionales que velan por su protección.

Sin embargo, en Playa Teta para la medición realizada en agosto de 2014 correspondiente a la temporada lluviosa, se presentan valores de números más probable mayores a 500, posiblemente por las aportaciones de

agua dulce provenientes del Río Teta y sus tributarios, ya que para esta temporada el caudal de aportación es mayor y lleva consigo grandes cantidades de nutrientes.

En general, desde el punto de vista de calidad del agua, los cuatro sitios de muestreo, presentaron durante la temporada seca condiciones óptimas para propósitos recreativos.

5.6 Clorofila *a* y nutrientes inorgánicos (nitrito, nitrato y fósforo total)

La clorofila *a* es el principal pigmento fotosintético presente en las algas, es también un indicador del grado de contaminación de los ecosistemas acuáticos y un importante índice del estado fisiológico del fitoplancton. La concentración de clorofila *a* en las costas depende en gran medida de los niveles de precipitación y del drenaje continental. En condiciones generales la mayor cantidad de clorofila *a* se presenta por encima de la termoclina [22].

Los elementos llamados nutrientes son indispensables para la producción de alimento en los océanos, están compuestos de nitrógeno, fósforo, sílice, manganeso, cobre y hierro. Estos nutrientes se encuentran en el agua de mar de una manera extremadamente diluida, pero en cantidad suficiente para cubrir las necesidades nutritivas de las plantas marinas [15].

El nitrógeno es el elemento principal de estos nutrientes y por la acción de las bacterias puede encontrarse en forma de nitritos y de nitratos participando en reacciones tanto químicas como biológicas. Este nitrógeno en el mar representa el 35% del total del océano y el otro 65% se presenta en forma de nitrógeno gaseoso [18].

El fósforo total es un parámetro crítico en la calidad de aguas, es un nutriente esencial para los organismos vivientes, ya que influye en el proceso de fotosíntesis.

Entre las fuentes antropogénicas de fósforo se consideran las aguas servidas domésticas e industriales y las fuentes no puntuales se asocian a las escorrentías provenientes de áreas agrícolas y domésticas [23].

Según Kwiecinski y D' Cruz (1994), las concentraciones de clorofila *a* y nutrientes en la bahía de Panamá dependen en gran medida de las lluvias y del drenaje superficial, ya que disminuyen, por dilución, la concentración de los nutrientes en el agua. En este estudio, en la bahía de Panamá para la temporada lluviosa, la concentración de nutrientes fue muy baja y

bastante uniforme en cuanto a su distribución vertical y horizontal; sin embargo, para la temporada seca, por efecto del afloramiento, la concentración de nutrientes aumentó en todos los niveles.

En la Bahía de Limón ubicada en la Costa del Caribe, para este mismo estudio, la temporada lluviosa, la concentración de nitratos, clorofila *a* y fósforo total fueron bastante bajas y muy uniformes. Además, las mediciones indicaron una zona costera caribe oligotrófica en el que el nitrato-nitrito se repone a través de entrada terrestre por la escorrentía de agua dulce. Sin embargo, no hubo evidencia notable de la entrada de fósforo total a través de tal escorrentía.

Las mediciones por temporada de la calidad de agua en los cuatro sitios de muestreo no revelaron un marcado patrón estacional en los parámetros de nutrientes, sin embargo, son evidentes las diferencias entre la costa del Caribe y del Pacífico.

Como se aprecia en la tabla 2, se presentaron valores de clorofila *a*, nitrato y fósforo total, mayores en la costa del Pacífico. En un estudio realizado en áreas costeras de San Blas y la Bahía de Panamá concluye que la clorofila *a* es más abundante en el Pacífico donde el agua de mar es más turbia, menos salada y ligeramente más fría. En la estación seca durante el fenómeno de afloramiento en el Golfo de Panamá, estas diferencias se amplifican y las condiciones pueden llegar a ser eutróficas [10].

La concentración de clorofila *a* en la superficie del agua de mar se mantuvo en valores muy bajos en los cuatro puntos de muestreo, siendo el valor más alto registrado de 0.137 mg/L en Playa Hermosa para la temporada lluviosa.

Punta Galeta en el Caribe tuvo una menor concentración de NO_3 , sin embargo, las concentraciones de NO_2 fueron más altas, en comparación con los puntos de muestreo en el Pacífico durante la temporada seca y lluviosa.

Las concentraciones de nitrato más altas se registraron en Playa Teta y Playa La Marinera con valores de hasta 0.120 mg/L en comparación con los valores registrados para Punta Galeta y Playa Hermosa con valores por debajo de los 0.020 mg/L.

Según los Criterios de Calidad de Agua Marina de la región ASEAN (Association of Southeast Asian Nations) para la protección de la vida acuática los valores de N-NO_2 deben ser menores a 0.055 mg/L. En cuanto a los valores de N-NO_3 , un estudio realizado en la bahía de

Panamá y el golfo de Chiriquí mostraron valores entre 0.022 a 0.891 mg/L [8].

Las concentraciones de fósforo total en Punta Galeta, Playa Teta y Playa Hermosa para la temporada lluviosa fueron valores menores a 0.042 mg/L. Comparando ambas costas los niveles de fósforo total fueron más bajos en la Costa del Caribe que en la Costa del Pacífico.

6. Conclusiones

El establecimiento de una línea base de parámetros de calidad de agua marina costera fue satisfactorio. A partir de los datos obtenidos, se concluye que sí existe una posible relación entre la calidad del agua marina costera y la influencia de las condiciones climáticas sobre la concentración de los parámetros y su comportamiento estacional, se logró comparar los resultados obtenidos con estudios previos realizados en Panamá y conocer con mayor claridad los ambientes marino-costeros estudiados al igual que ahora se cuenta con una información valiosa que puede ser perfectamente continuada y utilizada inclusive en otros contextos.

Los resultados obtenidos sobre la calidad de agua muestran que en la costa del Caribe en comparación con la costa del Pacífico hubo una distribución más uniforme de las propiedades físico-químicas, en la costa del Pacífico se presentaron diferencias más marcadas entre la temporada seca y lluviosa, esto puede deberse a las características propias de cada litoral y las condiciones climáticas, terrestres y antropogénicas que inciden en ellas. Se recomienda la continuación de este proyecto a largo plazo con el fin de evaluar los posibles efectos del cambio climático en Punta Galeta, Playa Teta, Playa Hermosa y Playa La Marinera.

7. Referencias

- [1] Fraga, J., & Jesús, A. (2008). Coastal and Marine Protected Areas in Mexico. Chennai, India: International Collective in Support of Fishworkers.
- [2] Red Española de Ciudades por el Clima. (2006). Cambio Climático en las Ciudades Costeras. Madrid, España: FEMP.
- [3] ANAM. (2010). Atlas Ambiental de Panamá. Panamá.
- [4] CREHO. (2010). Inventario de los Humedales Continentales y Costeros de Panamá. Panamá: AVINA.
- [5] MarViva. (2011). Diagnóstico de las áreas marinas protegidas y de las áreas marinas para la pesca responsable en el Pacífico Panameño. Panamá: Fundación MarViva.
- [6] ARAP. (2010). Documento de Referencia para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (EsIA) en zonas Marino Costeras y Aguas Continentales. Panamá.
- [7] Kwiecinski, B., & D' Croz, L. (1994). Oceanografía y Calidad del Agua. Scientia, Vol.8 No.2, 31-49.
- [8] D' Croz, L., & O' Dea, A. (2007). Variability in upwelling along the Pacific shelf of Panama and implications for the distribution of nutrients and chlorophyll. Estuarine, Coastal and Shelf Science 73, 325-340.
- [9] D' Croz, L., & O' Dea, A. (2009). Nutrient and Chlorophyll Dynamics in Pacific Central America (Panama). Smithsonian Contributions to the Marine Sciences. Number 38, 335-344.
- [10] D' Croz, L., & Robertson, D. (1997). CARICOMP.1997. Coastal Oceanographic Conditions Affecting Coral Reef on both sides of the Isthmus of Panamá. Proc. 8th Int. Coral Reef Symp. 2:2053-2058. Panamá.
- [11] UNFCCC. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. Obtenido de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- [12] Martínez, J., Fernández Bremauntz, A., & Osnaya, P. (2004). Cambio climático: una visión desde México. México.
- [13] Siedler, G., Church, J., & Gould, J. (2001). Ocean Observation and Climate. Barcelona: Grafos SA Arte sobre Papel.
- [14] APHA, AWWA, WEF. (2005). Standar Methods. United States of America.
- [15] Donoso, J., & Ventura, P. (1985). Parámetros Físico-Químicos en la Bahía de Panamá durante la temporada de afloramiento. Panamá.
- [16] D' Croz, L., & Maté, J. (2004). Experimental responses to elevated water temperature in genotypes of the reef coral *Pocillopora damicornis* from upwelling and non-upwelling environments in Panama. Coral Reefs 23, 473-483.
- [17] Forsbergh, E. (1969). On the climatology, oceanographic and fisheries of the Panamá Bight. Bull Inter-Amer Trop Tuna Comm, 14:49-259.
- [18] Cifuentes, J., Torres-García, M., & Frías Mondragón, M. (2002). El Océano y sus Recursos, II. Las Ciencias del Mar: Oceanografía Geológica y Oceanografía Química. México: FCE, SEP, CONACyT.
- [19] Grey G., A., Domínguez de Franco, V., & Castellero, M. (2014). Determinación de Indicadores Físicoquímicos y Microbiológicos de calidad del agua superficial en la Bahía de Manzanillo. I+D Tecnológico, 16-27.
- [20] CEPIS. (2000). Historia y Aplicación de Normas Microbiológicas de Calidad de Agua en el Medio Marino. Panamá.
- [21] COFEPRIS. (2004). Lineamientos para determinar la calidad de

agua de mar para uso recreativo con contacto primario. México: Secretaría de Salud.

[22] Rivera, C., Zapata, A., Pinilla, G., Donato, J., Chaparro, B., & Jiménez, P. (2005). Comparación de la Estimación de la

Clorofila "a" mediante los métodos espectrofotométrico y fluorométrico. *Acta Biológica Colombiana*, Vol. 10 No. 2, 95.

[23] Sánchez de Fuentes, J. (2001). El Fósforo, parámetro crítico de calidad de agua, técnicas analíticas y de muestreo. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Preparación y caracterización de películas delgadas de SnO₂:F depositadas mediante la técnica de rocío pirolítico y sus aplicaciones como TCO's

Preparation and characterization of SnO₂: F thin films deposited by spray pyrolysis technique for TCO's applications

Héctor Miranda¹, Amanda Watson¹, Ildemán Abrego¹, Eleicer Ching-Prado¹

¹Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá.

hector.miranda@utp.ac.pa, amanda.watson@utp.ac.pa, ildeman.abrego@utp.ac.pa, eleicer.ching@utp.ac.pa

Resumen— Películas delgadas de SnO₂:F fueron depositadas sobre sustratos de vidrio utilizando la técnica de rocío pirolítico. Para la preparación de las muestras, se utilizó una solución de dicloruro de estaño SnCl₂·2H₂O a la cual se le añadió fluoruro de amonio (10 wt. % NH₄F) con el fin de mejorar sus propiedades ópticas y eléctricas. Las películas se prepararon con diferentes espesores de 140 nm a 732 nm y sinterizadas a una temperatura de 500 °C. Un equipo de deposición semi-automatizado permitió controlar el espesor de las muestras. La morfología superficial de las películas fue estudiada por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y las propiedades ópticas fueron estudiadas por espectroscopia UV-Visible. Los resultados mostraron que las películas poseen una alta transmitancia en el visible aproximadamente de 74% a 87%, siendo el promedio de ancho de banda prohibida alrededor de 3,99 eV. Usando la técnica de cuatro puntas de Van der Pauw, se estudiaron las propiedades eléctricas de las muestras. El valor mínimo de resistencia laminar obtenido fue de 78,7 Ω / □ para un espesor de 356 nm, el cual corresponde a una resistividad y figura de mérito de 2,80x10⁻³ Ω-cm y 2,00x10⁻³ Ω⁻¹ respectivamente. Las excelentes propiedades ópticas y eléctricas obtenidas son comparables con resultados obtenidos utilizando técnicas más costosas. Por tanto, la técnica de rocío pirolítico puede ser considerada como una alternativa económica y viable para la producción en masa de óxidos conductores transparentes y su aplicación en celdas solares, electrodos transparentes, dispositivos optoelectrónicos entre otros.

Palabras claves— Celdas solares, Cerámico, Nanotecnología, Óxido de estaño, Película delgada, Rocío pirolítico, Semiconductor.

Abstract— Thin films of SnO₂:F were deposited on glass substrates using spray pyrolysis technique. A solution of tin dichloride SnCl₂·2H₂O, to which was added ammonium fluoride (10 wt. % NH₄F) in order to improve its optical and electrical properties, was used for sample preparation. The films were deposited with different thicknesses, since 140 nm to 732 nm and sintered at 500 °C. Semi-automated deposition equipment allowed thickness control of the samples. The surface morphology of the films was study by Scanning Electron Microscopy (SEM). UV-visible spectroscopy revealed that the films have a high optical transmittance in the visible range, between 74 and 87 %, while the average band gap is around 3,99 eV. Using the four-point Van der Pauw technique, the electrical properties of the samples were studied. The minimum sheet resistance obtained was 78,7 Ω / □ for a thickness of 356 nm which correspond to a resistivity and figure of merit values of 2,80x10⁻³ Ω-cm and 2,00x10⁻³ Ω⁻¹ respectively. The excellent optical and electrical properties obtained are comparable with results obtained using more expensive techniques. Therefore, the spray pyrolysis technique can be considered as an economical alternative and viable for mass production of transparent conducting oxides for use in solar cells, transparent electrodes and other optoelectronic devices.

Keywords— Solar Cells, Ceramic, Nanotechnology, Tin oxide, Thin film, Spray pyrolysis, Semiconductor.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 27 de noviembre de 2015

Fecha de aceptación: 7 de abril de 2016

1. Introducción

Los óxidos conductores transparentes (TCO's; *transparent conducting oxides*) han captado la atención en los últimos años debido a que poseen excelentes propiedades eléctricas y ópticas [1]. Entre

los mencionados, el óxido de estaño (SnO₂) presenta varias ventajas con respecto a otros por su bajo costo, baja resistencia eléctrica y elevada transparencia en el rango visible del espectro electromagnético. El SnO₂ es un semiconductor tipo N, que debido a la presencia de vacancias de oxígeno en su estructura y que actúan como defectos donantes de electrones permite que sea ampliamente utilizado en dispositivos tales como sensores de gases, óxidos conductores transparentes, catalizadores entre otros [2].

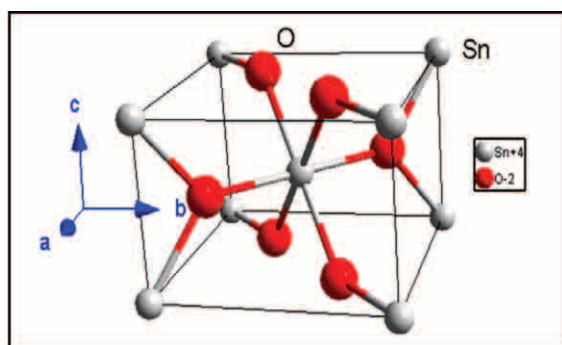


Figura 1. Celda unitaria del SnO₂.

El SnO₂ en el estado sólido tiene una estructura cristalina tetragonal tipo rutilo. Según esta disposición, los átomos de estaño ocupan el centro de un octaedro casi regular constituido por los átomos de oxígeno. Por lo tanto, cada átomo de oxígeno se halla rodeado por tres átomos de estaño dispuestos aproximadamente en forma de triángulo equilátero como se aprecia en la figura 1 [3]. El SnO₂ presenta un punto de fusión aproximadamente de 1630 °C lo que permite utilizarlo en aplicaciones a altas temperaturas. En su forma estequiométrica el SnO₂ es un aislante eléctrico, sin embargo, en su forma habitual no estequiométrica tiene una marcada presencia de vacantes de oxígeno, lo que le transforma en un buen conductor degenerado. La energía de formación de estos defectos intrínsecos es aproximadamente de 2.25 eV razón por la cual generalmente aparecen en elevada concentración en su estructura. Las vacancias de oxígeno generan niveles donadores por debajo de la banda de conducción, estas son responsables de su conductividad tipo N.

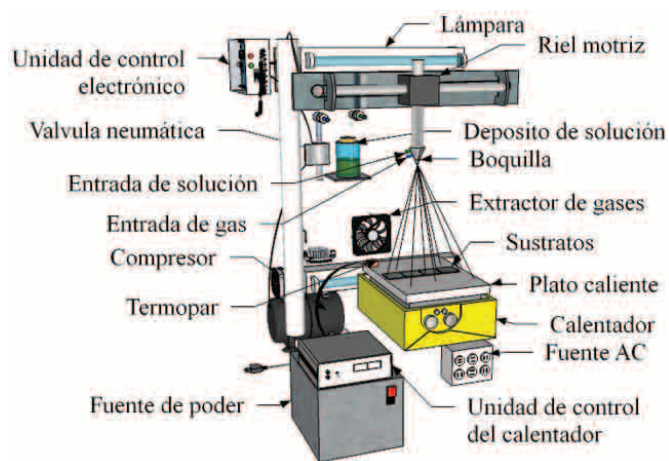


Figura 2. Sistema de rocío pirolítico utilizado en la preparación de películas delgadas de SnO₂:F.

Por otro lado, la concentración de portadores de carga y por tanto la conductividad pueden incrementarse mediante la adición de dopantes como Sb, Pt o F. Debido a estas características, el SnO₂ se ha empleado en la fabricación de diferentes dispositivos optoelectrónicos. En este trabajo, se estudia los niveles de resistividad y la transmitancia de películas delgadas de SnO₂ dopadas con flúor y su posible aplicación como contactos eléctricos transparentes [4].

2. Materiales y métodos

Se prepararon películas delgadas de dióxido de estaño (SnO₂) utilizando un sistema semiautomatizado de rocío pirolítico elaborado en nuestro laboratorio. El sistema de deposición cuenta con una unidad de control electrónica que permite controlar de forma eficiente la temperatura del sustrato, el flujo de gas y el movimiento longitudinal de la boquilla de atomización. La figura 2 ilustra el equipo utilizado en la preparación de las muestras. Como sustratos, se utilizaron vidrios para microscopios cortados con un tamaño de 25,4 mm x 25,4 mm y 1.0 mm de espesor. Los vidrios fueron lavados con detergente neutro y después limpiados con alcohol isopropílico (mallinckrodt Chemicals) para eliminar cualquier residuo no deseado. La solución precursora se preparó disolviendo 6,0081g de SnCl₂·2H₂O (Merk reagent grade) en 90 mL de agua destilada. A la anterior solución se añadieron 12 mL de HCl a fin de incrementar su transparencia. Se utilizó fluoruro de amonio (10 wt. % NH₄F) como agente dopante, con el objetivo de mejorar las propiedades ópticas y eléctricas de las películas [5]. La solución obtenida se agitó magnéticamente por una hora hasta obtener una solución homogénea [6]. La atomización se realizó utilizando un flujo de aire de 5 mL/min y una presión de 1 bar. La velocidad de movimiento transversal del atomizador fue de 7,5 cm/s. La distancia desde el atomizador hasta el sustrato fue de 30 cm en ángulo de 90°. Los sustratos se colocaron en un plato caliente y su temperatura fue monitoreada con ayuda de un controlador CAL3300, para lo cual se utilizó un termopar de cromo-aluminio para alta temperatura. Después de la deposición, los sustratos se dejaron enfriar dentro de la cámara de atomización, hasta alcanzar la temperatura ambiente. La temperatura utilizada para sinterizar todas las muestras fue de 500 °C. Utilizando Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

se observó la morfología superficial de las muestras. El microscopio utilizado fue de la marca ZEISS EVO 40 VP. La transmitancia óptica de las películas fue medida utilizando un espectrofotómetro de doble haz de la marca Espectronic Genesis 5. Las propiedades eléctricas de las muestras se determinaron utilizando la técnica de 4 puntas de Van der Pavn [7].

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización morfológica

Utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se estudió la evolución superficial de las muestras, los resultados se presentan en la figura 3.

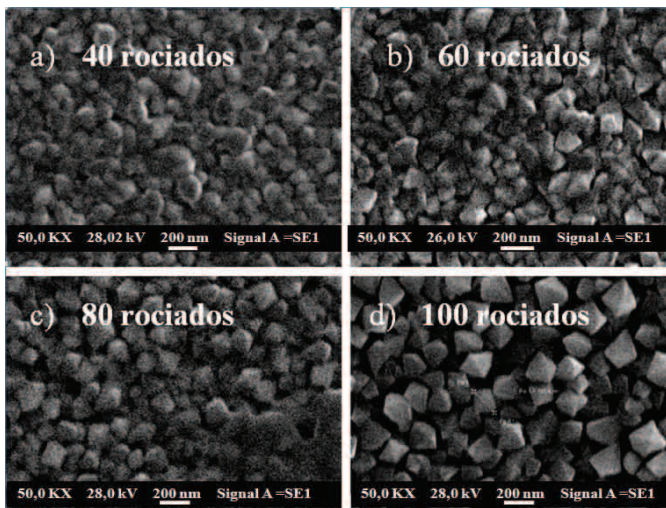


Figura 3. Imágenes superficiales SEM de las películas de $\text{SnO}_2\text{:F}$ preparadas con diferente número de rociados.

Las micrografías muestran la formación de una nanoestructura compacta y homogénea. La imagen correspondiente a la muestra de 40 rociados figura 3.a, revela un espacio intergranular prácticamente nulo y la formación de fronteras de grano desde los primeros rociados, además esta imagen confirma la idea de que existe una buena adherencia al sustrato y que los granos se forman desde las primeras capas. Se puede observar que a medida que se incrementa el número de rociados aparecen granos de gran tamaño con direcciones aleatorias de crecimiento. La imagen correspondiente a la muestra de 100 rociados (figura 3.d) muestra una distribución de granos uniforme sobre toda la superficie del sustrato. Se observan cristales poliédricos de caras triangulares bien definidas y morfología piramidal u

octaédrica y su tamaño oscila entre 100 y 200 nm aproximadamente. De estos resultados se deduce que el incremento del número de rociados produce un aumento del ángulo superior de las pirámides, provocando así una superficie mucho más rugosa y una pérdida de la orientación preferencial de crecimiento.

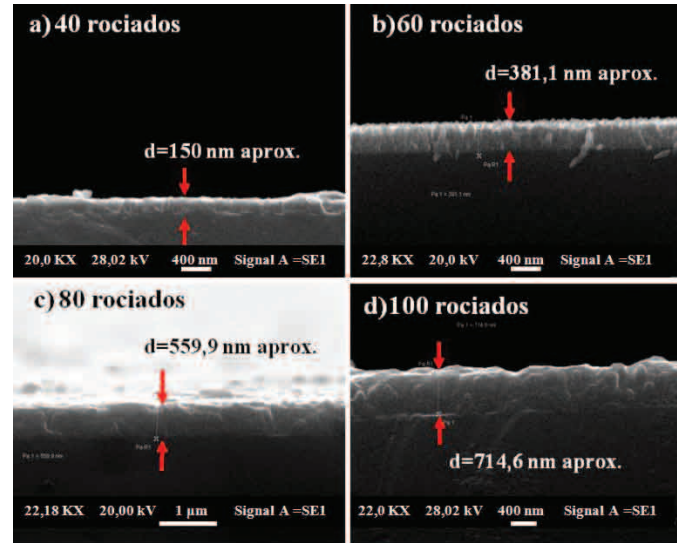


Figura 4. Micrografías de la sección transversal de las películas de $\text{SnO}_2\text{:F}$.

La figura 4 muestra micrografías tomadas de la sección transversal de las películas. Estas imágenes permitieron observar un recubrimiento homogéneo y de espesor uniforme sobre la superficie del sustrato. Al realizar un proceso de medición directa sobre las micrografías, se confirmó que el espesor de las películas crece a medida que aumenta el número de rociados con valores comprendidos entre 150 nm para la muestra de 40 rociados y 714,6 nm para la muestra de 100 rociados.

3.2 Caracterización óptica

La figura 5 presenta los espectros de transmitancia obtenidos en un rango espectral de 200 a 1100 nm. Además se incluye el del sustrato de vidrio que se utilizó como referencia. Los resultados muestran que en el rango de luz visible (400 a 700 nm) las películas presentan un valor de transmitancia promedio comprendido entre 74,1% y 87,7% para las muestras de 100 y 40 rociados respectivamente. La variación anterior de los valores de transmitancia sugiere que al aumentar el número de rociados el espesor de la película aumenta produciendo una mayor absorción de radiación lumínica durante su

recorrido a través de la muestra. El estudio UV-Visible permitió calcular el espesor de las películas, para lo cual, se aplicó el método de mínimos, a partir de las siguientes relaciones [8]:

$$M = \frac{2s}{T_{\min}} - \frac{S^2 - 1}{2} \quad (1)$$

$$n = \left[M + (M^2 - S^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Donde (M) y (n) relacionan dos mínimos de cada gráfica con el índice de refracción (s) del vidrio. En este caso se utilizó $s = 1,51$ y (T_{\min}) es el valor de transmitancia para (λ_{\min}) utilizado [9].

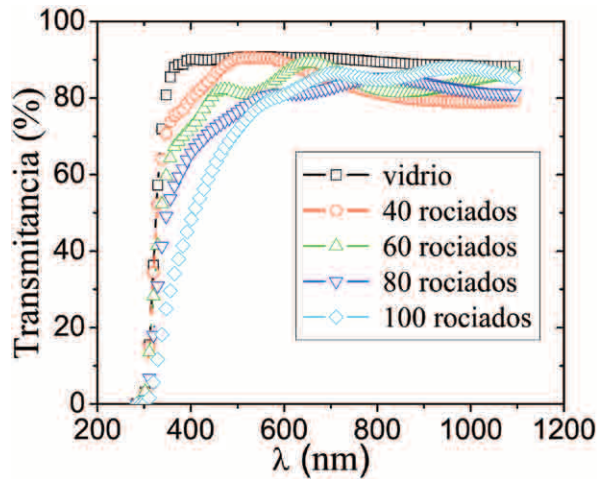


Figura 5. Espectros de transmitancia del SnO₂:F.

Resolviendo las ecuaciones (1) y (2) para dos mínimos de transmitancia consecutivos de la región de máxima transmitancia podemos encontrar el espesor de la película (d) con la ecuación:

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(2n_1 \lambda_2 - n_2 \lambda_1)} \quad (3)$$

En esta relación n_1 , n_2 son los índices de refracción de dos mínimos consecutivos obtenidos utilizando la relación (2), mientras que λ_1 , λ_2 son sus correspondientes longitudes de onda. Para la muestra de 60 rociados los mínimos requeridos se obtuvieron directamente del espectro UV-Visible mostrado en la figura 5; sin embargo para las demás películas estos mínimos fueron estimados mediante un proceso de ajuste utilizando el método de mínimos cuadrados no lineales. A fin de corroborar los

espesores estimados en SEM (figura 4), se realizó una comparación con los espesores obtenidos utilizando el método de mínimos. Los cálculos realizados a partir de la ecuación (3) y su comparación con los resultados obtenidos utilizando SEM se muestran en la figura 6. La anterior comparación revela que ambas técnicas de medición señalan resultados similares, lo cual contribuye en la confiabilidad de resultados al momento de utilizar indistintamente una u otra.

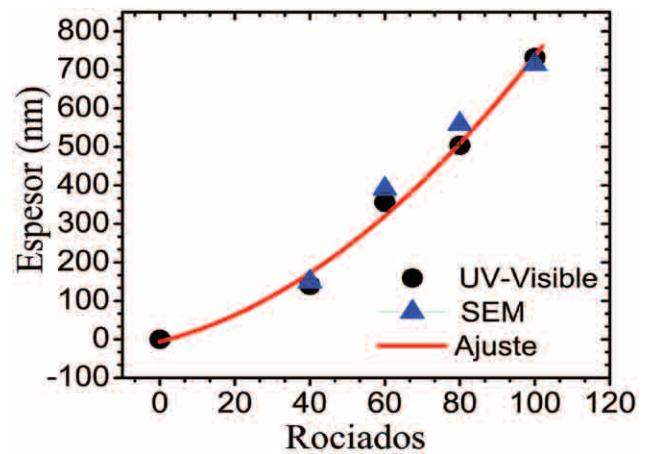


Figura 6. Espesor vs número de rociados para las muestras de SnO₂:F.

En el caso de películas delgadas de SnO₂ la transición óptica entre bandas, es de forma directa y el ancho de banda prohibida (E_g) está dado por la siguiente relación:

$$\alpha h\nu = (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (4)$$

En la anterior ecuación, $h\nu$ es la energía del fotón incidente y E_g es la energía del gap. El coeficiente de absorción (α) puede ser calculado a partir de la expresión:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

Donde (d) es el espesor de la película y (T) es la transmitancia de la muestra. En la figura 7, se presentan las gráficas de $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ utilizadas para calcular el ancho de banda prohibida (E_g) del las muestras de SnO₂:F.

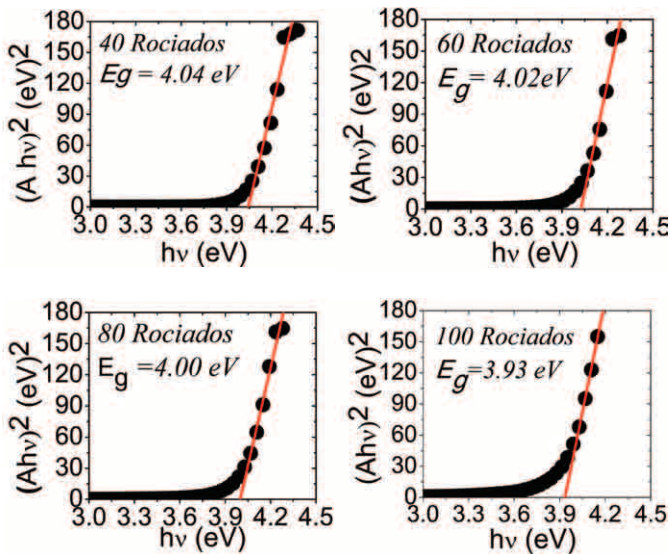


Figura 7. Determinación del ancho de banda prohibida (E_g) a partir de espectroscopia UV-Visible.

3.3 Caracterización eléctrica

Existen diferentes métodos para medir la resistividad de una muestra, dentro de ellos, sobresale por su sencillez el método de cuatro puntas de Van der Pauw. Este método permite determinar la resistividad de muestras planas de forma arbitraria, por lo cual es muy utilizado en el estudio de películas delgadas. La técnica anterior, consiste en la colocación de cuatro contactos en la periferia de la muestra, como se presenta en la figura 8. Según la disposición de los contactos, existen dos resistencias características $R_{CD,AB}$ y $R_{AD,BC}$. Así, si la corriente circula entre los contactos A y B (I_{AB}), y se mide la diferencia de potencial entre C y D (V_{CD}) se define la resistencia $R_{AB,CD}$ como $R_{AB,CD} = V_{CD} / I_{AB}$.

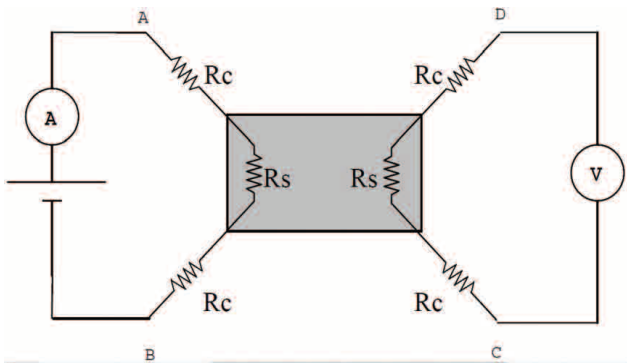


Figura 8. Circuito real utilizado para realizar la técnica de Van der Paw.

De igual modo, se define la resistencia $R_{AD,BC}$ como $R_{AD,BC} = V_{DA} / I_{BC}$. Según Van der Pauw, estas resistencias deben cumplir la relación:

$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} \cdot R_{AD,BC}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} \cdot R_{CD,AB}\right) = 1 \quad (6)$$

Donde ρ , es la resistividad y d es el espesor de la muestra [10]. De este modo, la resistividad se puede calcular a partir de la relación:

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \left(\frac{R_{AD,BC} + R_{CD,AB}}{2}\right) \cdot F \quad (7)$$

En esta expresión, el término R_s define a la resistencia laminar que se expresa como:

$$R_s = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \left(\frac{R_{AD,BC} + R_{CD,AB}}{2}\right) \cdot F \quad (8)$$

Siendo F un factor de corrección de geometría que depende de los valores de $R_{CD,AB}$ y de $R_{AD,BC}$ y está dado por la siguiente relación [11].

$$F = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2}\right) \left(\frac{R_{CD,AB} + R_{AD,BC}}{R_{CD,AB} + R_{AD,BC}}\right)^2 \quad (9)$$

Las unidades de resistencia laminar (R_s) es el ohm, sin embargo para distinguirla de una resistencia ordinaria la unidad que se utiliza es $[\Omega / \square]$. Para las medidas de resistencia laminar, se seleccionaron películas al azar de cada serie que se preparó. Esto quiere decir que de cuatro películas preparadas bajo la mismas condiciones, se tomó una y se le midió la resistencia laminar los resultados se muestran en la figura 9.

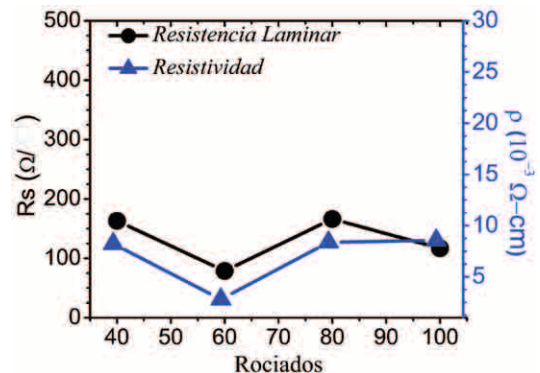


Figura 9. Resistencia laminar (R_s) y Resistividad (ρ) de las muestras de $\text{SnO}_2:\text{F}$ preparadas.

En la figura 9 se puede observar que a partir de la muestra de 40 rociados R_s tiende a disminuir hasta alcanzar valores de $78,7 \Omega/\square$ para un espesor de 356 nm correspondiente a la muestra de 60 rociados. Los valores de R_s correspondientes a las muestras de 80 y 100 rociados superan significativamente el valor correspondiente a la muestra de 60 rociados, esto muestra que un aumento en el espesor de la película no asegura la obtención de una mejor R_s , sin embargo, este comportamiento puede ser consecuencia de un incremento en la movilidad de los portadores de carga debido a una mejora en la estructura cristalina de la película. Es importante señalar que la muestra de 60 rociados también presentó los valores de resistividad más baja, aproximadamente $2,80 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ valor que describe una excelente conductividad eléctrica. Existe una gran diversidad en aplicaciones para un TCO, dependiendo del campo de aplicación se puede considerar más importante la transparencia o la conductividad eléctrica. Comúnmente para definir la calidad del TCO, se utiliza un parámetro que relaciona la transparencia del material y su conductividad. Este parámetro, se conoce como figura de mérito y es definido por la siguiente ecuación [12]:

$$\Phi_M = \frac{T^{10}}{R_s} \quad (10)$$

donde T es la transmitancia del material y R_s es la resistencia laminar.

Los cálculos realizados empleando la ecuación 10, se presentan en la figura 10. Estos resultados revelan que existe una región en donde la figura de mérito aumenta alcanzando un máximo de $2,00 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ aproximadamente. Luego de este incremento la figura de mérito disminuye hasta valores cercanos a los $4,30 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ para la muestra de 100 rociados. Como la figura de mérito debe ser lo más grande posible, la muestra de 60 rociados en esta investigación es la que presenta el mayor valor. Los resultados presentados en las figuras 5 y 9 permiten observar que no es posible obtener una máxima transmitancia y una mínima resistencia laminar en una muestra de manera simultánea. Sin embargo, aunque no se haga presente una tendencia definida en el comportamiento de la figura de mérito debido a la

escases de puntos (figura 10). La correlación existente con el espesor de la película nos permite entonces distinguir que la muestra de 60 rociados presenta las mejores características para ser utilizada como óxido conductor transparente.

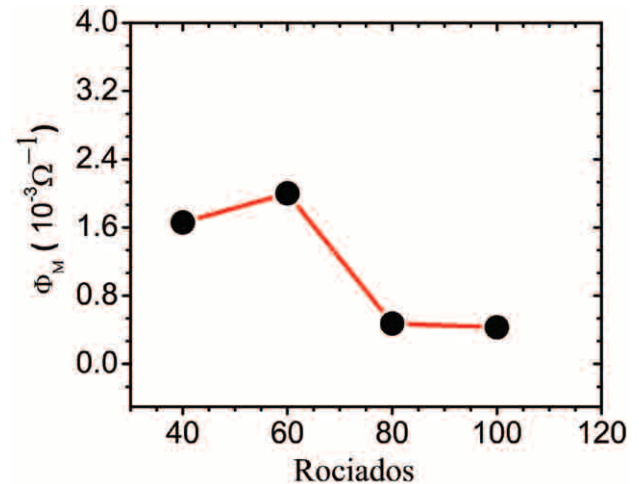


Figura 10. Figura de mérito (Φ_M) vs el número de rociados.

4. Conclusiones

Utilizando la técnica de rocío pirolítico, se depositaron sobre sustratos de vidrio películas delgadas de SnO₂:F con propiedades adecuadas para ser utilizadas como TCO's. El procedimiento de preparación de la solución ha sido rentable e incluye la disolución de un precursor metálico en HCl y agua destilada. Los resultados obtenidos a partir del estudio de Espectroscopía UV-Visible muestran un aumento en el espesor de las películas en función del número de rociados con valores comprendidos entre 140 y 714 nm. Se observó que la transmitancia disminuye al aumentar el número de rociados presentando un valor promedio del 80,2 %. El estudio de la energía de banda prohibida reveló que existe una disminución en la misma, producto del aumento en el número de rociados. Como consecuencia el coeficiente de absorción del material (α) aumenta, produciendo la disminución en la transmitancia observada a medida que crece el espesor de la película. El valor promedio de la energía prohibida calculada fue de 3,99 eV. A través de microscopía electrónica de barrido (SEM), se observó que en todas las películas la deposición se

realizó en forma homogénea permitiendo la obtención de estructuras compactas y con buena adherencia al sustrato. Las micrografías muestran que los granos pertenecientes a las muestras de 60, 80 y 100 rociados poseen una estructura piramidal y direcciones aleatorias de crecimiento. La micrografía de la muestra de 100 rociados presenta cristales poliédricos de caras triangulares bien definidas con tamaños que varían entre 100 y 200 nm aproximadamente. El método de cuatro puntas de Van der Prawn permitió calcular el valor mínimo de resistencia laminar, el cual fue de $78,7 \Omega/\square$ para un espesor de 356 nm correspondiente a una resistividad y figura de mérito de $2,80 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ y $2,00 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ respectivamente, mostrando que la muestra de 60 rociados es la que cuenta con las mejores propiedades para TCO.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a SENACYT (proyecto FID05-061) por el apoyo financiero. Todos los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Tropicales (Smithsonian) y en especial a Jorge Ceballos que nos ayudó a medir, analizar y discutir la caracterización morfológica (SEM).

6. Referencias

- [1] Licznarski, B. Thick-film Gas Microsensors Based on Tin Dioxide. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*. s.l.: Technical Sciences, 2004. págs. 37-42.
- [2] Chacón, M; Abrego, I; Watson, A; Ching-Prado, E. Preparación de Películas de Óxido de Estaño como Sensores de Gases. Universidad de Passo Fundo. Passo Fundo : CIATEC-UPF, 2009. pág. 59. 1.
- [3] García, H; Martínez, A;. Formation of Metal Oxides Thin Films: A Thermodynamic Analysis. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav-Saltillo), Instituto Politécnico Nacional. México: Recent Advances in Circuits Systems Signal and Telecommunications, 2010. pág. 144.
- [4] Jebbari, N; Kamoun Turki, N; Bennaceur, R. Effect of SnCl4 Concentration on SnO2:F Deposited by Chemical Spray Pyrolysis. Laboratoire de P.M.C, Faculté de Sciences de Tunis. Tunis: International Renewable Energy Congress, 2010. págs. 276-279
- [5] Huiyong, L; Avrutin, V; Izyumskaya, N; Özgür, Ü; Morkoc, H. Transparent Conducting Oxides for Electrode Applications in Light Emitting and Absorbing Devices. s.l.: Superlattices and Microstructures, 2010. págs. 258-484.
- [6] Ravichandran, K; Muruganatham, G; Sakthivel, B; Philominathan, P. Nanocrystalline Doubly Doped Tin Oxide Films Deposited Using A Simplified and Low-Cost Spray Technique for Solar Cell Applications. P.G. & Research Department of Physics, AVVM. Sri Pushpam College. Thanjavur District Tamil Nadu India: Ovonic Research, 2009. págs. 63-69, Journal. 3.
- [7] Allebrod, F; Lolk Mollerup, P; Chatzichristodoulou, C; Mogensen, M. Denmark. Electrical Conductivity Measurements of Aqueous and Immobilized Potassium Hydroxide. Paper No 181ELE, International Conference on Hydrogen Production ICH2P-11, 2011, págs. 2-3.
- [8] Garnica, I; Pérez Santiago, A.D; Gochi-Ponce, Y;. Caracterización de Películas Delgadas de SnO2 Obtenidas Sobre Vidrio por Aspersión Piroclítica Intermitente para Celdas Solares Tipo Grätzel. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Instituto Tecnológico de Oaxaca. Oaxaca, México: Superficies y Vacío, 2013. págs. 36-41. 2.
- [9] Cediel, G; Rojas, F; Infante, H.L; Gordillo, G. Determinación de Constantes ópticas y Simulación Teórica del Espectro de Transmitancia de Películas Delgadas de CdS,CdTe, y Cd (S,Te) Depositadas por Evaporación. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: Revista Colombiana de Física, 2002. pág. 54. 1.
- [10] Elangovan, E; Ramamurthi, K. Optoelectronic Properties of Spray Deposited SnO2:F Thin Films for Window Materials in Solar Cells. Department of Physics, Bharathidasan University, Tiruchirappalli. India: Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 5, 2003. págs. 45-54. 1.
- [11] Elangovan, E; Singh, M; Dharmaprakash, M; Ramamurthi, K. Some Physical Properties of Spray Deposited SnO2 Thin Films. India: Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 6, 2004. págs. 197-203. 1.
- [12] Haacke, G. Transparent conducting coatings. American Cyanamid Company. Connecticut: Annual Review of Materials Science, 1977. págs. 73-93. 7.

Microestructura y nanoindentación de la zona de la soldadura de un acero microaleado experimental

Microstructure and nanoindentation of the welding zone of an experimental microalloyed steel

Edgar López Martínez¹, Sergio Serna², Osvaldo Flores³, Bernardo Campillo^{3,4}

¹Campus Tehuantepec, Universidad del Istmo, ²Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, ³Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México,

⁴Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

¹edgar0902@yahoo.com.mx, ²aserna@uaem.mx, ³osvaldo@fis.unam.mx, ^{3,4}bci@fis.unam.mx

Resumen— Se analizó el efecto de los ciclos térmicos de soldadura en la microestructura de un acero microaleado experimental martensítico-bainítico. En la zona de fusión se presenta una microestructura de bainita y ferrita acicular. En la zona afectada por el calor se presenta una microestructura de: a) bainita en la subzona de crecimiento de grano; b) ferrita poligonal en la subzona de recristalización; c) ferrita cuasi-poligonal y martensita revenida en la subzona intercrítica; d) martensita revenida en la subzona subcrítica. Mediante pruebas de microdureza se observó que se presenta un ablandamiento en las subzonas de recristalización, intercrítica y subcrítica, el cual está relacionado con la microestructura presente. Adicionalmente, con pruebas de nanoindentación, se observó un endurecimiento en la frontera que separa a la subzona intercrítica de la subcrítica, que puede ser atribuido a un fenómeno de endurecimiento secundario por precipitación de carburos de los elementos aleantes. Finalmente, se observó que la ferrita poligonal presenta un comportamiento y nanodureza similar a la bainita debido al efecto del borde de grano.

Palabras claves— Acero microaleado, Martensita revenida, Nanodureza, Nanoindentación, Zona afectada por el calor.

Abstract— The effect of welding thermal cycles on microstructure of a martensite-bainite experimental microalloyed steel was analyzed. In the fusion zone, bainite and acicular ferrite microstructure is presented. In the heat affected zone, the microstructure presented is: a) bainite in the grain coarsening subzone; b) polygonal ferrite in the recrystallization subzone; c) quasi-polygonal ferrite and tempering martensite in the intercritical subzone; d) tempering martensite in the subcritical subzone. By microhardness tests, a softening in the recrystallization, intercritical and subcritical subzones was observed, which is related to the microstructural features. Additionally, by nanohardness tests, hardening was observed in the boundary between intercritical and subcritical subzones, which can be attributed to a secondary hardening phenomenon due the precipitation of carbides of alloying elements. Finally, polygonal ferrite and bainite have similar behavior and nanohardness which is due the grain boundary.

Keywords— Microalloyed Steel, Tempering martensite, Nanohardness, Nanoindentation, Heat affected zone.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 27 de noviembre de 2015

Fecha de aceptación: 7 de abril de 2016

1. Introducción

Los aceros microaleados obtienen sus propiedades mecánicas finales por medio de los mecanismos de endurecimiento por tamaño de grano y precipitación de carbonitruros. Cuando un acero martensítico es sometido a un ciclo térmico de calentamiento y enfriamiento, se puede observar una disminución de la dureza, debido al revenido de la martensita. En la soldadura de aceros microaleados en donde la microestructura original del material base está compuesta por martensita, en la zona afectada por el calor (ZAC), se ha observado una

disminución de la microdureza. A esto se le conoce como ablandamiento de la ZAC. Este ablandamiento (disminución de la resistencia mecánica local), está relacionado con fallas de deformación localizada [1], además de que puede promoverse el agrietamiento inducido por el hidrógeno [2]. Este fenómeno se ha relacionado con las microestructuras desarrolladas en la ZAC por efecto de los ciclos térmicos y por el revenido de la martensita [3] que se promueve en la subzona denominada zona afectada por el calor subcrítica (ZACSC), en la cual se experimentan temperaturas pico inferiores a la temperatura crítica de transformación Ac1. El revenido de la martensita se ha estudiado ampliamente en el tratamiento térmico de aceros templados. A diferencia del revenido de aceros templados, el ciclo térmico que se presenta en la ZACSC es muy rápido. Este tipo de revenido como el

que se presenta en la soldadura (ciclos de calentamiento y enfriamiento rápidos) se ha estudiado muy poco.

El ablandamiento de la ZAC es un fenómeno complejo que es función de la microestructura original, la composición química, el calor de aporte de soldadura y el estado de deformación [3, 4].

La determinación del espesor del ablandamiento de la ZAC se realiza mediante un barrido de microdurezas en la zona de la soldadura, pero, mediante pruebas de nanoindentación, se ha probado que puede ser subestimado [5].

En este trabajo se determinó la nanodureza de las fases y microconstituyentes de la zona de la soldadura y el espesor de la ZACSC de un acero microaleado experimental que presenta una microestructura inicial de martensita y bainita.

2. Procedimiento

El material de trabajo es un acero microaleado experimental en forma de placas de 11 mm de espesor y con una composición química de: 0.028 % C, 0.244 % Si, 1.000 % Mn, 1.354 % Ni, 0.025 % Nb, 0.015 % Ti y 0.006 % N. Se realizó una soldadura de una pasada sin material de aporte con el proceso de soldadura por arco con gas-tungsteno (GTAW) sobre una placa del material. No se realizó un precalentamiento ni post-tratamiento térmico de la soldadura. Para revelar la microestructura producida, se utilizaron los reactivos: Nital 2, Picral 1 y LePera. Con el equipo Shimadzu Microhardness modelo HMV-2, se realizó un barrido de microdurezas, desde la zona de fusión (ZF) hasta el material base (MB), con una fuerza de 980.5 mN y con un tiempo de 15 s.

Las muestras que fueron utilizadas para la medición de la microdureza, se utilizaron para realizar pruebas de nanoindentación para determinar la nanodureza de las fases y/o microconstituyentes en cada zona de la soldadura. El procedimiento que se siguió fue el siguiente: 1) después de las mediciones de microdureza, estas muestras se desbastaron con lija 600 para eliminar las huellas del indentador Vickers, seguido de pulido fino con alúmina de 1 y 0.3 μm de tamaño de partícula, para posteriormente ser atacadas con nital 2 para revelar la microestructura de cada zona; 2) mediante el uso del microdurómetro Vickers, las muestras se marcaron en la ZF y las subzonas de la ZAC (zona afectada por el calor de crecimiento de grano (ZACCG), zona afectada

por el calor de recristalización (ZACRC) y zona afectada por el calor intercrítica (ZACIC)); 3) las muestras se pulieron con alúmina de 0.05 μm de tamaño de partícula hasta desaparecer toda la microestructura revelada por el ataque pero sin eliminar las marcas Vickers introducidas en las zonas; 4) finalmente, para dar el acabado final se utilizó una solución nanométrica de sílica coloidal hasta obtener una rugosidad menor a 40 nm. Se realizaron las pruebas de nanoindentación en las zonas marcadas con el microdurómetro. Estas pruebas se llevaron a cabo en un nanoindentador TI 750 Nanomechanical Test System marca Hysitron, con el uso de una punta Berkovich. Una vez realizadas las pruebas de nanoindentación, se adquirieron imágenes de las nanoindentaciones con las muestras pulidas y posteriormente se volvieron a tomar imágenes con las muestras atacadas con nital 2, Picral 1 y LePera para determinar las microestructuras que fueron nanoindentadas.

3. Resultados y análisis

En la figura 1 se presentan las microestructuras desarrolladas por efecto de los ciclos térmicos de soldadura. En el MB, se observa una microestructura de martensita y bainita. En la ZACIC se presentó una microestructura de ferrita cuasi-poligonal (FCP) y martensita revenida. En esta subzona, parte de la microestructura original transformó a austenita en el ciclo de calentamiento para posteriormente formar FCP en el ciclo de enfriamiento, pero debido a que las temperaturas pico que se alcanzaron se encuentran entre las temperaturas críticas de transformación A_{c1} y A_{c3} , parte de la microestructura original no transformó, por lo que parte de la martensita y bainita original se conservó; sin embargo esta microestructura que no transformó recibió un ciclo térmico parecido al de un revenido de alta temperatura. La ZACRC está compuesta por granos recristalizados de ferrita poligonal con un tamaño de grano de 8 μm . En la ZACCG y en la ZF, se observa que se promovió la formación de bainita, pero adicionalmente, en la ZF se observa la presencia de ferrita acicular.

De las pruebas de microdureza (figura 2), se puede observar un ablandamiento de la ZAC, que está relacionado con las microestructuras formadas por el efecto de los ciclos térmicos de soldadura. Bajo ciertas consideraciones, este fenómeno suele presentarse en aceros microaleados con tratamiento termomecánico [6]; adicionalmente, este

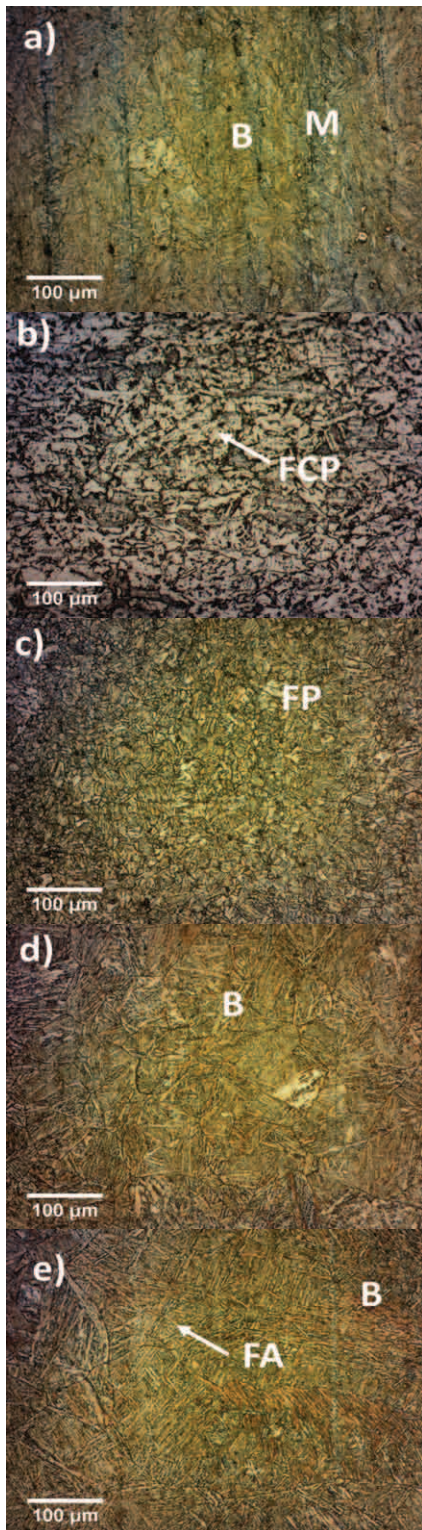


Figura 1. Microestructuras desarrolladas en la zona de la soldadura. a) MB; b) ZACIC; c) ZACRC; d) ZACCG y d) ZF. M: Martensita; B: Bainita; FCP: Ferrita cuasi-poligonal; FP: Ferrita poligonal; FA: Ferrita acicular.

ablandamiento se da en aceros cuya estructura está basada en microestructuras metaestables [7, 8].

El ablandamiento en la ZACSC se debe a que esta subzona experimentó un ciclo térmico parecido al de un revenido [5, 9]. Microscópicamente no es posible observar un cambio de fase en esta subzona ya que la temperatura pico que se alcanza durante el proceso de soldadura es inferior a la temperatura crítica A_{c1} , pero se puede presentar eliminación de dislocaciones y dilución y crecimiento de precipitados. En la ZACIC, parte de la microestructura que no transformó a austenita, se revino como en el caso de la ZACSC, y la que sí transformó a austenita en el ciclo de calentamiento, en el ciclo de enfriamiento formó ferrita, por lo que esta subzona es aún más blanda que la ZACSC. En la ZACRC, toda la microestructura original transformó a austenita en el ciclo de calentamiento y formó ferrita en el ciclo de enfriamiento, por lo que no existen vestigios de la microestructura original, resultando esta subzona la más blanda de todas.

En la figura 3 se presenta una curva fuerza-desplazamiento que se obtiene de las pruebas de nanoindentación. En esta figura se pueden observar tres parámetros importantes: la fuerza máxima (F_{max}), el desplazamiento máximo (h_{max}) y la rigidez elástica de la curva de descarga (S) definida como la pendiente de la parte del inicio de la curva de descarga durante el estado inicial de descarga.

La figura 4 muestra las curvas fuerza-desplazamiento de las fases y microconstituyentes de la zona de la soldadura. Se observa que bajo la misma fuerza máxima ($10000\mu N$) la martensita tiene una menor penetración en comparación con los demás microconstituyentes, lo cual concuerda con el hecho de que la martensita es el microconstituyente con mayor dureza y por lo tanto se resistirá más a la penetración. Asimismo, se observa que la ferrita poligonal y la bainita presentan un comportamiento similar y la ferrita acicular y la ferrita cuasi-poligonal presentan la mayor penetración.

La nanodureza (H) se define como la fuerza máxima aplicada entre el área de contacto bajo esta fuerza:

$$H = F_{max} / A \quad (1)$$

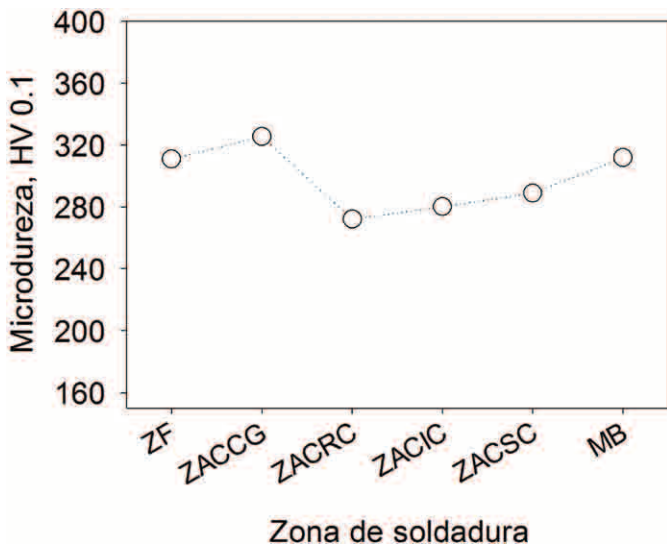


Figura 2. Microdurezas en la zona de la soldadura.

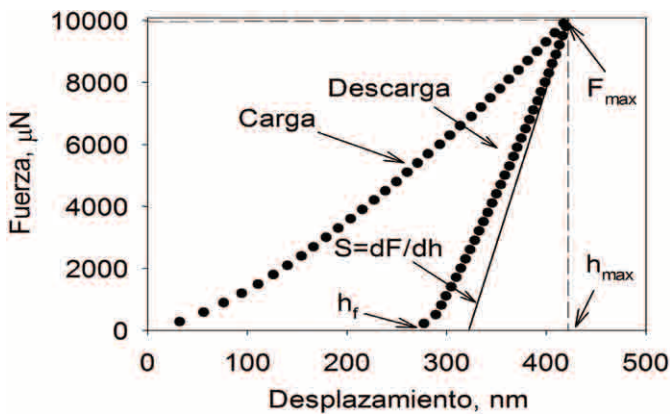


Figura 3. Curva fuerza-desplazamiento de una nanoindentación de la zona de fusión.

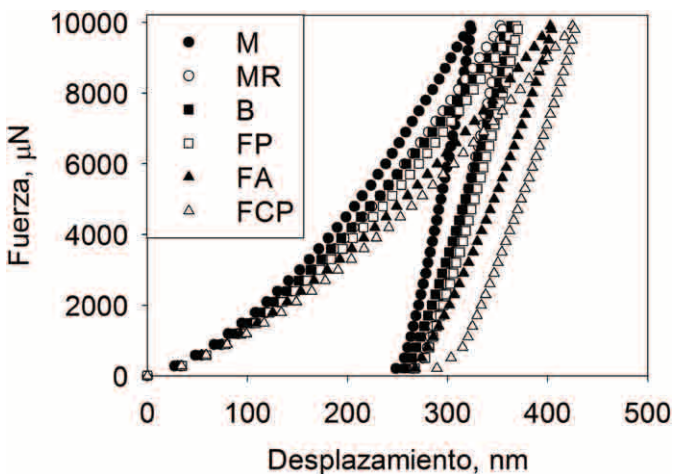


Figura 4. Curva fuerza-desplazamiento de los microconstituyentes de la zona de soldadura.

donde A es el área de contacto que es función del desplazamiento. Esta definición de fuerza difiere de la definición de dureza Vickers, la cual utiliza el área residual de la huella. El área de contacto, A , depende de la forma del indentador, que para el caso de un indentador perfecto del tipo Berkovich se puede determinar mediante:

$$A = 24.49h_c^2 \quad (2)$$

donde h_c es el desplazamiento al cual se hace el contacto a la fuerza máxima. Debido a que durante el contacto se presenta un fenómeno de hundimiento (sink-in) h_c no corresponde a h_{max} ; por lo que el desplazamiento a la fuerza máxima es:

$$h_c = h_{max} - h_h \quad (3)$$

donde h_h es el desplazamiento de hundimiento y se determina mediante:

$$h_h = \varepsilon P_{max} / S \quad (4)$$

donde ε es una constante que depende de la geometría del indentador. Debido a que el indentador no es perfecto, es decir la punta presenta un radio de curvatura, por lo que el área de contacto determinada mediante (2) será errónea. Oliver y Pharr [10] propusieron (5) para la determinación del área de contacto:

$$A = \sum_{n=0} C_n (h_c)^{2-n} \quad (5)$$

donde C_n son constantes que deben ser determinadas experimentalmente.

En la figura 5 se presentan las nanodurezas de los microconstituyentes de la zona de la soldadura. La martensita presenta la mayor nanodureza, con un valor de 4.3 GPa y la FCP la menor. Se observa que la barra de error es mayor para microconstituyentes o fases de menor nanodureza, lo cual se puede deber al efecto del borde de grano y de precipitados. Por ejemplo, en la FCP cuando la nanoindentación se realiza lejos de un borde de grano o precipitado, la nanodureza que se obtiene es de 2.8 GPa, en cambio cuando se realiza cerca de un borde de grano la nanodureza es de 3.2 GPa y cuando se realiza cerca de un precipitado puede llegar hasta 3.7 GPa. En la martensita y bainita es donde se presenta la menor barra de error, lo

cual indicaría que en la nanodureza, la contribución por transformación de fase es mayor que la contribución por tamaño de grano.

En la tabla 1 se presenta un resumen de nanodurezas de microconstituyentes reportadas en la literatura, en donde se observa que la nanodureza es función del contenido de carbono. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en nuestras pruebas.

De las figuras 4 y 5 se observa que la ferrita poligonal tiene un comportamiento y nanodureza similar a la bainita, lo cual no corresponde con las observaciones en la escala de la microdureza Vickers. La razón por la cual se da esto, se debe a que el tamaño de grano promedio en la ZACRC es de 8 μm y dado que las nanoindentaciones se realizaron con un espaciamiento de 10 μm , éstas se ejecutaron muy cerca de los bordes de grano; es decir, que además del mecanismo de endurecimiento por solución sólida, se suma el efecto de endurecimiento por tamaño de grano.

Comparando la nanodureza de la FP (3.8 GPa) de la ZACRC, que presenta endurecimiento por tamaño de grano, con la nanodureza de la FCP (2.9 GPa), en la cual el efecto de tamaño de grano es menor, se determina que la contribución del tamaño de grano en el aumento de nanodureza es del 24%. Debido a que la ferrita de la ZACRC y la ferrita del MB presentan la misma composición química, la diferencia en nanodureza entre ellas se debe principalmente por el efecto del borde de grano, es decir, por el mecanismo de endurecimiento por tamaño de grano.

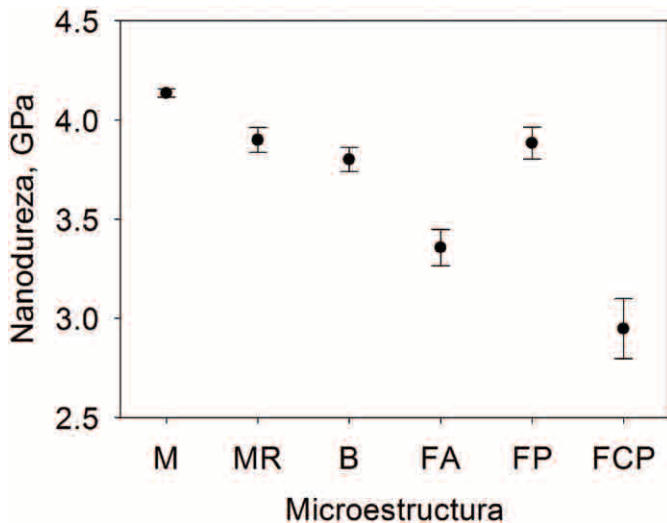


Figura 5. Nanodurezas de los microconstituyentes.

Tabla 1. Resumen de nanodureza de fases y microconstituyentes reportados en la literatura

Referencia	%C	Nanodureza (GPa)			
		F	B	M	MR
[11]	0.1	-	-	5.4	-
	0.2	-	-	6.5	-
	0.4	-	-	8.3	-
	0.6	-	-	10.3	-
	0.8	-	-	10	-
[12]	0.15,0.08	-	4.11	6.57	-
[13]	0.13	3	-	7	4
[14]	0.071	3	-	-	-
[15]	0.16-0.29	4.8	7	16.7	-
[16]	0.05-.07	2.2	4.4	-	-
[17]	0.2	-	-	5.25-7.5	-
[18]	0.013	2.75	-	3.0-4.0	-
[19]	0.4	-	-	3.25-4.6	-

En la figura 2 se observó un ablandamiento en las subzonas ZACRC, ZACIC y ZACSC de la soldadura, en donde el espesor de esta última subzona solo pudo ser determinado mediante las mediciones de microdureza ya que no se pueden observar cambios microestructurales debido a las temperaturas pico que se experimentaron (inferiores a A_{c1}).

En la figura 6 se presentan los resultados de microdureza y nanodureza desde la ZACIC hasta el MB en donde se puede observar que la ZACSC presenta una mayor extensión que la determinada por las mediciones de microdureza. Se observa un endurecimiento alrededor de la posición correspondiente a la temperatura crítica A_{c1} , el cual puede ser referido al endurecimiento secundario de la martensita. Este tipo de endurecimiento se presenta en aceros aleados, en donde se entiende como el endurecimiento por precipitación de carburos formados por elementos como: Mo, V, Nb, Ti, Cr, W o Mo, en lugar de la formación de cementita [20].

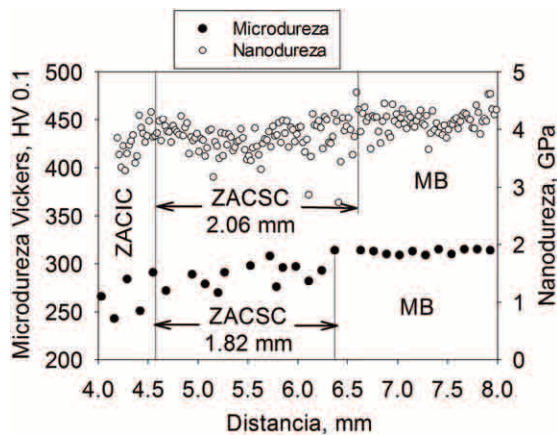


Figura 6. Determinación del espesor de la ZACSC mediante pruebas de microdureza y nanoindentación.

En tratamientos isotérmicos, el grado de severidad del revenido en un acero martensítico es altamente dependiente de la temperatura de revenido, tiempo de permanencia a esta temperatura y a la composición química (presencia de elementos aleantes). Este proceso de revenido se da mediante la segregación de carbono, la precipitación de carburos de transición, la descomposición de austenita retenida, la formación de cementita y disolución de esta para formar carburos de aleación más estables [21]; sin embargo, el proceso por el cual se reviene la martensita en ciclos térmicos rápidos de calentamiento y enfriamiento se ha estudiado poco.

En procesos de soldadura, se presenta un gradiente de temperaturas desde la zona de fusión, lo cual está correlacionado con las características microestructurales, y por lo tanto las propiedades mecánicas. Mediante el método propuesto por Poorhaydari [22], se determinó el perfil de temperaturas pico experimentado en la ZAC (figura 7).

Biro et al [23], indican que en ciclos de calentamiento y enfriamiento rápidos, el proceso de ablandamiento en aceros martensíticos se realiza en dos sub-procesos: nucleación y engrosamiento de carburos. Entonces la mayor nanodureza observada en la posición correspondiente a la temperatura A_{c1} se puede deber a que se promovió la formación de carburos de los elementos aleantes, y el ablandamiento cerca de la posición del fin de la ZACSC a la formación de carburos de transición. De las figuras 6 y 7 se observa que el revenido de la martensita en este acero se presenta en el rango de temperaturas pico entre A_{c1} y 481°C . Aunque existe un ablandamiento en la ZAC,

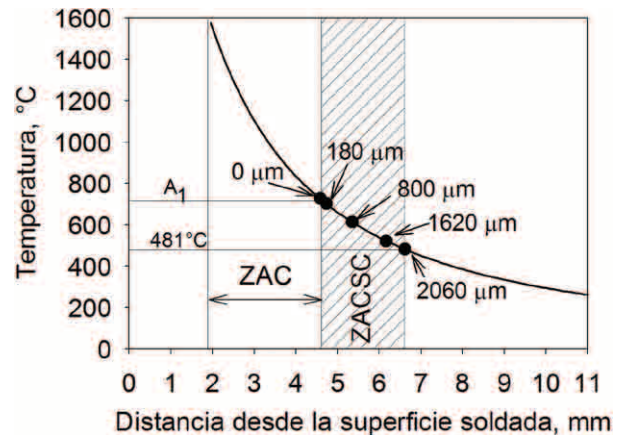


Figura 7. Perfil de temperatura pico en la zona de la soldadura.

estos resultados indican que en la ZACSC, este acero es resistente al ablandamiento lo cual se le puede atribuir a la formación de carburos de los elementos aleantes (principalmente Nb y Ti).

4. Conclusiones

Bajo las condiciones de soldadura ensayadas en este trabajo, el acero microaleado presentó un ablandamiento de la ZAC. Este ablandamiento es debido a la microestructura desarrollada, que a su vez es función del ciclo térmico experimentado durante el proceso de soldadura. En la subzona de recristalización, el ablandamiento se presentó por la formación de ferrita poligonal; en la subzona intercrítica se presentó por la formación de ferrita cuasi-poligonal y revenido de la martensita; y en la subzona subcrítica se presentó por revenido de la martensita. Adicionalmente, en esta última subzona, se observó un endurecimiento que puede ser atribuido al endurecimiento secundario de la martensita por la precipitación de carburos de elementos aleantes.

Se determinó que el tamaño de grano tiene un efecto en el aumento de la dureza de la ferrita, el cual se puede correlacionar con el aumento del esfuerzo de fluencia. Con esto, mediciones de nanoindentación podrían ser utilizadas para determinar la contribución del componente de tamaño de grano al aumento en la resistencia a la fluencia.

5. Agradecimiento

Los autores agradecen al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica a través del proyecto IN118714 de la Universidad Nacional

Autónoma de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del proyecto de Ciencia Básica Sep-Conacyt 178777, por el apoyo financiero otorgado.

6. Referencias

- [1] P. Ghosh, P. Gupta, Ramavtar, & B. Jha. "Weldability of Intercritical Annealed Dual-Phase Steel with the Resistance Spot Welding Process." *Welding Journal*, pp. 7-14, 1991.
- [2] A. Takahashi & H. Ogawa. "Influence of Softened Heat-affected Zone on Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking of a High Strength Line Pipe Steel." *ISIJ International*, vol. 35, no. 10, pp. 1190-1195, 1995.
- [3] M. Xia, E. Biro, Z. Tian, & Y. Zhou. "Effects of Heat Input and Martensite on HAZ Softening in Laser Welding of Dual Phase Steels." *ISIJ International*, vol. 48, no. 6, pp. 809-814, 2008.
- [4] P. Ghosh, P. Gupta, O. Pal, R. Avtar, B. Jha & V. Dwivedi. "Influence of Weld Thermal Cycle on Properties of Flash Butt Welded Mn-Cr-Mo Dual Phase Steel". *ISIJ International*, vol. 33, no. 7, pp. 807-815, 1993.
- [5] V. Baltazar Hernandez, S. Panda, Y. Okita, & N. Zhou. "A study on heat affected zone softening in resistance spot welded dual phase steel by nanoindentation." *Journal of Materials Science*, vol. 45, no. 6, pp. 1638-1647, 2010.
- [6] H. Pisarski & R. Dolby, "The significance of softened HAZs in high strength structural steels." *Welding in the World*, vol. 47, no. 5/6, pp. 32-40, 2003.
- [7] F. Hochhauser, W. Ernst, R. Rauch, R. Vallant & N. Enzinger. "Influence of the Soft Zone on The Strength of Welded Modern HSLA Steels." *Welding in the World*, vol. 56, no. 5-6, pp. 77-85, 2012.
- [8] J. Li, S. Nayak, E. Biro, S. Panda, F. Goodwin & Y. Zhou. "Effects of weld line position and geometry on the formability of laser welded high strength low alloy and dual-phase steel blanks." *Materials & Design*, vol. 52, pp. 757-766, 2013.
- [9] E. Biro, J. McDermid, J. Embury & Y. Zhou. "Softening Kinetics in the Subcritical Heat-Affected Zone of Dual-Phase Steel Welds." *Metall and Mat Trans A*, vol. 41, no. 9, pp. 2348-2356, 2010.
- [10] W. Oliver, & G. Pharr. "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments." *Journal of Materials Research*, vol. 7, no. 6, pp. 1564-1583, 1996.
- [11] T. Ohmura, K. Tsuzaki & S. Matsuoka. "Nanohardness measurement of high-purity Fe-C martensite." *Scripta Materialia*, vol. 45, no. 8, pp. 889-894, 2001.
- [12] D. Saha, D. Westerbaan, V. Nayak, E. Biro, A. Gerlich & Y. Zhou. "Microstructure-properties correlation in fiber laser welding of dual-phase and HSLA steels." *Materials Science and Engineering: A*, vol. 607, pp. 445-453, 2014.
- [13] V. Baltazar Hernández, S. Panda, M. Kuntz & Y. Zhou. "Nanoindentation and microstructure analysis of resistance spot welded dual phase steel." *Materials Letters*, vol. 64, no. 2, pp. 207-210, 2010.
- [14] D. Lee, J. Lee, M. Seok, U. Baek, S. Nahm & J. Jang. "Stress-dependent hardening-to-softening transition of hydrogen effects in nanoindentation of a linepipe steel." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 4, pp. 1897-1902, 2014.
- [15] Q. Furnémont, M. Kempf, P. Jacques, M. Göken & F. Delannay. "On the measurement of the nanohardness of the constitutive phases of TRIP-assisted multiphase steels." *Materials Science and Engineering: A*, vol. 308, no. 1-2, pp. 26-32, 2002.
- [16] B. Choi, D. Seo & J. Jang. "A nanoindentation study on the micromechanical characteristics of API X100 pipeline steel." *Metals and Materials International*, vol. 15, no. 3, pp. 373-378, 2009.
- [17] B. He, & M. Huang. "Revealing the Intrinsic Nanohardness of Lath Martensite in Low Carbon Steel." *Metall and Mat Trans A*, vol. 46, no. 2, pp. 688-694, 2015.
- [18] J. Stewart, J. Williams, J. & N. Chawla, "Influence of Thermal Aging on the Microstructure and Mechanical Behavior of Dual-Phase, Precipitation-Hardened, Powder Metallurgy Stainless Steels." *Metall and Mat Trans A*, vol. 43, no. 1, pp. 124-135, 2011.
- [19] J. Li, T. Ohmura & K. Tsuzaki. "Evaluation of Grain Boundary Effect on Strength of Fe-C Low Alloy Martensitic Steels by Nanoindentation Technique." *Materials Transactions*, vol. 46, no. 6, pp. 1301-1305, 2005.
- [20] D. Porter, K. Easterling. *Phase Transformation in Metals and Alloys*. London: Chapman & Hall, 1992.
- [21] P. Morra, A. Böttger & E. Mittemeijer. "Decomposition of iron-based martensite. A kinetic analysis by means of differential scanning calorimetry and dilatometry." *Journal of Thermal Analysis*, vol. 64, no. 3, pp. 905 - 914, 2001.
- [22] K. Poorhaydari, B. Patchett & D. Ivey. "Estimation of cooling rate in the welding of plates with intermediate thickness." *Welding Journal*, pp. 149-155, 2005.
- [23] E. Biro, J. McDermid, S. Vignier & Y. Norman Zhou. "Decoupling of the softening processes during rapid tempering of a martensitic steel." *Materials Science and Engineering: A*, vol. 615, pp. 395-404, 2014.

Rehabilitación física de pacientes: una solución móvil para facilitar los ejercicios de fisioterapia básicos

Physical rehabilitation of patients: a mobile solution to facilitate basic physiotherapy exercises

Vladimir Villarreal¹

¹Grupo de Tecnologías Computacionales Emergentes, Universidad Tecnológica de Panamá, Chiriquí

¹vladimir.villarreal@utp.ac.pa

Resumen— No cabe la menor duda que desarrollar soluciones que faciliten la realización de actividades de terapia desde casa, son un factor apremiante en nuestro entorno social. En un mundo donde la tecnología móvil adquiere cada vez más importancia, nuestro país no puede quedar lejos de estos avances, el uso del dispositivo móvil como una herramienta para apoyo en el proceso de rehabilitación debe ser permitido. En este trabajo se presenta una propuesta que esquematiza el desarrollo de una aplicación que ayuda a la realización de actividades fisioterapéuticas de un paciente, desde la comodidad de su hogar, previo análisis y recomendación de su médico. La aplicación genera informes de los resultados de esas actividades físicas tanto para el paciente como para su médico que pueden ser visualizados a través de un teléfono móvil. Se integra aquí una clasificación ontológica de dispositivos móviles y un estudio previo del impacto del desarrollo de esta tecnología en nuestro país.

Palabras claves— Computación móvil, computación ubicua, ingeniería de software, ontologías, rehabilitación física, terapia móvil.

Abstract— There is no doubt that developing solutions to facilitate the completion of therapy activities from home is a needed factor in our social environment. In a world where mobile technology is becoming increasingly important, our country cannot stay away from these advances, the use of a mobile device as a support tool in the rehabilitation of people must be available. This paper presents a proposal outlining the development of an application that helps physiotherapy activities of a patient be done from the comfort of his/her home, following the diagnose and prescription a doctor. The application generates reports of the physical activities for both the patient and for the doctor that can be viewed via a mobile phone. This paper includes an ontological classification of mobile devices and a previous study of the impact of the development of this technology in our country.

Keywords— Mobile computing, ubiquitous computing, software engineering, ontologies, physical rehabilitation, mobile therapy.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 4 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 7 de abril de 2016

1. Introducción

A medida que transcurre el tiempo, los dispositivos móviles evolucionan y son capaces de ejecutar procesos más exigentes, lo que ha desatado un sinnúmero de aplicaciones para las diferentes presentaciones de dichos dispositivos, saltando a solucionar problemas en diferentes campos, como el académico, empresarial y hasta personal.

Es posible que el avance casi exponencial de la tecnología celular, no permita ver fácilmente las ventajas que esta tecnología móvil puede ofrecer en un momento dado.

La necesidad de integrar tecnologías en diferentes entornos, nos lleva a explorar el avance tecnológico móvil en Panamá, y así tener una idea más clara de cómo sacar el máximo provecho de todas estas tecnologías

actuales, en el mejoramiento de componentes móviles, que ayuden en la cobertura o asistencia de servicios médicos soportados a un área no muy común como lo es la fisioterapia.

Estas afirmaciones nos generan algunas interrogantes, objeto de estudio en este proyecto, como lo son:

- ¿Qué ventajas nos trae todo este tipo de avance tecnológico en Panamá y la disponibilidad creciente de conexión a internet?
- ¿Son aprovechadas todas estas herramientas en Panamá, en el sector salud, para ofrecer una solución a las personas con necesidad de seguimiento médico?

1.1 Estudio de porcentaje de personas con celular y necesidad de rehabilitación en Panamá

En la tabla 1, notaremos la cuantificación de la población panameña que poseen un celular, o poseen un dispositivo inteligente “Smartphone”, que le ayuda a desarrollar sus actividades diarias, de acuerdo a su necesidad [1].

Tabla 1. Proporción de hogares con telefonía celular, según provincias y comarcas indígenas. Fuente: Censo de 2010

Provincias y comarcas indígenas	Proporción de hogares con telefonía celular (%)
Total	83.9 %
Provincias	
Bocas del Toro	72.7 %
Coclé	77.1 %
Colón	85.6 %
Chiriquí	85.6 %
Darién	71.7 %
Herrera	81.8 %
Los Santos	80.5 %
Panamá	90.8 %
Veraguas	70.9 %
Comarcas indígenas	
Kuna Yala	46.5 %
Emberá	37.3 %
Ngöbe Buglé	26.9 %

Como se puede notar la gran parte de nuestra población cuenta con un dispositivo móvil dentro de la gama baja, media y alta, lo que se traduce en una posibilidad de desarrollar soluciones móviles que faciliten el seguimiento y control de las actividades de rehabilitación de un paciente.

Este cuadro nos permite ver como se encuentra la tendencia tecnológica móvil, a nivel local. Los cambios tecnológicos han fomentado el acceso y uso de la telefonía celular, permitiendo ampliar la oferta y disminuir los precios.

Por otra parte, la posibilidad de pre-pagar el servicio, no solo de voz sino de data, ha permitido a los usuarios tener acceso a tarifas más bajas y aprovechar la funcionalidad de los nuevos equipos, sin mayores diferencias con los que formalizan un contrato. Estas facilidades a los usuarios son el resultado de la competencia que se presenta en el mercado entre los cuatro operadores existentes [2].

Luego de evaluados estos resultados, podemos notar que el desarrollo de una aplicación móvil para ayudar en la rehabilitación de las personas que necesitan o requieren atención médica, es viable técnicamente con respecto al uso de un dispositivo móvil.

Es notable que un dispositivo inteligente no reemplazará las funciones que hace un especialista

médico, nuestro principal objetivo es que el dispositivo ayude al paciente o usuario, a que pueda hacer los ejercicios de la manera correcta, y que dichos ejercicios sean registrados de manera que el paciente pueda guardar los resultados, para luego poder tener una constancia de la repeticiones que realiza y de los ejercicios desarrollados en un periodo determinado.

Esta solución se ofrece como una manera de asistir al paciente, dado que el servicio de fisioterapia en Panamá está compuesto de un gimnasio que permite al paciente el desarrollo de técnicas de tratamiento para la estimulación del movimiento de ambulación.

Tabla 2. Detalle de servicios médicos en nuestro país, prestando principal atención a los aspectos de rehabilitación
Fuente: Informe estadístico de servicios especiales de habilitación de 2012

Disciplina	Población beneficiada	Profesionales
Total	92,729	270
Técnico	87,930	257
Fisioterapia	6,902	38
Psicología	10,877	40
Fonoaudiología	10,492	35
Laboratorio de moldes	249	1
Prueba audiológica	449	1
Trabajo social	10,474	36
Terapia ocupacional	4,963	24
Estimulación temprana	43,039	80
Consejería en rehabilitación	485	2
Médico	4,799	13
Foniatría	230	13
Medicina en rehabilitación	643	1
Neurólogo	225	1
Oftalmólogo	353	1
Ortopeda	355	1
Otorrinolaringología	90	1
Pediatría	96	1
Psicopedagogo	124	1
Salud Bucal	1,677	3
Optometrista	374	1
Enfermería	632	1

En la tabla 2, se muestra un detalle de los servicios técnicos que se realizó en el 2012, con el fin de poder determinar cuánta población es la beneficiada de estos procesos médicos, lo que nos demuestra que las áreas de fisioterapia y medicina en rehabilitación tiene un alto porcentaje de población beneficiada con respecto a otras disciplinas.

1.2 Objetivos funcionales de la propuesta

Los objetivos funcionales de la propuesta se enmarcan en los siguientes puntos:

- Ofrecer una aplicación para teléfonos inteligentes “*Smartphones*”, que permitan ayudar a las personas que necesitan rehabilitación física, en el desarrollo de sus ejercicios.
- Contactar a profesionales en el área de la fisioterapia que nos brinden la información necesaria sobre los distintos tipos de rehabilitación según el tipo de lesión.
- Analizar formalmente todos los procesos involucrados en distintas terapias de rehabilitación y poder llevar un control de todo el historial del paciente, para poder en un momento dado, al momento de asistir a una cita, brindarle todos esos datos al profesional supervisor, mediante el dispositivo móvil.

Para cumplir estos objetivos funcionales es necesario:

- Determinar cuáles son los tipos de ejercicios de rehabilitación que se implementan actualmente.
- Analizar y modelar formalmente todas las actividades que se deben realizar de acuerdo al tipo de ejercicios de rehabilitación que se necesiten y de acuerdo a la necesidad del paciente.
- Diseñar una Base de Datos que pueda registrar, de manera remota, todos los resultados realizados en cada actividad involucrada en la rehabilitación del paciente.
- Diseñar un sistema móvil que implemente los procesos necesarios de ejercicios de rehabilitación los cuales utilizará el paciente, y le recuerde el control de dichas actividades.
- Implementar un sistema móvil que implemente los procesos necesarios de ejercicios de rehabilitación los cuales utilizará el paciente, y le recuerde el control de dichas actividades.
- Capacitar al profesional fisioterapeuta en la utilización del sistema móvil, para que a su vez, lo pueda utilizar en los pacientes que la necesiten.

2. Desarrollo de la aplicación siguiendo el marco de desarrollo MoMo

Esta aplicación se está desarrollando con base en el marco de trabajo (framework) para el desarrollo de aplicaciones móviles MoMo [3][4]. El ciclo de desarrollo propuesto nos permite obtener diferentes prototipos funcionales que definen cada elemento o módulo que componen la aplicación final (figura 1).

Los pasos del marco de desarrollo son los siguientes:

- Selección del módulo a aplicar: se diseña la estructura funcional de cada módulo que formará parte de la aplicación final. Cada módulo tiene una funcionalidad específica, basada en un diseño global asociado.
- Definición de patrones de diseño: definición de las estructuras físicas de cada patrón asociado a cada módulo que se ejecutará. Especifica la representación visual de cada uno de los diseños de módulos.
- Definición de patrones funcionales: define los roles y las relaciones de cada uno de los módulos de la aplicación.
- Relación ontológica de cada módulo: especifica las ontologías que participan o son utilizadas por cada módulo, así como la relación entre otros elementos de la arquitectura.
- Determinación de las capas de donde viene el módulo: define la capa funcional de cada módulo, relacionándolo con la capa del modelo, definida por el marco.
- Determinación de la relación entre capas: define la relación entre cada uno de los módulos desarrollados, lo que permite la interoperabilidad entre cada uno de ellos.
- Integración de todos los elementos: para la obtención del prototipo a evaluar. Se obtiene en este paso, un primer prototipo.
- Evaluación del prototipo: esto permite la evaluación de diseño funcional y visual de la aplicación generada, proporcionando retroalimentación para la mejora de la arquitectura.
- Rediseño de los elementos para la generación de un nuevo prototipo: aquí es donde la funcionalidad del prototipo obtenido, discute su rediseño según los pasos iniciales. Comienza todo el proceso, cada vez que se corrigen problemas de diseño y funcionalidad.

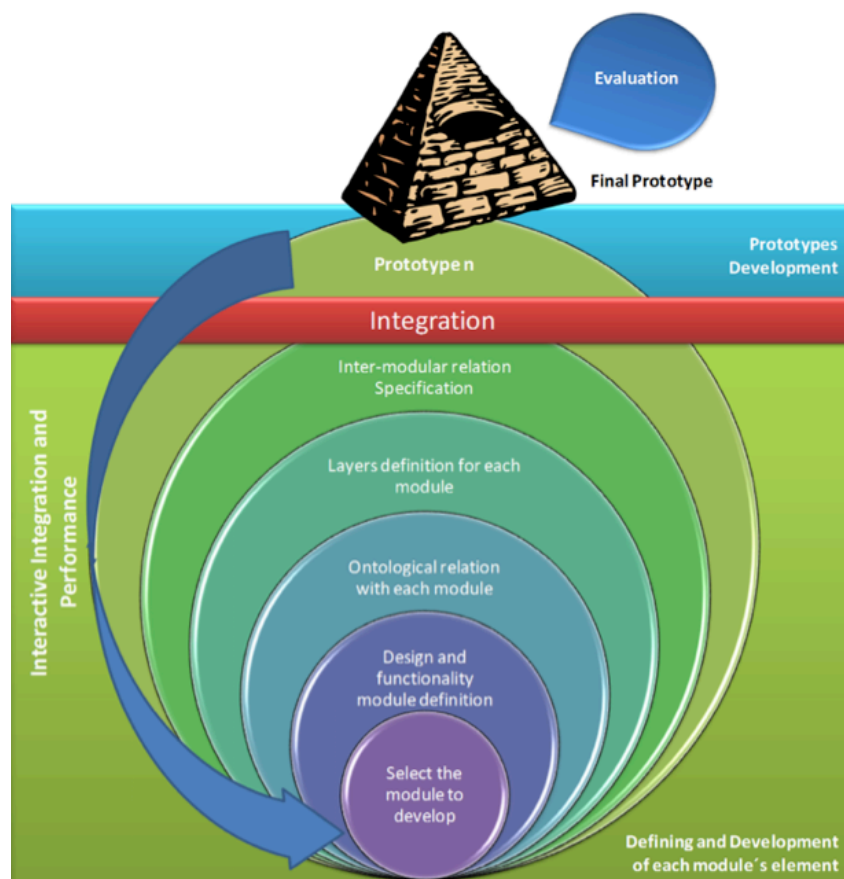


Figura 1. Desarrollo de la aplicación FiTeMo basado en el marco de desarrollo MoMo con cada uno de los pasos para el desarrollo de sus elementos.

2.1 Distribución y clasificación ontológica de los dispositivos móviles

El desarrollo de ontologías para dispositivos ha sido abordado en algunas ocasiones, cada una de ellas ajustándose a las necesidades del momento. Por un lado la FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) [5] ha definido una estructura ontológica, para facilitar la comunicación entre agentes, decidiendo si se usan ontologías explícitas, declarativamente representadas o las que implícitamente son codificadas con la puesta en marcha del *software* real.

Hay también los ejemplos de modelos de dispositivo genérico [6][7] que incluye mecanismos para descripciones de dispositivo crecientes. Para nuestra intención cada una de las ontologías evaluadas, carecen de una funcionalidad específica al momento de ser aplicadas exclusivamente a un entorno de rehabilitación de pacientes.

Para facilitar el desarrollo de la aplicación propuesta, nos basaremos en el modelo ontológico MoMontology [8][9] que presenta una clasificación de todos los posibles elementos que se deben tomar en cuenta al momento de desarrollar soluciones móviles adaptables a cualquier dispositivo móvil.

Para modelar los diferentes servicios y elementos que componen el marco, vamos a definir cada uno de los elementos que intervienen en el desarrollo de lenguajes de la arquitectura de *software* basado en *web* semántica (*OWL*).

Basado en los pasos que componen el desarrollo de las ontologías definidas por METHONTOLOGY [10] [11] y para un mejor entendimiento de cada uno de los elementos de la aplicación, hemos basado el desarrollo en la clasificación de dispositivos móviles que presenta MoMontology. En la figura 2 se muestra la clasificación ontológica antes mencionada.

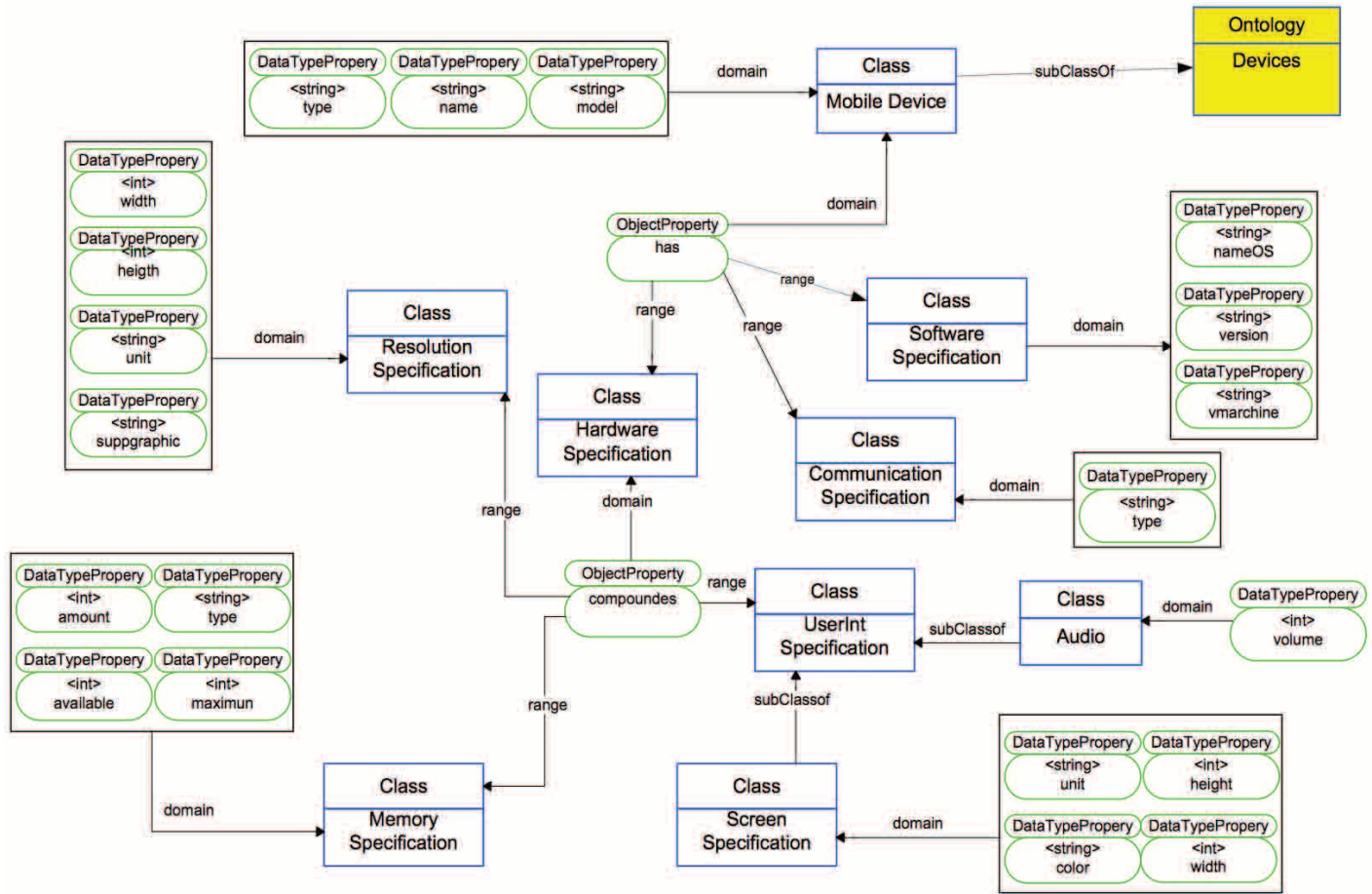


Figura 2. Clasificación ontológica de dispositivos móviles para facilitar el desarrollo y adaptabilidad de aplicaciones móviles.

Esta ontología clasifica los dispositivos móviles según sus capacidades de *hardware*, *software* y comunicación o red. Estos tres elementos son los aspectos que definen la funcionalidad de la aplicación desarrollada.

El elemento más importante a la hora de desarrollar aplicaciones móviles son las especificaciones de *hardware*. Es necesario contemplar aspectos como:

- Especificaciones de resolución (*Resolution Specification*), para que las aplicaciones desarrolladas sean adaptables a cualquier tipo de pantalla (aspecto tamaño).
- Especificaciones de memoria (*Memory Specification*), para poder definir las distribución modular de la aplicación, y así establecer los elementos que se ejecutan en primer plano y segundo plano (aspecto almacenamiento).
- Especificaciones de interfaz de usuario (*UserInt Specification*) que define las especificaciones de pantalla y audio, que son recursos utilizables en el desarrollo de aplicaciones móviles (aspecto forma).

3. Propuesta para la rehabilitación móvil de pacientes: FiTeMo

Luego de evaluados todos los aspectos sociales y técnicos, se plantea desarrollar una aplicación móvil basado en la plataforma *Android* [12], con el fin de que funcione en los dispositivos con la versión 4.1 o superior de *Android*, que tenga un interfaz que permita conocer los datos generales del paciente, como lo son nombre, cédula, entre otros como se muestra en la figura 3(a).

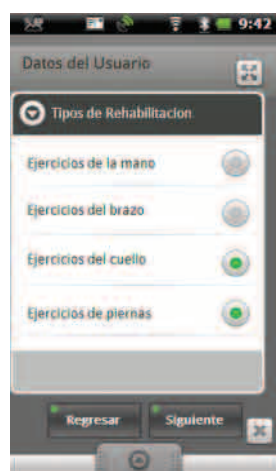
Dado estos datos, el paciente procederá a otra interfaz, la cual le pedirá al paciente, que determine qué tipo de necesidad de rehabilitación (ejercicio) es la que tiene que desarrollar, para que así la aplicación proceda

a demostrarle al paciente como serán los ejercicios que deberá hacer (figura 3(b)). Al momento que el paciente conoce el ejercicio que debe hacer la aplicación definirá cuál es la magnitud o grado del ejercicio, para que así proceda a indicarle cuántas series tiene que hacer (figura 3(c)). Dado esto el dispositivo quedará en una interfaz de recolección de datos, contado las repeticiones del ejercicio, ya que así le dirá al paciente, si ha logrado hacer la cantidad de repeticiones necesarias.

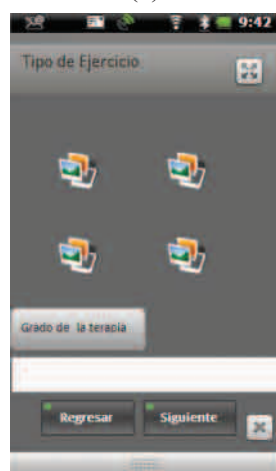
Cuando el paciente termina de hacer la serie o rutina de ejercicios (figura 3(d)), la aplicación le mostrará en una nueva interfaz sus resultados, y serán almacenados en tiempo real, desde la hora que empezó la sesión hasta el momento que terminó (figura 3(e)). Previamente el paciente debió indicar al momento de llenar sus datos, cuánto fue el período que el especialista le recomendó a hacer la terapia. Esto se hará, porque la aplicación también servirá como asistente y le recordará al paciente,



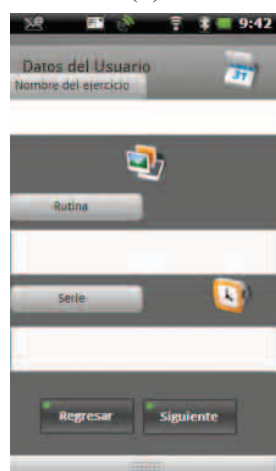
(a)



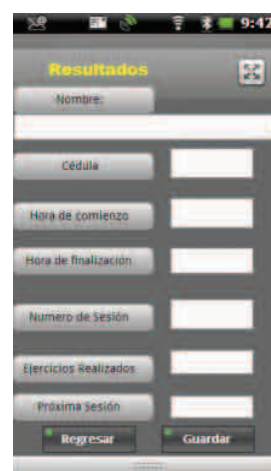
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3. a. Captura de datos del paciente, b. Captura del tipo de ejercicio, c. Selección del grado o dificultad de la terapia, d. Captura de los datos resultantes del ejercicio: serie y rutina, e. Muestra de resultados.

periódicamente, el momento que debe empezar a realizar la sesión.

Esta aplicación le será recomendada al paciente por el profesional fisioterapeuta, que lo atienda en su primera sesión, ya que dependiendo el grado de rehabilitación, podrá el profesional indicarle la frecuencia con la que tendrá que asistir al centro médico para el conocer el avance de la persona, según los datos almacenados por la aplicación en cada una de las repeticiones de ejercicios de rehabilitación que se le ha recomendado desarrollar.

Esto servirá como herramienta al profesional, y a su vez como asistente al paciente, ya que las sesiones tienen un valor económico considerable, lo ideal sería que con esta aplicación pueda reducirse esa cantidad de sesiones, a la mitad, y así poder generarle un ahorro al paciente, que podría ser utilizado en otros tratamientos.

4. Conclusiones

Facilitarle a los pacientes herramientas necesarias para dar un soporte a una necesidad de rehabilitación, se traduce en la reducción de costos y tiempo, que pueden ser invertido en el desarrollo de nuevas actividades.

El desarrollo de la aplicación propuesta está basado en el marco de trabajo para el desarrollo de aplicaciones móviles MoMo, que define como se implementan interfaces gráficas para desarrollar aplicaciones para seguimiento de pacientes, una clasificación ontológica de los posibles

elementos utilizados y una distribución en capa de todos los elementos programables en una aplicación.

La cantidad de dispositivos móviles que existen en nuestro país, nos permite dar soporte a una gama de versiones y modelos con características técnicas de procesamiento, almacenamiento y comunicación muy altas.

Estamos seguros que una vez en ejecución, nuestra aplicación, beneficiará a un gran número de personas que en muchas ocasiones no pueden asistir a una sesión de rehabilitación, ofreciéndole una herramienta alterna ante esta problemática.

Existen las capacidades técnicas, de comunicación y operativa, nos toca integrarlas en una sola aplicación funcional y que irá creciendo con el tiempo.

5. Agradecimiento

Este proyecto está siendo apoyado y soportado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) y el Grupo de Investigación en Tecnologías Computacionales Emergentes (GITCE). El autor es miembro del Sistema Nacional de Investigación (SNI) de la SENACYT como Investigador Nacional I.

6. Referencias

- [1] Burgos, D. y Echeverry, H. Estado del Arte del Uso de Aplicaciones en Dispositivos Móviles en el Área de Medicina [en línea], <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoanexos/0053B957.pdf> [Consulta: 20 noviembre 2015].
- [2] Contraloría General de la República de Panamá. Instituto Nacional de Estadística y Censo. República de Panamá. Acceso y uso de las tecnologías de Información y Comunicación en Panamá [en línea], <http://estadisticas.contraloria.gob.pa/redpan/sid/docs/documentos%20tematicos/Atlas%20social%20de%20Panama/11%20-%20Acceso%20y%20uso%20de%20las%20tecnolog%C3%ADas%20de%20informaci%C3%B3n%20y%20comuni.pdf> [Consulta 10 Abril 2014]
- [3] Villarreal, V., Laguna, J., López, S., Fontecha, J., Fuentes, C., Hervás, R., López-de-Ipiña, D., Bravo, J. & Villarreal, V. A proposal for Mobile Diabetes Self-Control: Towards a Patient Monitoring Framework. In International Workshop of Ambient Assisted Living (IWAAL'09). LNCS Springer-Verlag, 2009. p. II-870-871
- [4] Villarreal, V., Bravo, J., Hervás, R., Laguna, J., Díez, A., Sánchez, C. & López, S. Diabetes Patients' Care based on Mobile Monitoring. In the IADIS International Conference 2009. Applied Computing 2009. p. 39-43.
- [5] FIPA. FIPA Ontology Service Specification [en línea]. <http://www.fipa.org/specs/fipa00086/XC00086C.html> [Consulta: 30 noviembre 2011]
- [6] Vazquez, J. I., López-de-Ipiña, D. & Sedano, I. SoaM: A Web-powered Architecture for Designing and Deploying Pervasive Semantic Devices. In the International Journal of Web Information Systems 2(3-4), 2006. p. 212-224.
- [7] Terrenghi, L., Quigley, A. & Dix, A. A taxonomy for and analysis of multi-person-display ecosystems. In the Personal and Ubiquitous Computing 2009, Springer-Verlag, 2009. p. 13: 583-598.
- [8] Villarreal, V., Hervás, R., Díez Fdez, A. & Bravo, J. Applying ontologies in the development of patient mobile monitoring framework. In the 2nd International Conference on e-Health and Bioengineering - EHB 2009. IEEE, 2009. p. 241-246.
- [9] Bravo, J., López-de-Ipiña, D., Fuentes, C. & Hervás, R. Enabling NFC Technology for Supporting Chronic Diseases: A Proposal for Alzheimer Caregives. In the European Conference Aml, 2008. LNCS Springer-Verlag, 2008. p. 109-125.
- [10] Arpírez, J.C., Gómez-Pérez, A., Lozano-Tello, A. & Pinto, S. (ONTO)2Agent: an ontology-based WWW broker to select ontologies. In the Workshop on applications of ontologies and problem-solving methods 1998, ECAI 1998. p. 16-24.
- [11] Fernández-López, M. Overview of Methodology for Building Ontologies. In the Workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods: Lessons Learned and Future Trends (IJCAI99). CEUR Publications 1999. p 4/1-4/13.
- [12] Android Developer. The Developer's Guide. [en línea], <http://developer.android.com/index.html> [Consulta: 28 agosto 2015].