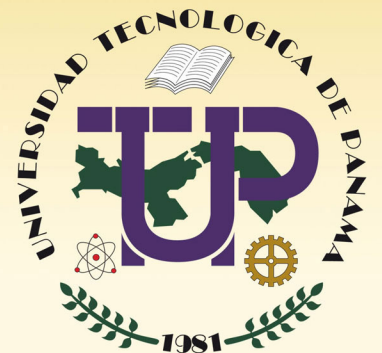


ISSN 1860-8894

REVISTA DE **I+D**
TECNOLÓGICO

Vol. 1 - No. 1



REVISTA DE I + D TECNOLÓGICO

VOLUMEN I

• Número 1 •

Marzo – 2002

**AUTORIDADES DE LA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ**

RECTOR

Héctor M. Montemayor A.

VICERRECTOR ACADÉMICO

Salvador Rodríguez

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN, POSTGRADO Y EXTENSIÓN

Ramón O. Argote R.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO

Vieria González

SECRETARIA GENERAL

Tisla de Destro

Correspondencia para suscripciones y/o canje:

Universidad Tecnológica de Panamá

Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión

Apdo. Postal: 6-2894, El Dorado

Panamá, Rep. de Panamá

Edición aprobada por la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión de la
Universidad Tecnológica de Panamá



DIRECTOR DEL COMITÉ EDITORIAL

Eleicer Ching Prado

COMITÉ EDITORIAL

Ildeman Abrego

Clifton Clunie

Abdoulaye Diallo

Oscar Ramírez

Víctor Sánchez

PORTADA

Arte y diseño:

Departamento de Divulgación Técnica Educativa

(Universidad Tecnológica de Panamá)

LEVANTADO DE TEXTO

Y DIAGRAMACION

Zaira J. Jaramillo

Impreso en Panamá

500 ejemplares

Imprenta - Depto. de Divulgación Técnica Educativa

(Universidad Tecnológica de Panamá)

CONTENIDO

A Modo de Presentación 7

El Factor de Modificación de Respuesta, R, para Edificios de Período Corto. . .
..... *O.M. Ramírez* 9

Grados de Libertad de Imágenes Ópticas en la Aproximación de Born.
..... *E. A. Marengo* 19

Protección Anticorrosiva de Metales en la Atmósfera (PATINA). Resultados
de Dos Años de Exposición. 27
..... *L. De Gracia de Araque, A. Foti de Bósquez y M. de Villaláz*

Estudio de Cerámicas Ferroeléctricas de la Familia Aurivillius: $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9 - \text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ 35
..... *E. Ching Prado*

Alternativa para los Productores de Achiote, Máquina Desgranadora Manual. . .
..... *R.L. Almanza y A.B. Saturno* 45

Evaluación de la Calidad de la Representación de Especificaciones de Software
Orientadas a Objetos. 51
..... *C. Clunie*

A MODO DE PRESENTACIÓN

Las tareas de la investigación científica son fundamentales en una universidad que se precie de serlo, y en el caso de nuestra Universidad Tecnológica de Panamá son parte de la altísima misión que la nación le ha encomendado a esta Institución, y que nos esforzamos por cumplir. Este aserto, que en otro contexto parecería superfluo, gana hoy vigencia, pertinencia, no sólo porque hacer investigación, e investigación de calidad, es cada día más difícil, frente a la incompreensión de su necesidad o los apremios del erario, sino también porque esa necesidad crece cada día, en especial en sociedades como la panameña, constreñidas sin duda por tantas carencias, pero abierta, paradójicamente a tantas posibilidades que sólo con la generación de conocimiento propio, adaptación creativa y reformulación crítica de lo que se haga allende nuestras fronteras, podrá explotarse para el bien del país.

Y por esto mismo, el ejemplar que tiene hoy en sus manos, no sólo demuestra a propios y extraños que en Panamá se hace investigación, e investigación variada, rica y rigurosa en los campos más diversos de la ciencia y la tecnología - como nos agradará ir mostrando en la vida que esta publicación alcance -, sino que muestra que las tareas de difusión del conocimiento científico, sin los cuales el conocimiento queda huérfano o estéril, han logrado abrirse un espacio en esta Casa de Estudios.

Crear verdades, conocimiento contrastable y por ello provisorio, y lograr su epifanía son requisitos para que el conocimiento eslabone esa cadena crítica que permite no sólo pasar de una verdad a otra, sino crear comunidad, sentido de pertenencia, sin los cuales tampoco la investigación lograr alcanzar toda su eficacia.

Saludamos a los editores y colaboradores de esta revista científica cuyo nacimiento honra a la Universidad Tecnológica de Panamá y al país. Le auguramos vida larga y comprometemos para ello todo el apoyo desde nuestra gestión rectoral para seguir desbrozando caminos y oteando horizontes nuevos.

Ing. Héctor Montemayor Abrego
Rector

EL FACTOR DE MODIFICACIÓN DE RESPUESTA, R , PARA EDIFICIOS DE PERÍODO CORTO

Oscar M. Ramírez
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Apartado 6-2894, El Dorado
Panamá, Rep. de Panamá

RESUMEN

La aplicación del Factor de Modificación de Respuesta, R , en la estimación del cortante sísmico basal (ATC-3-06), reconoce la habilidad de una estructura para disipar energía en el rango inelástico. Esto implica que se reduce la demanda elástica bajo la suposición de que la estructura tiene adecuada ductilidad para aceptar las deformaciones (deflexiones, rotaciones) necesarias para disipar inelásticamente la energía que le impone el sismo de diseño. En este trabajo se presenta una discusión acerca de la aplicación del factor R para estructuras de período corto, y se recomienda una reducción lineal del factor R como una función del período de la estructura.

Palabras claves: Energía, disipación, ductilidad, espectro, sobre-resistencia

ABSTRACT

Application of the Response Modification Factor, R , to estimate the seismic base shear (ATC-3-06), assumes that the structure has the ability to dissipate energy through inelastic action. It implies that the elastic seismic demand is reduced under the assumption that the structure has adequate ductility to accommodate the large deformations (rotations, deflections) needed for inelastic dissipation of the seismic energy imposed by the design earthquake. This study presents a discussion on the application of the factor R to short-period structures, and recommends a period-dependent relation for this factor.

Keywords: energy, dissipation, ductility, spectrum, overstrength

1. Introducción

La filosofía convencional de diseño sísmico supone que la energía impuesta por el sismo de diseño es disipada por la estructura a través de acciones inelásticas que se desarrollan en componentes determinados del sistema sismo-resistente. Basado en esta suposición, en el método de fuerza lateral equivalente, actualmente aceptado en los códigos sísmicos de Estados Unidos, se reduce la demanda elástica F_e , aplicando el factor de modificación de respuesta, R , de tal manera que la fuerza de diseño, F_d , se expresa como,

$$F_d = \frac{F_e}{R} = \frac{WS_{ae(\zeta=5\%)}}{R} \quad (1)$$

donde,

W = Peso sísmico efectivo del edificio

$S_{ae(\zeta=5\%)}$ = Ordenada de aceleración espectral correspondiente al período fundamental del edificio para 5% de amortiguamiento (ver figura No.1)

Es decir, se diseña la estructura para un nivel de fuerzas F_d menor a la demanda que se requiere para mantener la estructura en el rango elástico, F_e . Bajo la acción del sismo de diseño esta estructura se plastificará en zonas específicas, y de esta manera disipará, mediante acción inelástica, la energía impuesta por el sismo. Obviamente, la estructura debe

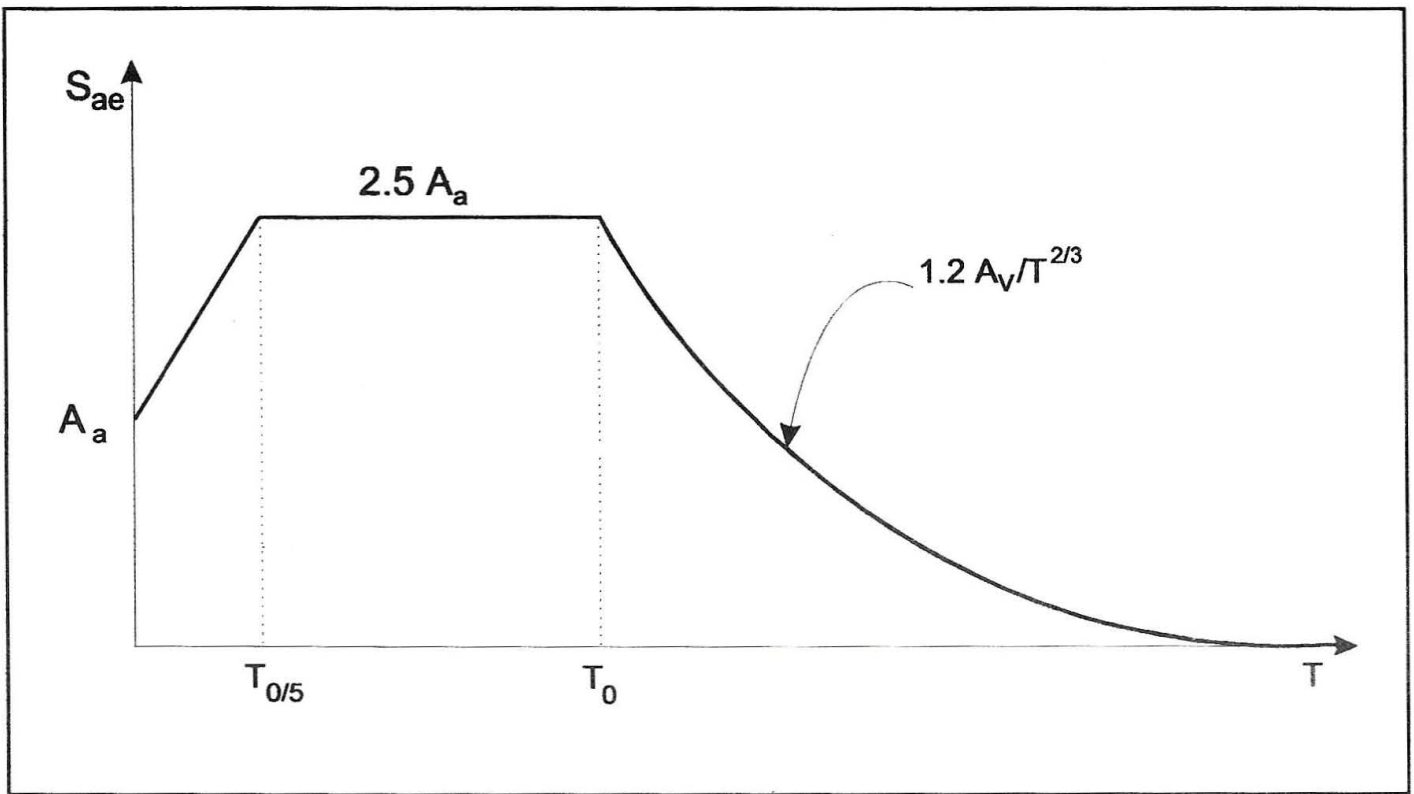


Figura 1: Espectro de diseño elástico para 5% de amortiguamiento.

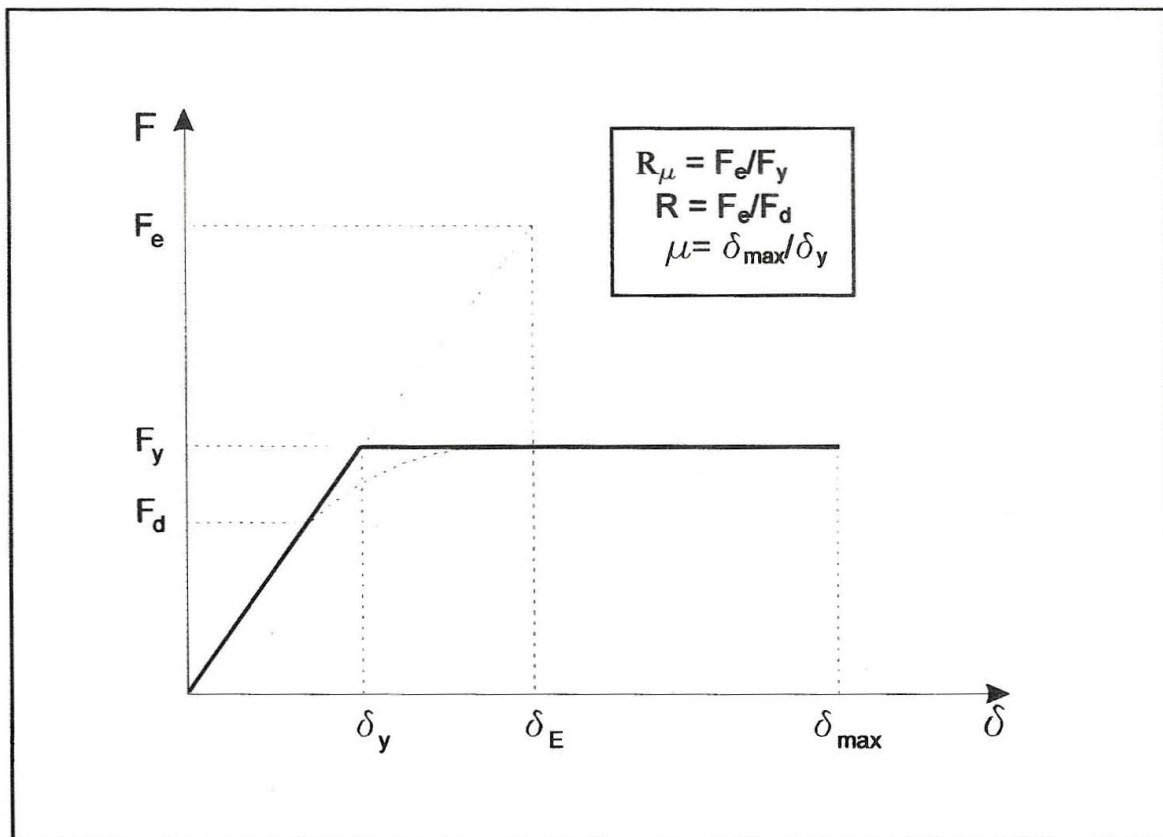


Figura 2: Modelo Bilineal Elasto-Plástico Perfecto.

tener la habilidad para deformarse inelásticamente la cantidad necesaria, δ_{max} , para disipar la energía inducida por el sismo. En consecuencia, el valor del factor R está asociado a la ductilidad global de desplazamiento lateral de la estructura sismo-resistente, μ ($\mu = \delta_{max}/\delta_y$). Estos términos se ilustran en la figura No.2.

El factor de modificación de respuesta, R , recomendado por los códigos sísmicos de Estados Unidos, se indica como una función del tipo de sistema estructural, y no establece ninguna variación de este factor para estructuras de período corto ($T < T_0$). La aplicación del factor R , tal como se entiende de esta definición, sugiere que para estructuras de período corto el cortante basal puede ser reducido dividiendo la demanda elástica por el mismo valor de R utilizado para reducir la demanda en estructuras de período largo ($T > T_0$). Esto implica dos cosas:

- (a) Se puede diseñar las estructuras muy rígidas para aceleraciones menores que la aceleración pico del suelo, ya que al dividir la demanda elástica entre R , se obtienen aceleraciones de diseño menores a la aceleración del espectro para período $T \sim 0$.
- (b) La estructura de período corto es capaz de atender la alta demanda de ductilidad que le impone el sismo.

La implicación (a) indudablemente se contradice con el principio de igualdad de aceleraciones, el cual indica que las estructuras muy rígidas ($T \sim 0$) vibran con la misma aceleración que vibra el suelo sobre el cual se soportan. A su vez, la implicación (b) es irrealista porque los niveles de demanda de ductilidad se acercan a infinito a medida que el período fundamental de la estructura se acerca a cero, y es un hecho confirmado que las

estructuras tienen una limitada capacidad para deformarse inelásticamente (ductilidad).

En este estudio se presenta una breve exposición sobre la demanda de ductilidad requerida en estructuras de período corto diseñadas con valores de R constante. Se incluye además una recomendación para reducir linealmente el factor R para estructuras de período corto, y se presenta gráficamente una comparación del efecto de esta reducción en la demanda de ductilidad, μ , en el desplazamiento lateral, δ y en el cortante basal, V , para algunos tipos de sistemas sismo-resistentes. Finalmente se presentan las conclusiones de este estudio.

2. Reseña Histórica del Factor R

Los factores de modificación de respuesta, R , recomendados en códigos sísmicos de los Estados Unidos tienen una limitada base técnica. Los valores asignados a este factor representan la opinión de consenso de ingenieros estructurales expertos en California a fines de la década de 1950. Según expresa el ATC-34 [1], estudios llevados a cabo por numerosos investigadores en los Estados Unidos han cuestionado la formulación y los valores asignados al factor de modificación de respuesta, R .

A mediados de la década de 1980, algunos investigadores de la Universidad de Berkeley [2, 3] propusieron expresar el factor de modificación de respuesta, R , como el producto de tres factores: el factor de resistencia, R_s , el factor de amortiguamiento, R_ζ , y el factor de ductilidad R_μ . Esta expresión tiene la forma,

$$R = R_s R_\mu R_\zeta \quad (2)$$

El factor de resistencia R_s se define como la relación entre la resistencia de cedencia F_y y la fuerza de diseño F_d , $R_s = F_y/F_d$, mientras que el

factor de ductilidad R_μ se define como la relación entre la demanda elástica F_e y la resistencia de cedencia F_y , $R_\mu = F_e/F_y$. El factor de reducción por amortiguamiento se aplica para tomar en consideración la reducción de la respuesta debido a dispositivos suplementarios de amortiguamiento viscoso. En estructuras convencionales el factor R_ζ es igual a 1.0.

Posteriormente, el proyecto ATC-34 [1] propone una nueva formulación del factor R la cual se expresa de la forma,

$$R = R_s R_\mu R_R \quad (3)$$

en donde R_R es el factor de redundancia. Este factor se introduce para cuantificar la confiabilidad de sistemas sismo-resistentes que utilizan múltiples líneas verticales de resistencia sísmica en cada dirección del edificio. Inicialmente se le asignó a R_R valores entre 0.70 y 1.0 dependiendo del número de líneas verticales de resistencia del sistema sismo-resistente.

En el resto de este trabajo se adopta la siguiente ecuación para expresar la descomposición del factor de modificación de respuesta, R ,

$$R = R_\mu \Omega_0 \quad (4)$$

donde Ω_0 es el factor de sobre-resistencia, y se define al igual que R_s como la relación entre la resistencia a cedencia F_y y la resistencia de diseño F_d . El factor Ω_0 se presenta en la Tabla 5.2.2 del NEHRP-97 [5]. No se considera el efecto de redundancia del sistema estructural, por considerar que no existe suficiente información para sustentar teóricamente el uso de este factor.

Las definiciones del factor de modificación de respuesta R , el factor de ductilidad R_μ , el factor de sobre-resistencia del sistema Ω_0 , y el factor

de amplificación de desplazamiento C_d pueden ser encontradas en NEHRP-97 [5]. Una revisión de los valores de algunos de estos factores se presenta en [6].

3. El Factor R y la Demanda de Ductilidad Global de Desplazamiento μ

En 1989, Ridell y otros [7] establecieron una relación entre el factor de ductilidad, R_μ , la ductilidad, μ , y el período elástico de la estructura, T , correspondiente al modo fundamental de vibración. Estas relaciones son útiles para seleccionar factores de modificación de respuesta, R , que son dependientes del período de la estructura. Esta relación se expresa de la siguiente manera:

$$R_\mu = 1.0 + (\mu - 1) \frac{T}{T_0} \quad \text{para } T \leq T_0 \quad (5)$$

$$R_\mu = \mu \quad \text{para } T > T_0$$

donde T_0 es el período de transición de la zona de aceleraciones constantes a la zona de velocidades cortante del espectro de respuesta para 5% de amortiguamiento viscoso.

Reemplazando (5) en (4) se obtiene,

$$R = \Omega_0 \left[1.0 + (\mu - 1) \frac{T}{T_0} \right] \quad \text{para } T \leq T_0$$

$$R = \Omega_0 \mu \quad \text{para } T > T_0 \quad (6)$$

Como se puede observar, la expresión de R para la región de aceleraciones constantes del espectro ($T < T_0$) es una función de la ductilidad μ y del período de elástico T de la estructura. La demanda global de ductilidad de desplazamiento para el rango de períodos

cortos se puede deducir a partir de la ecuación (6) como,

$$\mu = \left(\frac{R}{\Omega_0} - 1 \right) \frac{1}{T/T_0} + 1.0 \quad (7)$$

Es importante observar que el factor de sobre-resistencia, Ω_0 , y el período de transición del espectro, T_0 , pueden ser considerados constantes para una misma estructura y un mismo tipo de suelo. Si adicionalmente se considera que el factor R es constante (tal como se recomienda en los códigos sísmicos de Estados Unidos), entonces es evidente en la ecuación (7) que la demanda de ductilidad es inversamente proporcional al período elástico de la estructura, T . Obviamente, la demanda de ductilidad tiende a infinito a medida que el período de la estructura se acerca a cero. La demanda de ductilidad máxima que puede aceptar un sistema sismo-resistente en el rango de períodos cortos se expresa de acuerdo a la expresión,

$$\mu_{max} = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{\Omega_0 I} \right)^2 + 1.0 \quad (8)$$

donde I es el factor de importancia de acuerdo al tipo de ocupación de la edificación [4]. La ecuación (8) se obtiene considerando igualdad de energía en el rango de períodos cortos.

La figura 3 muestra las curva de ductilidad μ versus la relación entre el período fundamental de la estructura y el período de transición, T/T_0 , para sistemas sismo-resistentes con distintos valores de R , y un valor constante de $\Omega_0 = 2.5$. Debe observarse que el valor de μ aumenta dramáticamente a medida que se reduce el período T . Para $I = 1.0$, la demanda de ductilidad máxima de acuerdo a (8) para distintos valores de R se muestra entre paréntesis en la figura No.3. En estructuras reales es imposible suministrar la

alta demanda de ductilidad requerida para períodos cortos. Es evidente, que para mantener una demanda de ductilidad en niveles aceptables para la estructura, es necesario expresar el factor R como una función del período elástico de la estructura; es decir, diseñar para una demanda de cortante mayor.

4. Propuesta del Factor de Modificación de Respuesta para Períodos Cortos, R^*

El factor de modificación de respuesta para períodos cortos, R^* , se puede obtener a partir de la ecuación (6) como

$$R^* = \Omega_0 \left[1.0 + \left(\frac{R}{\Omega_0} - 1 \right) \frac{T}{T_0} \right] \quad \text{para } T \leq T_0 \quad (9)$$

Es importante observar que el término de ductilidad μ en la ecuación (9) ha sido reemplazado por el término R/Ω_0 , el cual expresa la demanda de ductilidad del sistema en la región de períodos largos mostrada en la ecuación (6). En este término R es el factor de modificación de respuesta, cuyos valor se presenta en la Tabla 5.2.2 del [5]. Dado que los valores de R y Ω_0 se consideran constantes para una estructura en particular, entonces se deduce que la ecuación (9) da como resultado valores de R en la región de períodos cortos para garantizar una demanda de ductilidad compatible con la demanda de ductilidad en la región de períodos largos. Es decir, se preserva una demanda de ductilidad aceptable para la estructura.

Tal como se puede observar en la Tabla 5.2.2 del [5], el valor de Ω_0 para distintos tipos de sistemas sismo-resistentes oscila entre 2 y 3. Específicamente, para Marcos de Concreto Reforzado y Acero (especiales, intermedios, y ordinarios) el valor de Ω_0 asignado es de 3.0; mientras que para Muros de Corte (especiales, ordinarios) el valor de Ω_0 asignado es de 2.5.

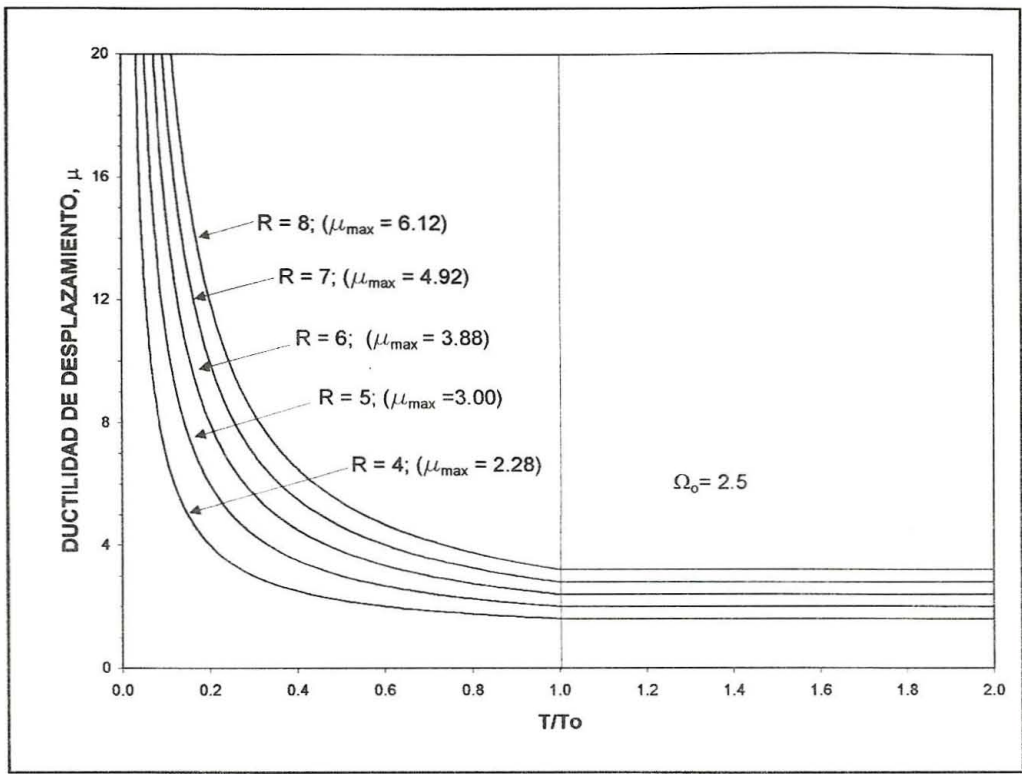


Figura 3: Ductilidad μ vs. período elástico T para sistemas sismo-resistentes con distintos valores de R .

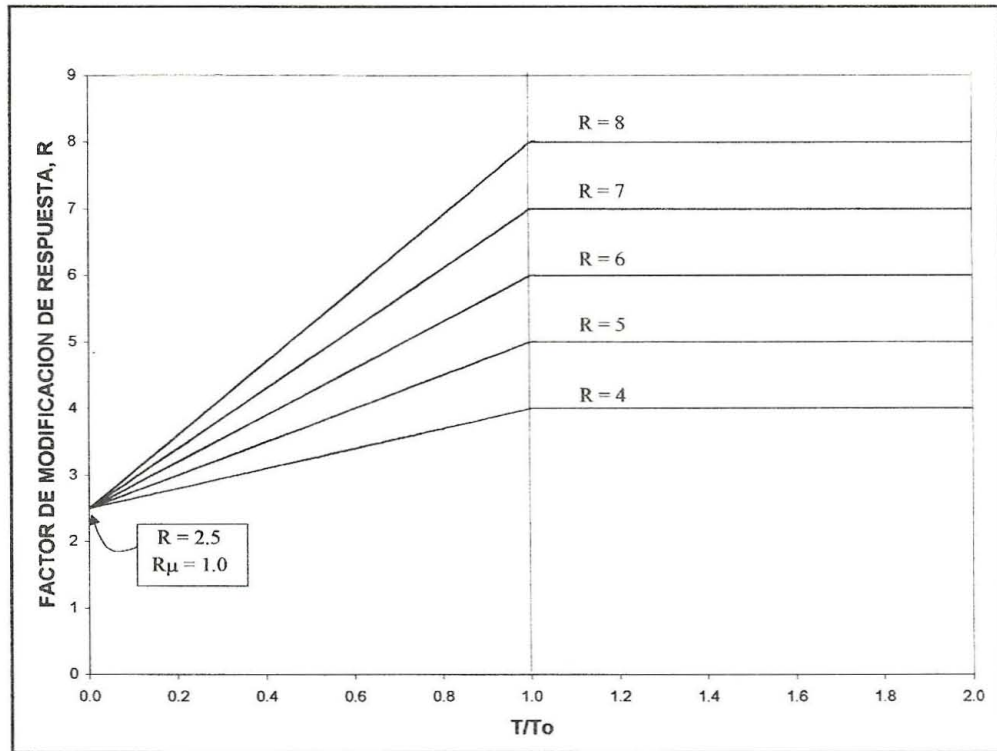


Figura 4: Variación del factor de modificación de respuesta para distintos sistemas estructurales.

Con el objeto de simplificar la expresión de R^* dada por la ecuación (9) se puede asumir un valor constante de Ω_0 para estos sistemas, sin perjuicio de la seguridad estructural. En este caso se recomienda el uso de $\Omega_0 = 2.5$. De esta manera, la ecuación (9) toma la forma,

$$R^* = 2.5 \left[1.0 + (0.4R - 1) \frac{T}{T_0} \right] \quad \text{para } T \leq T_0 \quad (10)$$

Reemplazo de (10) en (7) da como resultado,

$$\mu = \frac{R}{2.5} \quad (11)$$

La ecuación (11) expresa que el valor de la demanda de ductilidad es constante para cualquier valor del período elástico T menor que T_0 ($T/T_0 < 1.0$), y a la vez, es igual a la demanda de ductilidad requerida para estructuras de períodos largos ($T/T_0 > 1.0$) del espectro. De esta manera se confirma que con la relación del factor de modificación de respuesta, R^* , dado por la ecuación (10) se preserva la demanda de ductilidad a valores aceptables para las estructuras de período corto. La figura No.4 muestra la variación del factor de modificación de respuesta para distintos sistemas estructurales, de acuerdo a la ecuación (10).

Para verificar el efecto de estas ecuaciones en el diseño de estructuras rígidas o semirígidas ($T < T_0$), se aplicaron los valores de R^* según (10) a un edificio de marcos especiales de concreto reforzado ($R = 8.0$), cimentado sobre suelo blando y se sometieron a las aceleraciones de diseño especificadas en el *Reglamento Estructural Panameño de 1994* [8] para la ciudad de Panamá. Se analizaron estas estructuras para 6 valores de períodos cortos. Se obtuvo la demanda de ductilidad de desplazamiento, μ , el cortante basal, V , y el desplazamiento lateral máximo estimado, δ_{max} .

Los resultados de estos análisis se presentan en la Tabla 1.

La figura 5 muestra la comparación entre los valores de cortante basal, V , demanda de ductilidad, μ , y desplazamiento máximo, δ_{max} , obtenidos utilizando un valor constante de R y los obtenidos utilizando la propuesta del valor de R reducido, R^* , para los sistemas examinados. Como se puede observar, el cortante basal obtenido utilizando R^* varía con el inverso del período desde un máximo para período $T = 0.10$ seg. hasta un mínimo para $T = T_0$; mientras al utilizar R constante, el cortante basal permanece constante. Por otro lado, la demanda de ductilidad μ permanece constante a un valor de 3.20 al utilizar R^* , mientras que al utilizar R varía inversamente al período, desde un máximo de 14.46 para $T = 0.10$ seg hasta el valor de 3.20 para un período de 0.6 seg. A su vez, el valor del desplazamiento máximo δ_{max} aumenta para ambos valores de R a medida que aumenta el período, pero siempre el valor de δ_{max} es menor cuando se utiliza el valor de R^* . En resumen la utilización de R^* , comparado a la utilización de R , da como resultado valores mayores de cortante, valores constantes y menores de ductilidad, y valores menores de desplazamiento. Debe observarse que en este ejemplo, la máxima ductilidad aceptada por la estructura según la ecuación (8) es de 3.20.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha justificado la razón por la cual es necesario modificar los valores del factor de modificación de respuesta, R , recomendados en códigos sísmicos de Estados Unidos. Adicionalmente se ha propuesto una expresión para el valor del factor R , para edificios de período corto, R^* , como una función del período fundamental de la estructura, T , del período de transición del espectro de respuesta, T_0 , y del factor R recomendado en los códigos sísmicos actuales.

SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO 1 Suelo Blando						
No. de Niveles	1	2	3	4	5	6
Coeficiente de Aceleración, v	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Coeficiente de Aceleración, a	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Categoría de Desempeño Sísmico	C	C	C	C	C	C
Grupo de Exposición a la Amenaza	I	I	I	I	I	I
Factor de Suelo, S	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	2.50
Período de Transición, T_o	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
Factor del Período, C_t	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Altura del Edificio, h_n (ft)	9.84	19.68	29.52	39.36	49.20	59.04
Período Fundamental Aprox., T_a	0.17	0.28	0.38	0.47	0.56	0.64
Coeficiente de Período Límite,	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
Período Máx. Permitido, $T_{máx}$	0.28	0.48	0.65	0.80	0.95	1.09
Período Analítico, T_i	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
Período de Diseño, T	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
SEGUN REP-94						
Factor de Modificación, R	8	8	8	8	8	8
Factor de Sobreresistencia, Ω_o	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
Factor de Ductilidad, R_μ	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20
C_s , máx: $2.5 A_a/R$	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
Demanda de Ductilidad, μ	14.46	7.73	5.49	4.36	3.69	3.20
Desplazamiento Elástico, δ_e (mm)	0.68	2.73	6.15	10.93	17.08	24.60
Factor de Corrección por Inelasticidad, C_I	3.00	2.50	2.00	1.40	1.20	1.00
Desplazamiento Inelástico, δ_{in} (mm)	2.05	6.83	12.30	15.31	20.50	24.60
SEGUN PROPUESTA (Ramírez, 2001)						
Factor de Modificación, R^*	3.40	4.30	5.20	6.10	7.00	7.89
C_s , máx: $2.5 A_a/R$	0.081	0.064	0.053	0.045	0.039	0.035
Factor de Ductilidad, R_μ	1.36	1.72	2.08	2.44	2.80	3.16
Demanda de Ductilidad, μ	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20
Desplazamiento Elástico, δ_e (mm)	0.68	2.73	6.15	10.93	17.08	24.60
Factor de Corrección por Inelasticidad, C_I	1.35	1.30	1.25	1.20	1.15	1.00
Desplazamiento Inelástico, δ_{in} (mm)	0.92	3.55	7.69	13.12	19.65	24.60

Tabla 1: Resumen Comparativo del Análisis de Cortante, Ductilidad y Desplazamiento, REP - 94 vs. Propuesta.

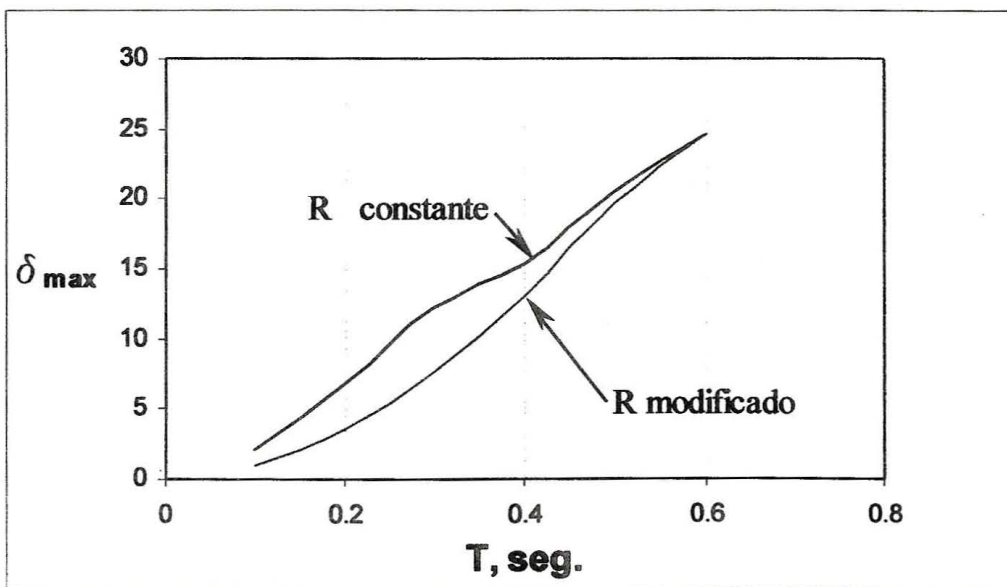
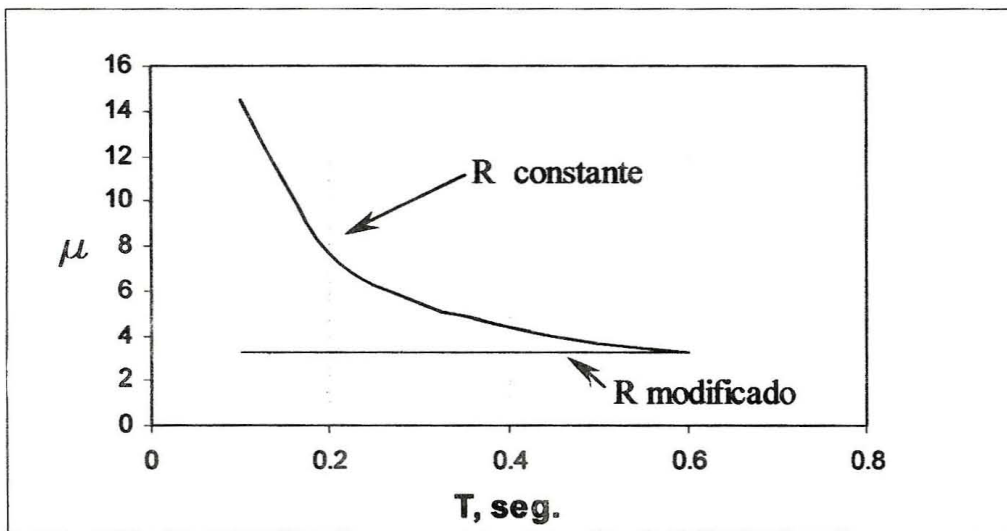
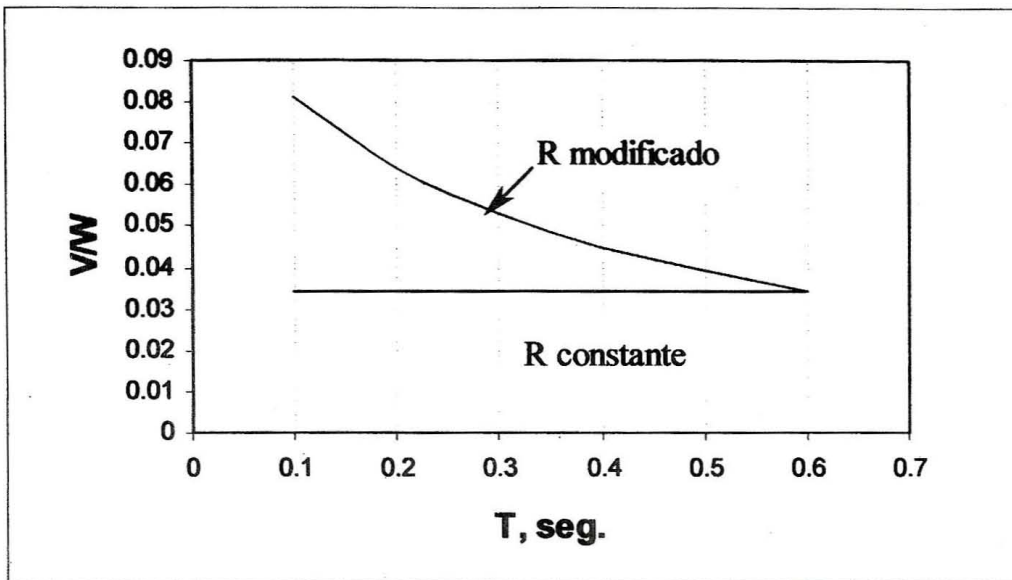


Figura 5: Curvas de V/W , μ y δ utilizando R constante y R modificado.

Finalmente se presentó un ejemplo de aplicación de la expresión propuesta para el factor R en sistemas con distintos períodos de vibración cortos, y los resultados de cortante basal, V , demanda de ductilidad μ , y desplazamiento máximo δ_{max} , fueron comparados a aquellos obtenidos utilizando los valores de R recomendados en el Reglamento Estructural de Panamá, [8]. Las conclusiones más importantes de este trabajo son:

- La demanda de ductilidad impuesta por el sismo de diseño en edificios de período corto diseñados utilizando el factor R recomendado en el REP-94 no puede ser atendida por el sistema estructural.
- La expresión del factor R propuesta en este estudio garantiza que la demanda de ductilidad en estructuras de período corto no sobrepase la reserva de ductilidad teórica implícita en los valores de R recomendados en el REP-94.
- Al utilizar la expresión del factor R propuesta en este estudio para edificios de período corto, se debe diseñar para fuerzas sísmicas mayores a las requeridas actualmente.

6. Referencias

- [1] Applied Technology Council (1995), "A critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design." Report No. ATC-34, Applied Technology Council, Redwood, City, California.
- [2] Uang, C.M., y Bertero, V.V. (1986), "Evaluation of Seismic Energy in Structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(1), 77-90
- [3] Whittaker, A.S., Uang, C.M., y Bertero, V.V. (1987), "Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 0.3-Scale Model of a Six-Story Eccentrically Braced Steel Structure." *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-87/02*, University of California, Berkeley, California.
- [4] Ramírez, O.M., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Whittaker, A.S., Johnson, W., y Gómez, J.D. (2000), "Development and Evaluation of Simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings with Passive Energy Dissipation Systems". *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report MCEER-00-0010*, University at Buffalo, Buffalo, New York.
- [5] NEHRP – National Earthquake Hazard Reduction Program (1997), "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New buildings and Other Structures", *Federal Emergency Agency, Washington, D.C.*
- [6] Uang, C. Y Bertero, V.V. (1990), "Evaluation of Seismic Energy in Structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(1), 77-90
- [7] Riddell, R., Hidalgo, P., y Cruz, E. (1989), "Response Modification Factors for Earthquake Resistant Design of Short Period Structures" *Earthquake Spectra*, 5(3), 571-590.
- [8] REP-94, Reglamento Estructural Panameño (1994), "Reglamento Estructural Panameño", *Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura, Panamá Panamá.*

GRADOS DE LIBERTAD DE IMÁGENES ÓPTICAS EN LA APROXIMACIÓN DE BORN

Edwin A. Marengo
Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión
Universidad Tecnológica de Panamá
Apartado 6-2894, El Dorado
Panamá, República de Panamá

RESUMEN

Una nueva formulación del problema de dispersión inversa (*inverse scattering problem*) es derivada en la aproximación de Born la cual está basada en el uso de campos multipolares en la definición de la matriz de dispersión (*scattering matrix*). Dicha formulación es utilizada para derivar el contenido informático del campo radiado o, equivalentemente, el número de grados de libertad del objeto o imagen a ser reconstruida, dentro del marco de la aproximación de Born. La teoría es desarrollada para campos escalares, pero todos los resultados principales se aplican directamente al caso electromagnético vectorial.

Palabras claves: dispersión inversa, problema inverso, contenido de información de campos radiados.

ABSTRACT

A new formulation of the inverse scattering problem is derived in the Born approximation that is based on using multipole fields in the definition of the scattering matrix. This formulation is used to derive the information content of the radiated field or, equivalently, the number of degrees of freedom of the reconstructed object or image, in the framework of the Born approximation. The theory is developed for scalar fields but all the main results apply directly to the vector electromagnetic case.

Keywords: inverse scattering, inverse problem, information content of radiated fields.

1. Introducción

Un problema de considerable interés práctico en modelos de inversión electromagnética tales como la dispersión inversa de ondas (*wave inverse scattering*) es el de caracterizar cuantitativamente el contenido de información de los campos electromagnéticos o, equivalentemente, la determinación del número de grados de libertad de las imágenes reconstruidas. Este tema ha sido investigado exhaustivamente por el grupo del Profesor Rocco Pierri en la Seconda Università di Napoli en conexión con diferentes modelos de dispersión inversa de ondas [1,2]. Otros aspectos del tema han sido tratados por Bertero [3] y Basinger et. al [4].

El objetivo central del presente trabajo es derivar el número de grados de libertad de imágenes de objetos tri-dimensionales reconstruidos a partir de sus campos electromagnéticos dispersados en la aproximación (lineal) de Born. A fin de proveer una idea intuitiva de dichos grados de libertad, consideramos los casos especiales de objetos con distintas simetrías, tales como objetos con variaciones espaciales radiales, angulares, y combinaciones de ellas. La formulación del problema de dispersión inversa (*inverse scattering problem*) presentada en este trabajo es nueva, y está basada en campos multipolares en tres dimensiones espaciales.

La formulación en cuestión puede utilizarse para resolver de modo exacto la versión

linealizada (de Born) del problema de dispersión inversa (*inverse scattering problem*) según las técnicas usuales de problemas inversos lineales. Pero el propósito aquí es utilizar la nueva formulación a fin de derivar sistemáticamente los grados de libertad de la imagen reconstruida, para distintos tipos de objetos radiantes. A diferencia de los tratamientos del tema encontrados en las ref. [1-4], en este trabajo enfatizamos en objetos tri-dimensionales en vez de objetos descritos por una o dos dimensiones espaciales. También explicamos cómo los resultados derivados para campos escalares se aplican directamente a campos electromagnéticos vectoriales. La metodología general presentada, la cual puede extenderse fácilmente a otros problemas de inversión, permite una determinación sistemática de los grados de libertad de la imagen e ilustra las clases de objetos reconstruibles mediante el modelo linealizado de Born del problema inverso.

2. Formulación del Problema Inverso con Campos Multipolares

Considere el problema de dispersión inversa escalar (*scalar inverse scattering problem*) en el marco de la ecuación de Helmholtz en el espacio libre tri-dimensional, a saber,

$$(\nabla^2 + k^2)\psi = V\psi \quad (1)$$

donde $\psi(\mathbf{r})$ es el campo total (campo incidente ψ_i más campo dispersado ψ_s), $V(\mathbf{r})$ es el potencial de dispersión (*scattering potential*), ∇^2 es el operador Laplaciano en tres dimensiones espaciales, y $k = \omega/c$ es el número de onda, donde ω es la frecuencia angular de oscilación temporal y c es la velocidad de propagación de la onda en el espacio libre que envuelve al objeto. La expresión (1) puede ser re-escrita como

$$(\nabla^2 + k^2)(\psi_s + \psi_i) = V(\psi_s + \psi_i) \quad (2)$$

En la aproximación de Born, el campo dispersado

$$\psi_s = \int d\mathbf{r} G V \psi_i \quad (3)$$

donde G es la función de Green en el espacio libre y $d\mathbf{r}$ es el elemento diferencial en el espacio de tres dimensiones. Dicho campo dispersado también puede escribirse en términos de la expansión multipolar del campo radiado

$$\psi_s = \sum_{l,m} a_{l,m} \Psi_{l,m} \quad (4)$$

donde el campo multipolar

$$\Psi_{l,m} = h_l^+(kr) Y_{l,m}(s) \quad (5)$$

donde $h_l^+(kr)$ es la función de Hankel esférica de la primera clase y de orden l , $Y_{l,m}(s)$ es el armónico esférico de grado l y orden m , y $s = \mathbf{r}/r$ es el vector unitario en la dirección del vector de posición \mathbf{r} . Los momentos multipolares $a_{l,m}$ del campo dispersado están entonces definidos mediante los productos internos

$$a_{l,m} = \langle \Lambda_{l,m} | V \psi_i \rangle_X = \int d\mathbf{r} \Lambda_{l,m}^* V \psi_i \quad (6)$$

donde $*$ denota el conjugado complejo (*complex conjugate*) y $\Lambda_{l,m}$ es el campo libre multipolar (*source-free multipole field*), el cual está definido como

$$\Lambda_{l,m} = j_l(kr) Y_{l,m}(s) \quad (7)$$

donde $j_l(kr)$ es la función de Bessel esférica de orden l .

El problema de dispersión inversa (*inverse scattering problem*) puede formularse como el problema de reconstruir el perfil espacial del potencial de dispersión $V(\mathbf{r})$ a partir del conocimiento de los momentos multipolares $a_{l,m}(L,M)$ determinados a través de experimentos de dispersión (*scattering experiments*) involucrando todos los $\Lambda_{L,M}$

como campos incidentes. Esta estrategia es admisible dado que el campo incidente más general puede expandirse como una suma de todas las ondas esféricas $\Lambda_{L,M}$. Entonces, introducimos la matriz de dispersión (scattering matrix) A cuyos elementos son

$$A(l,m,L,M) = a_{l,m}(L,M) = \text{“}a_{l,m} \text{ para } \psi_i = \Lambda_{L,M}\text{”}.$$

Entonces se deduce de (6) con $\psi_i = \Lambda_{L,M}$ que,

$$A_{l,m}(L,M) = \int dr \Lambda_{l,m}^* V \Lambda_{L,M}. \quad (8)$$

Restringimos nuestra atención a potenciales de dispersión de soporte compacto. Introducimos entonces un volumen esférico $D:r \leq R$ dentro del cual se encuentra completamente confinado el potencial en cuestión. Definimos también los espacios de Hilbert X y Y de la solución (potenciales de dispersión V) y de la data (matrices de dispersión A), respectivamente, y les asignamos los productos internos L_2 usuales

$$\langle V_1 | V_2 \rangle_X = \int dr V_1^* V_2$$

y

$$\langle A_1 | A_2 \rangle_Y = \sum_{l,m,L,M} A_1^*(l,m,L,M) A_2(l,m,L,M). \quad (9)$$

Mediante el formalismo usual, definimos el mapeo directo $L:X \rightarrow Y$ el cual definimos usando (8)-(9), obteniendo

$$A(l,m,L,M) = \langle \Lambda_{l,m} | V \Lambda_{L,M} \rangle_X = \int dr \Lambda_{l,m}^* V \Lambda_{L,M} = (LV)(l,m,L,M). \quad (10)$$

El mapeo adjunto $L^+:Y \rightarrow X$ de L es definido a partir de L de tal forma que

$$\langle V | L^+ A \rangle_X = \langle LV | A \rangle_Y \quad (11)$$

y encontramos mediante (9)-(11) que

$$(L^+ A)(r) = M(r) \sum_{l,m,L,M} A(l,m,L,M) \Lambda_{l,m} \Lambda_{L,M}^* \quad (12)$$

donde $M(r)$ es una función característica del soporte del objeto radiante cuyo valor es 1 si $r \leq R$ (región que encierra enteramente al objeto) y es 0 en caso contrario.

La solución del problema de dispersión inversa, es decir, el potencial de dispersión V correspondiente a una matriz de dispersión A especificada, está definida por el operador pseudoinverso (*pseudoinverse operator*) $L^+(LL^+)^{-1}$ de L (técnicas de regularización pueden incorporarse en presencia de ruido en la data). Una expresión explícita puede derivarse fácilmente de la formulación de arriba usando dicho operador. No obstante, el objetivo aquí es derivar los grados de libertad o el contenido informático del campo radiado. Vamos a presentar a continuación la formulación asociada para el caso especial de un potencial de dispersión esféricamente simétrico, es decir, un potencial de dispersión con sólo dependencia espacial radial.

3. Formulación del Problema Inverso de Objetos Esféricamente Simétricos

Considere el caso especial de un potencial de dispersión con dependencia radial $V(r) = V(r)$. Para lidiar con este caso, es conveniente definir el espacio de Hilbert X de objetos o imágenes con dependencia radial cuyo producto interno está definido como

$$\langle V_1 | V_2 \rangle_X = \int dr r^2 V_1^* V_2 \quad (13)$$

donde se sobreentiende que los potenciales de dispersión son funciones del radio r solamente.

El mapeo directo de V a A está definido mediante

$$A(l,m,L,M) = \int dr r^2 V(r) j_l(kr) j_L(kr) \int ds Y_{l,m}^*(s) Y_{L,M}(s) = \delta_{l,L} \delta_{m,M} \int dr r^2 V(r) j_l(kr) j_L(kr). \quad (14)$$

donde hemos usado la propiedad de ortogonalidad de los armónicos esféricos. Solamente los elementos en la diagonal de la matriz de dispersión definida en (14) tienen valores no triviales. Todos los elementos afuera de la diagonal tienen valor cero. Definimos

$$b_l = \int dr r^2 V(r) j_l^2(kr) \quad (15)$$

de tal forma que (14) se reduce a

$$A(l,m,L,M) = b_l \delta_{l,L} \delta_{m,M} \quad (16)$$

La expansión multipolar del campo dispersado correspondiente al campo incidente l,m está definida a partir de (4)-(5) y (16) como

$$\begin{aligned} \psi_s(l,m) &= \sum_{l,m} A(l,m,l,m) \psi_{l,m} \\ &= \sum_l j_l(kr) \sum_m A(l,m,l,m) Y_{l,m}(s) \\ &= \sum_l b_l j_l(kr) \sum_m Y_{l,m}(s). \end{aligned}$$

En estas expansiones, los términos relevantes son, como es bien conocido, $l=0,\dots,N \sim kR$ mientras que m toma valores de $-N$ a N . La razón por la que los términos $l > N$ no deben ser considerados, en la práctica, es también bien conocida (ver, por ejemplo, Bertero [3]). En particular, se debe a que en las expansiones del campo dispersado, dichos términos decaen exponencialmente rápido para $l > N$. En vista de (15)-(16), vemos que los pedazos independientes de información sobre el objeto o imagen son provistos únicamente por los coeficientes b_l , de tal manera que son sólo $N+1$ los pedazos independientes de información que podemos obtener sobre el objeto en el modelo linealizado considerado aquí. Los pedazos independientes de información son las proyecciones del objeto a ser reconstruido sobre las $N+1$ funciones $j_l^2(kr)$, para $l=0$ hasta $N \sim kR$. El número de grados de libertad (*number of degrees of freedom (NDF)*) (según la definición de esta cantidad establecida en [1]) en este caso es $N \sim kR$ donde k es el número de onda del campo y R es el radio de

la región esférica más pequeña capaz de contener enteramente al objeto radiante desconocido. Los potenciales de dispersión $V(r)$ que pueden ser reconstruidos mediante este modelo son sencillamente aquellos para los cuales los coeficientes b_l donde $l > N$ son pequeños. Es más, podemos considerar a continuación el asociado problema adjunto y el operador $LL^+:Y \rightarrow Y$ para ver exactamente cuáles son las funciones de expansión del campo radiado que se relacionan a dichos coeficientes.

Es conveniente definir a continuación el espacio de Hilbert de los vectores de la data $A(l)$ a los cuales asignamos el producto interno

$$\langle A_1 | A_2 \rangle_Y = \sum_l A_1^*(l) A_2(l).$$

Aquí hemos suprimido la dependencia en m ; ésta no es relevante en el caso de una simetría esférica como hemos demostrado en (14)-(16).

Ahora bien, a partir de (13)-(16) y (11) con los productos internos de X y Y definidos arriba uno obtiene

$$(L^+A)(r) = M(r) \sum_l A(l) j_l^2(kr). \quad (17)$$

así, que según (16), $A(l)$ es igual a b_l .

El potencial de inversión reconstruido está dado por la fórmula

$$V(r) = [L^+(LL^+)^{-1}A](r). \quad (18)$$

Vemos a partir de (13)-(18) que $LL^+:Y \rightarrow Y$ está definido por

$$[(LL^+)A](l) = \sum_n A(n) \int dr M(r) r^2 j_l^2(kr) j_n^2(kr).$$

Las funciones y valores singulares de este caso son determinados fácilmente. Los vectores de data singulares son, aparte de una normalización, simplemente los vectores A_l cuyos elementos son $A_l(n) = \delta_{l,n} b_l$. Los

potenciales singulares de dispersión V_l (la base para los potenciales reconstruibles de Born) son, aparte de una normalización, simplemente $V_l = M(r) j_l^2(kr)$. Los valores singulares están definidos por las integrales $\sigma_l^2 = \int dr M(r) r^2 j_l^4(kr)$.

Resumiendo, estas manipulaciones en el dominio multipolar han revelado el contenido de información de los campos dispersados de Born y la clase de funciones esféricamente simétricas reconstruibles mediante tal modelo. Consideramos a continuación el caso especial de potenciales de dispersión con dependencia angular solamente.

4. Contenido de Información de Campos Escalares Dispersados para Objetos con Dependencia Angular

En este caso especial, la matriz de dispersión

$$A(l,m,L,M) = \langle \Lambda_{l,m} | V | \Lambda_{L,M} \rangle_X \\ = \int dr \Lambda_{l,m}^* V \Lambda_{L,M}$$

se reduce a

$$A(l,m,L,M) = b_{l,L} \int ds Y_{l,m}^*(s) Y_{L,M}(s) V(s)$$

donde $b_{l,L} = \int dr M(r) r^2 j_l(kr) j_L(kr)$ donde $M(r)$ es la función característica utilizada previamente (la cual es igual a 1 en el interior de un volumen esférico de radio R que encierra completamente al objeto y es 0 afuera).

Recordamos que [5]

$$Y_{l,m}(s) = \alpha_l^m P_l^m(\cos\theta) \exp(im\phi)$$

Donde

$\alpha_l^m = (-1)^m \sqrt{[(2l+1)/4\pi(1-m)!/(1+m)!]}$ y $P_l^m(\cos\theta)$ es el polinomio asociado de Legendre de grado l y orden m . En el caso más general, cualquier potencial de dispersión que depende solamente

de las variables angulares puede expandirse como una serie de armónicos esféricos. En ese caso, los componentes independientes de información acerca del objeto a ser reconstruido están contenidos en los coeficientes de la expansión correspondiente en armónicos esféricos. Los términos relevantes en la expansión desde el punto de vista de estabilidad son los primeros $N+1$ términos en l , lo cual se aplica tanto a l como a L , conjuntamente con las $2N+1$ dependencias en m y M . Esto implica un total de $[(N+1)(2N+1)]^2$ coeficientes independientes de expansión armónica. Un caso especial de interés y donde el contenido de información es más reducido, es el caso de un objeto con dependencia separable de los ángulos acimutal y polar. Vamos a considerar primero el caso de dependencia acimutal y luego analizaremos el correspondiente caso de dependencia del ángulo polar. Los resultados obtenidos más adelante para el ángulo acimutal son idénticos a los reportados en [2] para problemas en dos dimensiones espaciales. No obstante, los argumentos utilizados aquí son desarrollados directamente en el espacio de tres dimensiones, en el dominio multipolar el cual es exclusivo de esta presentación. También vamos a explicar la teoría más general la cual hace uso de integrales de tres armónicos esféricos en vez de las integrales más familiares que involucran solamente dos armónicos esféricos. Las últimas son las que hacen uso de las relaciones de ortogonalidad más conocidas. La teoría más general en cuestión hace uso de desarrollos en teoría de grupos y, en particular, de los coeficientes de Clebsch-Gordan [5].

5. Caso Especial: Dependencia Acimutal

Escribimos

$$V(\phi) = \sum_q C_q \exp(iq\phi)$$

de tal forma que

$$\begin{aligned}
A(l,m,L,M) &= b_{l,L} \int ds Y_{l,m}^*(s) Y_{L,M}(s) V(\phi) \\
&= \alpha_l^m b_{l,L} \int d\theta \sin\theta P_l^m(\cos\theta) P_L^M(\cos\theta) \\
&\sum_q C_q \int d\phi \exp[i(-m+M+q)\phi] \\
&= 2\pi\alpha_l^m b_{l,L} \int d\theta \sin\theta P_l^m(\cos\theta) P_L^M(\cos\theta) \\
&\sum_q C_q \delta_{M+q-m,0}.
\end{aligned}$$

Debido a que los índices M y m toman valores de $-N$ a N , se deduce que el número relevante de coeficientes C_q (el contenido de información) en el caso de dependencia acimutal solamente es $4N + 1$. El número mínimo ocurre cuando $M=N, m=-N$, de tal forma que la función delta de Kronecker requiere $N+q+N=0$, es decir, $q = -2N$. La condición máxima ocurre cuando $M=-N, m=N$, y entonces $q=2N$. Los coeficientes relevantes en la suma tienen índices $-2N, \dots, 0, \dots, 2N$ lo cual implica un total de $4N+1$ números. Este es el mismo resultado derivado en [2] para el problema en dos dimensiones. Esto era de esperar dado que la dependencia acimutal tiene una naturaleza idéntica en los problemas en dos y en tres dimensiones.

6. Caso Especial: Dependencia Polar

En este caso expandimos

$$V(\theta) = \sum_q C_q P_q^0(\cos\theta).$$

Ahora bien,

$$\begin{aligned}
A(l,m,L,M) &= b_{l,L} \int ds Y_{l,m}^*(s) Y_{L,M}(s) V(\theta) \\
&= \alpha_l^m b_{l,L} \delta_{m,M} \sum_q C_q \int d\theta \sin\theta \\
&P_l^m(\cos\theta) P_L^m(\cos\theta) P_q^0(\cos\theta).
\end{aligned}$$

Esta integral, la cual involucra tres funciones asociadas de Legendre, puede ser resuelta mediante métodos de teoría de grupos. El método general es descrito abajo y permite deducir el número de grados de libertad en la dependencia en el ángulo polar.

Si $q=0$, entonces la integral se reduce a la integral de ortogonalidad usual de las

funciones asociadas de Legendre. Si $q=1$, entonces tenemos $P_1^0(\cos\theta)=\cos\theta$. Ahora la integral toma la forma

$$\int d\theta \sin\theta \cos\theta P_l^m(\cos\theta) P_L^m(\cos\theta).$$

Aplicando las relaciones de recurrencia de las funciones asociadas de Legendre, podemos re-escribir esta integral en una forma que involucra sólo dos funciones asociadas de Legendre. Este resultado es general, aplicándose a la integral más general involucrando tres funciones de Legendre. Así podemos re-escribir cualquier integral de este tipo como una suma de otras integrales que involucran sólo dos funciones de Legendre. Este es el paso crucial dado que luego podemos emplear las relaciones de ortogonalidad y evaluar cualquier integral de este tipo en forma explícita. El caso especial $q=1$ rinde mediante una manipulación sencilla las expresiones 12.189-12.192 en [5]. Es importante para nosotros saber que la integral de arriba se reduce para $q=1$ a dos integrales involucrando sólo dos funciones asociadas de Legendre. Debido a la relación de ortogonalidad, las únicas contribuciones relevantes provienen de los términos $l, L+1$ y $l, L-1$, es decir, los términos en los polinomios $P_{l+1}^m(\cos\theta) P_l^m(\cos\theta)$ y $P_{l-1}^m(\cos\theta) P_l^m(\cos\theta)$. Para una q cualquiera, tendríamos términos en los polinomios hasta el punto en que $l=L+q, l=L-q$, de tal forma que q tendrá valores de 0 a N (el valor máximo de l y L es N , de tal forma que la máxima q se deduce mediante $l=L+q$, donde $l=N, L=0, q=N$, y el mínimo es obviamente $q=0$). Los términos de q negativa no son considerados porque no son linealmente independientes de los términos de q positiva. En conclusión, el número de componentes independientes de información es, en este caso, $N+1$ (los N coeficientes C_q en la expansión de arriba). El número de grados de libertad es, entonces, N , en la dependencia angular polar.

7. Caso Electromagnético

Finalmente, terminamos esta discusión comentando que todas las conclusiones principales del análisis precedente se aplican también al caso electromagnético vectorial. La versión vectorial de dicho análisis, la cual no presentaremos aquí, hace uso de un formalismo con los campos multipolares vectoriales asociados con los campos eléctricos y magnéticos. El formalismo sigue líneas similares a las de su homólogo escalar en la aproximación de Born. El contenido informático es idéntico al encontrado aquí con la formulación escalar si el objeto mismo a ser reconstruido es, de por sí, también escalar (un índice de refracción, por ejemplo, pese a que la formulación del campo puede ser exactamente vectorial). En el caso de un objeto escalar interrogado mediante ondas electromagnéticas, uno puede utilizar o multipolos eléctricos o multipolos magnéticos, pero el uso de ambos no proveerá información independiente sobre el objeto o la imagen en cuestión. En el caso más general de un objeto diádico (a dyadic object) donde el objeto es modelado como un potencial de dispersión diádico, el contenido de información es doblado automáticamente en relación a su homólogo escalar. En dicho caso el contenido informático de los multipolos eléctricos es completamente independiente del contenido informático de los multipolos magnéticos.

8. Conclusión

En este trabajo derivamos una nueva formulación en el dominio multipolar del problema de dispersión *inversa* (*inverse scattering problem*), en el contexto de la aproximación de Born, en tres dimensiones espaciales. La nueva formulación permitió la derivación sistemática de los grados de libertad de la imagen reconstruida, para distintos tipos de objetos radiantes. También se discutió la clase de objetos reconstruibles en la

aproximación de Born. Los resultados fueron derivados mediante una formulación escalar del campo. Luego vimos que los resultados finales aplican igualmente a la correspondiente formulación electromagnética vectorial. La metodología general desarrollada en el artículo es extensible a otros problemas de inversión.

9. Agradecimiento

El autor desea expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Investigaciones de Italia quien patrocinó una reciente visita académica suya a dicho país para investigar sobre el tema tratado aquí. Agradece muy especialmente sus interacciones científicas con los Profesores Rocco Pierri y Giovanni Leone y los Doctores Angelo Liseno, Adriana Brancaccio y Francesco Soldovieri de la Seconda Università di Napoli. El autor también desea expresar su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión de la Universidad Tecnológica de Panamá tras haber proporcionado una licencia con sueldo durante la visita académica en cuestión.

10. Referencias Bibliográficas

- [1] Pierri, R., Soldovieri, F., "On the information content of the radiated fields in the near zone over bounded domains", *Inverse Problems*, Vol. 14, p. 321, 1998.
- [2] Brancaccio, A., Leone, G., Pierri, R., "Information content of Born scattered fields: results in the circular cylindrical case", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 15, p. 1909, 1998.
- [3] Bertero, M., "Super-resolution by data inversion", *Progress in Optics*, Vol. 36, p. 129, 1996.
- [4] Basinger, S.A., Michielssen, E., Brady, D.J., "Degrees of freedom of polychromatic images", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 12, p. 704, 1995.

- [5] Arfken, G.B., Weber, H.J.,
Mathematical Methods for Physicists,
Academic Press, San Diego, 1995.

PROTECCIÓN ANTICORROSIVA DE METALES EN LA ATMÓSFERA (PATINA). RESULTADOS DE DOS AÑOS DE EXPOSICIÓN

Lilibeth De Gracia de Araque ⁺, Agnes F.de Bósquez ⁺⁺, Mariela S. de Villaláz ⁺
⁺ Universidad Tecnológica de Panamá, Apartado 6-2894, El Dorado
Panamá, Rep. de Panamá de Panamá
⁺⁺ Universidad de Panama

RESUMEN

Recubrimientos metálicos protectores de base zinc, aluminio y de aleaciones de ambos fueron aplicados sobre paneles de acero de bajo carbono de 10 x 15 cm., utilizando varios procesos: inmersión en caliente, electrólisis y metalizado. Las probetas se colocaron en bastidores con una inclinación de 45° con respecto a la horizontal y mirando hacia el mar, en la estación de ensayo de Colón previamente clasificada como **Marina**. En este trabajo se presentan los resultados de las velocidades de corrosión por el método gravimétrico y las evaluaciones del aspecto físico correspondientes a 24 meses de exposición.

Palabras claves: recubrimientos metálicos, corrosión atmosférica, velocidad de corrosión, aspecto físico.

ABSTRACT

Metallic protective coatings of zinc, aluminum and his alloys were applied on 10 x 15 cm. Low carbon steel coupons , by differents production methods: hot dip, electroplating and metallized. The coupons were supported on racks at 45° from horizontal facing the seashore and exposed in the atmospheric corrosion site of Colón, previously classified as **marine station**. This paper presents the corrosion rates by the gravimetric method and the evaluations of physicals aspects corresponding to 24 months of atmospheric exposition.

Keywords : metallic coatings, atmospheric corrosion, corrosion rate, physical aspect.

1. Introducción

La Red Temática **PATINA XV.D** “Protección Anticorrosiva de Metales en la Atmósfera”, Sub-programa **XV Corrosión, Impacto Ambiental sobre Materiales del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED)** estuvo integrada por 14 países de la Región Iberoamericana , los mismos que participaron en el **Proyecto MICAT** (Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica).

En el MICAT se estudió el comportamiento de metales desnudos, se caracterizaron las estaciones de ensayo según su agresividad y finalmente cada país elaboró sus Mapas de

Corrosividad Atmosférica. La red **PATINA**, en cambio, se dedicó al *estudio y evaluación del comportamiento de recubrimientos anticorrosivos* aplicados sobre algunos de éstos metales.

En Panamá, se utilizan a diario grandes cantidades de materiales metálicos galvanizados (recubiertos con zinc principalmente por el proceso de inmersión en caliente) entre los que podemos mencionar: láminas, ángulos, clavos, alambres, tornillos, etc. Asimismo ha ido en aumento la comercialización de recubrimientos electrolíticos y de aspersión térmica (metalizado). El uso extenso de estos recubrimientos justificaría futuras

investigaciones acerca de su comportamiento en nuestro medio que nos permitirían hacer recomendaciones en cuanto al uso y selección de los mismos.

Se consideró que en Panamá, la estación que ofrecía mayor interés para este tipo de estudio era la de Colón clasificada en el MICAT como una estación **Marina**.

Todos los recubrimientos metálicos estudiados fueron a base de zinc, aluminio y sus aleaciones, los cuales a parte de constituir una barrera física entre el medio y el metal pueden desempeñar el rol de ánodo de sacrificio [1, 2].

2. Parte Experimental

2.1. Las probetas de acero de bajo contenido de carbono recubiertas con zinc y sus aleaciones fueron suministradas por España, México y los Estados Unidos y las de aluminio y sus aleaciones por Argentina, Brasil y España para todos los participantes del proyecto. En la **Tabla # 1** se presentan los detalles referentes al metal base y a los recubrimientos [3,4].

2.2. Se expusieron probetas con y sin incisión. La incisión no es más que un rayado longitudinal que llega al metal base quedando éste al descubierto. Las probetas con incisión fueron utilizadas para evaluar la protección catódica [5], las probetas sin incisión para determinar la pérdida de peso y para estudios especiales.

2.3. Las probetas se limpiaron, las que no tenían incisión se pesaron (utilizando balanza analítica) luego se midieron sus espesores (con medidor digital), posteriormente todas se codificaron (de acuerdo con la codificación establecida en el proyecto), se colocaron en los bastidores de la estación de Colón de acuerdo con lo establecido en la Norma ISO 4542 [6]

referente a ensayos de exposición atmosférica (altura mínima de los bastidores, inclinación de las muestras, etc.). Finalmente se fotografiaron todas las probetas.

2.4. Con el objeto de precisar la aparición de herrumbre en las incisiones (rayados) las observaciones físicas de estas probetas se iniciaron a la primera semana, luego a la segunda, al mes, a los tres y posteriormente a los 6, 12, 18, 24, 30, 36 y 42 meses. Se procedió así con la finalidad de evaluar la duración de la protección catódica del recubrimiento. Las evaluaciones de las probetas sin incisiones se iniciaron a los 6 meses y se continuó con la misma periodicidad arriba mencionada. Las retiradas se efectuaron a los 12, 24, y 42 meses.

2.5. Los aspectos físicos evaluados periódicamente en todas las probetas, a excepción de las muestras **2G** que tenía un sellador de poros y por lo tanto se trató como si fuera una muestra pintada, fueron los siguientes: formación de productos de corrosión del revestimiento, formación de productos de corrosión del acero del sustrato (acero base), descascaramiento del revestimiento, corrosión en los bordes, corrosión a partir de la incisión, picaduras y otras [7, 8, 9].

2.6. Se efectuó mensualmente la captación y el análisis de los contaminantes atmosféricos dióxido de azufre y cloruros [10]. Los datos de clima (temperatura, humedad relativa y precipitación) se obtuvieron de la estación meteorológica del entonces Instituto de Recursos Hidráulicos y de Electrificación, ubicada en Colón.

2.7. Al término del tiempo estipulado, las probetas se retiraron de la estación de ensayo, se colocaron en bolsas plásticas cerradas y en el laboratorio se procedió a efectuar la limpieza según el método ISO / DIS 8407 [11].

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC Y SUS ALEACIONES			
Metal base: Placas y Chapas de acero de bajo carbono de las siguientes dimensiones: 10 x 15 cm.X 1mm (placas) 10 x 15 cm.X > 1mm (chapas)			
Probeta	Tipo de recubrimiento	Espesor promedio (μm)	Norma
1G con y sin incisión	GALVANIZADO EN CALIENTE (Discontinuo)	70	ASTM A-123a
2G con y sin incisión	METALIZADO (sellador de poros, tipo "wash primer")	220	ASTM B-883
3G con y sin incisión	ELECTROCINCADO (cincada en frío)	6	ASTM B-879
4G con y sin incisión	SENZIMIR (chapa galvanizada en caliente, continuo)	22	ASTM A-525 A-526 A-875
5G con y sin incisión	GALFÁN, Zn, 5% Al (chapa galvanizada en continuo)	25	ASTM A-525 A-526 A-875
RECUBRIMIENTOS BASE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES			
Probeta	Tipo de recubrimiento	Espesor promedio (μm)	Acero Base
AG con y sin incisión	ALUMINIZADO (aluminio aplicado por inmersión en caliente)	44	Acero de bajo carbono de 10 x 15 cm x 0.5 mm C=0.052%, Mn=0.18% S=0.01% , Cu=0.02% P=0.014%, Si=0.02%
BG con y sin incisión	METALIZADO CON ALUMINIO (más sellador vinílico)	144	Acero de bajo carbono de 10 x 15 cm x 2.0 mm C=0.66%, Mn=0.35% S=0.16%, Cu<0.01 P=0.02%, Si=0.04%
CG con y sin incisión	METALIZADO CON ALEACIÓN Al / Zn (85% Zn, 15% Al, sin sellador)	180	Acero de bajo carbono de 10 x 15 cm x 2.0 mm C=0.66%, Mn=0.35% S=0.16%, Cu<0.01 P=0.02%, Si=0.04%
DG con y sin incisión	GALVALUME (55% Al, 1.6% Si, 43.4% Zn)	19	Acero de bajo carbono de 10 x 15 cm x 1.0 mm C=0.019%, Mn=0.34% S=0.16% , Cu=0.01 P=0.015%, Si=0.01%

Tabla 1: Recubrimientos de base zinc, aluminio y sus aleaciones aplicados sobre placas y chapas de acero de bajo carbono con sus respectivos espesores.

Finalmente se calculó la velocidad de corrosión siguiendo el método gravimétrico ISO 9226 [12].

3. Resultados Experimentales

3.1. Velocidad de corrosión

En la **tabla # 2** se presentan los resultados de las pérdidas de masa y las velocidades de corrosión, obtenidas por el método gravimétrico, correspondientes a 12 y 24 meses de exposición.

3.1.1. La velocidad de corrosión de las muestras electrocincadas (**3G**) no se determinó por el método gravimétrico, ya que al año de exposición todas estaban totalmente recubiertas de herrumbre, tanto así que ni siquiera se distinguía la incisión en aquellas que la tenían. Los resultados de los ensayos electroquímicos que aparecen en otros artículos [13, 14], revelan que el potencial de reposo de éstas muestras es muy similar al del hierro y no al del zinc.

3.1.2. Las probetas pertenecientes al tipo **2G** (metalizada) no estaban destinadas a ser evaluadas por pérdida de peso, ya que se les aplicó un sellador de poros tipo “wash primer”.

3.1.3. Las probetas del grupo **4G** (senzimir, chapa galvanizada en caliente continuo) correspondientes a 12 y 24 meses de exposición se extraviaron como resultado de inconvenientes en el sitio de ubicación de la estación.

3.2. Evaluaciones del Aspecto Físico de las Probetas

3.2.1. Las probetas **1G** (galvanizadas por inmersión en caliente, discontinuo) presentaron puntos negros y de herrumbre en la cara, los bordes se mantuvieron en buen estado, la incisión presentó 80% de óxido

blanco (típicos del recubrimiento de Zn), sin presencia de herrumbre.

3.2.2. En la incisión de las probetas **2G** (metalizadas con zinc más sellador de poros) se observó 100% de herrumbre en la incisión, pero sólo dentro de la incisión.

3.2.3. Las probetas **3G**, galvanizadas por electrólisis, al término de un año de exposición estaban totalmente recubiertas de herrumbre (ni siquiera se distinguía la incisión), es decir que se perdió todo el recubrimiento protector y por esto fueron retiradas del bastidor al término de los 30 meses de exposición.

3.2.4. Las evaluaciones de la cara de las probetas **5G** (galfán, Zn / 5%Al) es similar a la de la **1G**, a diferencia de los bordes que presentaron corrosión incipiente, además de que en la incisión se observó 100% de herrumbre.

3.2.5. En la cara de las probetas **AG** (aluminio aplicado por inmersión en caliente) y **DG** (galvalume, 55% de Al, 43.4% de Zn) se observaron puntos de herrumbre, puntos negros y picaduras profundas.

3.2.6. En los bordes de las probetas **AG** y **DG** se observó corrosión a partir de los bordes de hasta 4mm de extensión. En las probetas **DG** la herrumbre de los bordes es más densa y porosa.

3.2.7. En las muestras **AG** y **DG** no sólo hay 100% de herrumbre en la incisión sino que hay corrosión a partir de la incisión de hasta 4mm.

3.2.8. En la cara de las probetas **BG** (metalizadas con aluminio más sellador vinílico) y **CG** (metalizadas con aleación 85% de Zn, 15% de Al, sin sellador) se observan puntos negros y de herrumbre, con menor cantidad en las muestras **CG**.

Probeta	Pérdida de masa (g)		Velocidad de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	
	1 año	2 años	1 año	2 años
1G	0.8424	1.487	3.88	3.38
5G	0.3848	0.7211	1.83	1.72
DG	0.4177	0.8994	2.99	3.16

Tabla 2: Resultados de las pérdidas de masa y las velocidades de corrosión, obtenidas por el método gravimétrico, correspondientes a 12 y 24 meses de exposición.

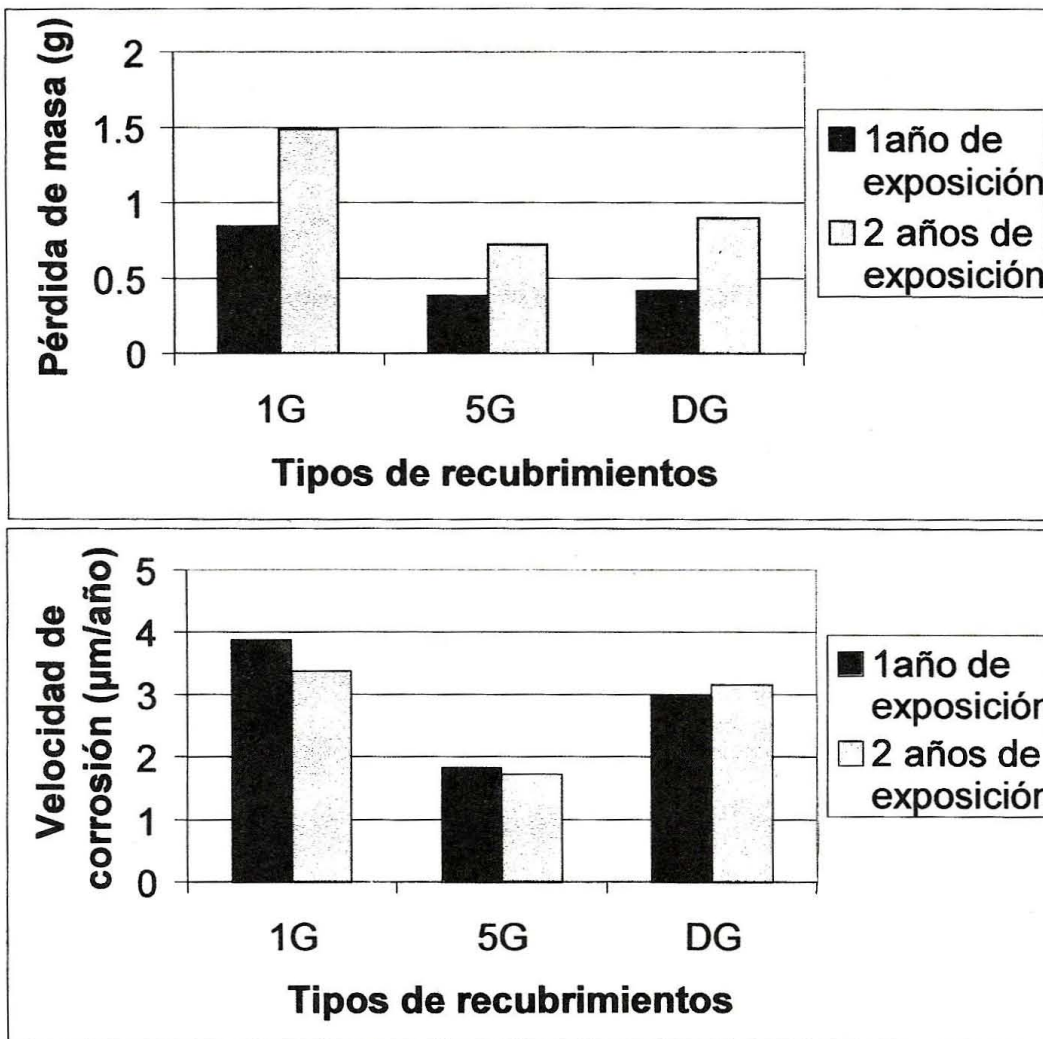


Figura 1: Representación gráfica de la Tabla #2, Resultados de las pérdidas de masa y las velocidades de corrosión, obtenidas por el método gravimétrico, correspondientes a 12 y 24 meses de exposición.

3.2.9. Los bordes de las probetas BG y CG se encuentran en buen estado .

3.2.10. En la incisión de las probetas BG y CG se observó 100% de herrumbre en la incisión, pero sólo dentro de la incisión o sea que no hay corrosión a partir de la incisión.

4. Conclusiones

4.1. El recubrimiento que mostró menor resistencia al medio, sin lugar a dudas fue el electrocincado (3G) que ya a los seis meses mostró severos indicios de corrosión y finalmente las retiramos a los 30 meses de exposición, es decir antes de finalizar el período total de evaluación.

Esto podría explicarse por su espesor que es mucho menor ($6\mu\text{m}$) en relación con el resto de los recubrimientos y también por la ausencia de compuestos intermetálicos entre la capa de zinc y el acero base.

4.2. Tomando en consideración las evaluaciones físicas periódicas (cara, bordes e incisión) y las velocidades de corrosión, las probetas recubiertas con zinc y sus aleaciones que han presentado mejor resistencia al medio (Colón) luego de 24 meses de exposición han sido la 5G y la 1G .

4.3. A pesar de que las probetas 2G no han sido incluídas en el ordenamiento anterior porque tienen un sellador verde-amarillo, es importante señalar que desde el punto de vista de las evaluaciones físicas y las mediciones electroquímicas su comportamiento ha sido muy bueno.

4.4. En cuánto a las muestras recubiertas con aluminio y sus aleaciones, tomando en consideración las evaluaciones físicas (cara, borde e incisión) las que presentaron mejor resistencia al medio fueron las probetas BG (metalizado con aluminio y sellador vinílico)

seguidas de las CG (metalizado con aleación Al/Zn, sin sellador).

4.5. De este mismo grupo las que se vieron más afectadas por la acción de la atmósfera fueron las del tipo AG (aluminizado, aluminio aplicado por inmersión en caliente).

4.6. En cuanto a las probetas DG (galvalume, 55% Al, 43.4% Zn) es importante señalar que las evaluaciones físicas reportan corrosión en bordes, corrosión a partir de la incisión y presencia de picaduras en la cara, sin embargo las velocidades de corrosión correspondientes al primer y segundo año de exposición son relativamente bajas, ya que para este cálculo se toma en consideración la pérdida efectiva de masa y no la penetración de las picaduras.

5. Bibliografía

- [1] G.Salas D., H.D.García S., *Recubrimientos metálicos- Guía práctica de la corrosión* CYTED 2. RICORR 1993.
- [2] R. Winston Revie, *Uhlig's Corrosion Handbook*, Second Edition, Electrochemical Society Series, Wiley-Interscience, 2000.
- [3] Red Temática XV.D "PATINA" (Protección anticorrosiva de metales en la atmósfera) *Documento PATINA G3-1, marzo de 1996-*
- [4] Red Temática XV.D "PATINA" (Protección anticorrosiva de metales en la atmósfera) *Documento PATINA G4-1, marzo de 1996-*
- [5] Lilibeth De Gracia de Araque, Mariela S. de Villalaz y colaboradores, " *Estudio metalográfico de las probetas con incisión*". *Red temática*

- "PATINA", CYTED. Conferencia presentada en el V Congreso de SENACYT, agosto de 1999.*
- [6] ISO 4542/81- *Metallic and other non organic coating. General rules of stationary outdoor exposure test.*
- [7] Proyecto Patina- Recubrimientos base zinc. *Informe de evaluación correspondiente a 24 meses de exposición. Estación: Colón, abril 1998.*
- [8] Proyecto Patina- Recubrimientos base aluminio. *Informe de evaluación correspondiente a 24 meses de exposición. Estación: Colón, abril 1998.*
- [9] Lilibeth De Gracia de Araque, Mariela S. de Villalaz y colaboradores, *"Comportamiento de los recubrimientos de zinc, aluminio y sus aleaciones expuestos durante tres (3) años en un ambiente marino". Red Temática "PATINA", CYTED. Conferencia presentada en el V Congreso de SENACYT, agosto de 1999.*
- [10] ISO/DIS 9225 *"Corrosion of metals and alloys- Agressivity of atmospheres-Methods of measurement of pollution data".*
- [11] ISO / DIS 8407 *"Metals and alloys- Procedures for removal of corrosion products from corrosion test specimens".*
- [12] ISO 9226/92- *"Corrosion of metals and alloys- Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for evaluation of corrosivity".*
- [13] Agnes Fóti de Bósquez, Lilibeth de Araque, Mariela de Villalaz. *"Eficiencia de los recubrimientos anticorrosivos de zinc, aluminio y sus aleaciones sobre láminas de acero de bajo contenido de carbono". Conferencia presentada en el Congreso IV de SENACYT, septiembre 1998.*
- [14] Agnes Fóti de Bósquez, Lilibeth de Araque, Mariela de Villalaz: *"Estudio de recubrimientos de Zn, Al y sus aleaciones aplicados sobre matrices de acero". Conferencia presentada en Latincorr'2000.*

ESTUDIO DE CERAMICAS FERROELECTRICAS DE LA FAMILIA AURIVILLIUS: $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9 - \text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$

E. Ching Prado
Facultad de Ciencias y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá
e-mail: eching@keops.utp.ac.pa

RESUMEN

Muestras en polvo y películas delgadas del ferroeléctrico $(\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9)_x(\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9)_{1-x}$, para $x= 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ y 1 , fueron preparadas por método estándar de calcinación y por el método de deposición por solución metal-orgánica, respectivamente. Las películas delgadas fueron depositadas sobre sustrato de $\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. El estudio por Espectroscopía Micro-Raman revela que las muestras son homogéneas y presentan bandas alrededor de $174, 229, 337, 522, 608, 677$ y 839 cm^{-1} , lo cual indica la formación de la fase Aurivillius en el material; aunque diferencias relacionadas al grado de cristalización fueron encontradas entre las muestras en polvo y su equivalente en película delgada. Además, se presenta y discute la evolución de las bandas Raman con la inclusión del material SBT en la estructura del BTN. En adición, otras técnicas analíticas como Microscopía de Fuerza Atómica (AFM), Difracción de Rayos X (XRD) y Medición Eléctrica fueron también usadas para caracterizar las muestras y sus resultados son discutidos.

Palabras Claves: Ferroeléctricos, fases Aurivillius, $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$, modos vibracionales, Espectroscopía Raman Difracción de Rayos X.

ABSTRACT

Powder (Bulk) and Thin films of Ferroelectric $(\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9)_x(\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9)_{1-x}$ layered structure were prepared for $x= 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$, and 1.0 using standard calcination process and metal organic solution method, respectively. The thin films were deposited on $\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ substrates. The Raman spectroscopy reveals that the samples are homogeneous with bands around $174, 229, 337, 522, 608, 677$ y 839 cm^{-1} . This result indicates the Aurivillius phase formation in both groups of samples. However, some differences in the crystallization degree were found between the bulk and thin films. The evolution of the Raman bands with inclusion of SBT material in the BTN structure are presented and discussed. Also, others analytical technique, such as X-Ray Diffraction (XRD), Atomic Force Microscopy (AFM), and Electrical Measurements, were used for characterize the samples and the results are presented and discussed.

Key Words: Ferroelectrics, Aurivillius phases, $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$, Raman spectroscopy, vibrational modes, and X-ray diffraction.

1. Introducción

Materiales ferroeléctricos con capa de bismuto y fórmula general $\text{Bi}_2\text{A}_{m-1}\text{B}_m\text{O}_{3m+3}$ con m entero positivo, $\text{A} = \text{Na, K, Ba, Sr}$ y Bi , y $\text{B} = \text{Fe, Ti, W, Nb}$, conocidos como familia Aurivillius, son actualmente de mucho interés debido a la posibilidad de las distintas aplicaciones tecnológicas, tales como memorias no volátiles y sensores, entre otras [1,2,3]. Los materiales $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) y $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ (BTN) son dos de estos ferroeléctricos con $m= 2$ y estructura cristalina

ortorrómbica a temperatura ambiente, con ligeras diferencias entre los ejes a y b , o una pequeña distorsión de la simetría tetragonal [4].

En particular, SBT es un miembro de esta familia que ha recibido especial atención, por tres razones primarias: exhibe fatiga despreciable, presenta baja corriente de fuga y puede ser preparado en capas muy delgadas sin perder sus características. Sin embargo, en el caso de memorias no volátiles el material no ha podido ser explotado, entre otras cosas, por

problemas relacionados con alta temperatura de procesamiento, baja polarización remanente y baja temperatura de Curie [5].

En este artículo presentamos los resultados de estudios experimentales de modos vibracionales de polvo y películas delgadas de SBT, BTN y una mezcla estequiométrica de SBT y BTN, a través de espectroscopia Raman. También otras técnicas de caracterización, como Difracción de rayos X (XRD), Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y Medición Eléctrica son utilizadas y sus resultados son discutidos.

2. Parte Experimental

Películas delgadas de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$, con $X=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ y 1.0 , son preparadas por un modificado método de deposición por solución metalorgánica. Los solventes utilizados son ácido 2-etilhexanoico, 2-metoxietanol y ácido acético; mientras los precursores usados son 2-etilhexanoato de bismuto, isopropóxido de titanio, acetato de estroncio y etóxidos de tantalio y de niobio. El sustrato utilizado es $\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ y las películas tienen espesor de $0.25\mu\text{m}$.

Además, fueron preparadas muestras en polvo, con estequiometrías iguales a las películas delgadas, por método estándar de calcinación y los precursores utilizados fueron SrCO_3 , Bi_2O_3 , Ta_2O_5 y Nb_2O_5 . Los detalles del procedimiento pueden encontrarse en la referencia [5,6].

3. Resultados y Discusión

3.1. Muestras en Polvo

La figura 1 presenta los patrones de difracción de rayos X de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$ para $x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ y 1.0 . Estos patrones o difractogramas muestran picos, correspondientes a diferentes planos cristalinos, de la simetría ortorrómbica;

además se observan corrimientos de los picos, cuando x cambia de 0.0 a 1.0 , producto de la distorsión gradual de la celda unitaria cuando la sustitución atómica toma lugar en la solución sólida. Un análisis detallado de las medidas de rayos x indican que los picos se ensanchan cuando x cambia de 0.0 hasta 0.6 y luego va disminuyendo el ensanchamiento para valores de x de 0.6 a 1.0 . Este ensanchamiento de los picos debe estar asociado con el desorden en los sitios **A** y **B** debido a la introducción de los diferentes iones por la solución sólida.

Ajustando los difractogramas mediante programas de computadora se obtuvieron los parámetros de red cristalina de cada una de las muestras. La figura 2 presenta la evolución de los parámetros de red con la estequiometría, en donde **a** y **b** incrementan cuando aumenta la inclusión de SBT en BTN; sin embargo dos comportamientos diferentes parecen ser observados en la figura 2. Esto es confirmado por la evolución del parámetro de red **c**, donde se observa que para $x=0.0$ hasta $x=0.4$ se obtiene una línea recta con pendiente positiva y para $x=0.6$ a 1.0 el comportamiento es lineal con pendiente negativa.

Las expresiones que mejor representan estas dos regiones son:

$$\begin{aligned} c(\text{\AA}) &= 0.2350 \cdot x + 24.9467 && \text{para } 0.0 \leq x \leq 0.4. \\ c(\text{\AA}) &= -0.3150 \cdot x + 25.2320 && \text{para } 0.6 \leq x \leq 1.0. \end{aligned}$$

Donde x está en moles. Este resultado está relacionado al cambio de estructura de la matriz cuando x aumenta; es decir que la línea con pendiente positiva corresponde a la región donde la estructura tiene las características de BTN, mientras la línea con pendiente negativa se refiere a las características de SBT.

La figura 3 muestra los espectros Raman de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$ para $x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ y 1.0 . A fin de determinar la frecuencia y el ancho de cada una de las bandas, fue utilizado

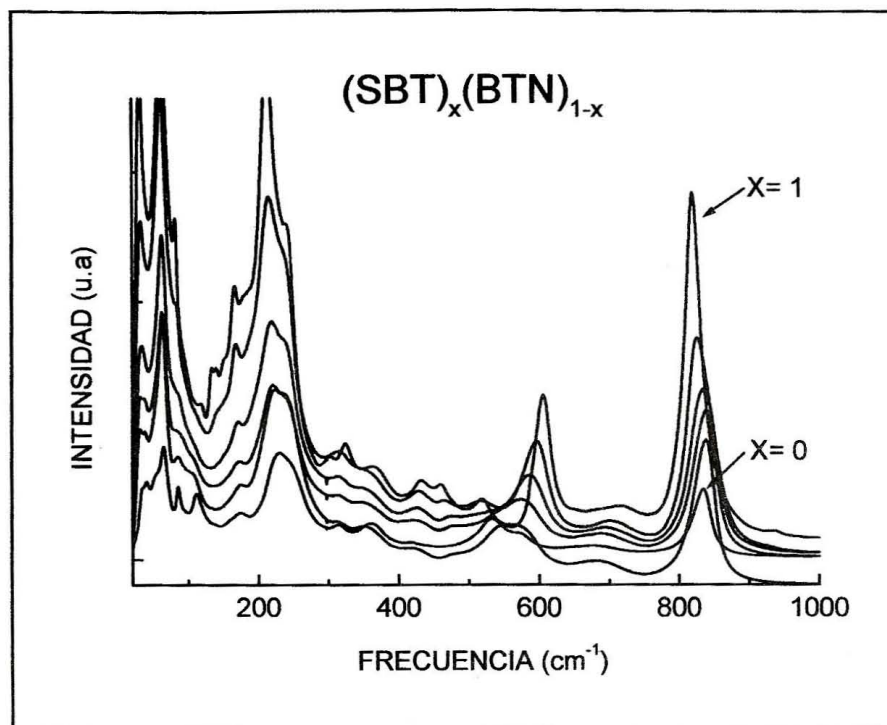


Figura 3: Espectros Raman de muestras de polvo de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$.

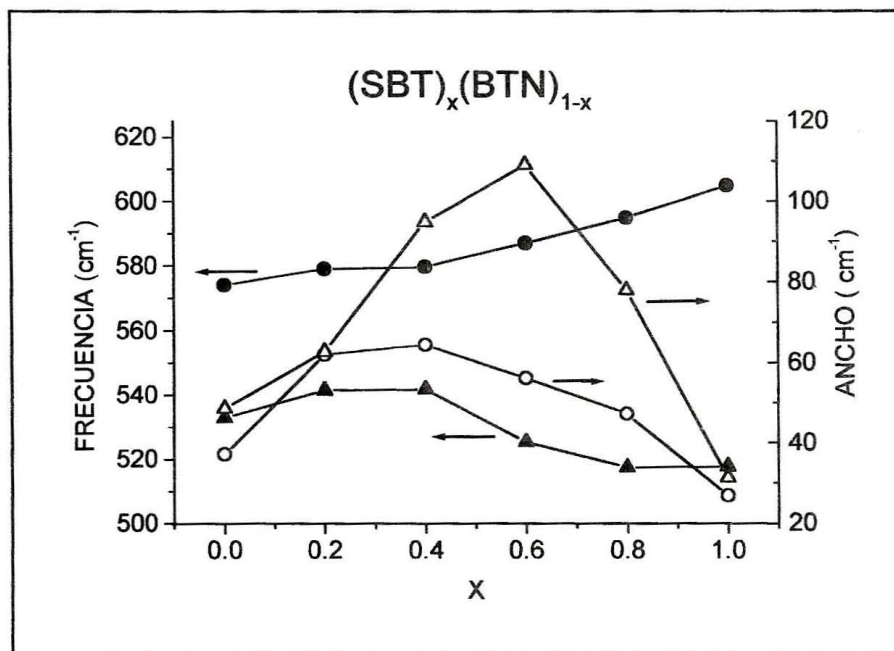


Figura 4: Evolución de la frecuencia y el ancho de las bandas Raman con la estequiometría en muestras en polvo de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$.

un modelo de oscilador armónico amortiguado.

La banda en 839 cm^{-1} en BTN ó 818 cm^{-1} en SBT es un modo A_{1g} de la simetría tetragonal y corresponde a una vibración simétrica B-O (*stretching*) del octaedro BO_6 . La banda en 229 cm^{-1} en BTN ó 212 cm^{-1} en SBT es también asignada a otro modo A_{1g} , relacionado a vibración del ión B en el eje-z. Similar vibración es atribuida a la banda en 174 cm^{-1} pero en el eje x(y) de la simetría tetragonal [4,6,7].

La banda en 65 cm^{-1} para BTN decrece suavemente hasta 60 cm^{-1} para SBT y está asociada con la vibración de los iones Bi en la dirección z (A_{1g}) de la capa $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$. En forma similar, las bandas en 87 y 112 cm^{-1} parecen estar relacionadas a movimientos de los iones Bi en el eje x(y) en la capa de óxido de bismuto [3].

Los espectros Raman también evidencian la presencia de dos características en la estructura de la matriz, mostrado en la figura 4, como ha sido observado en las mediciones de rayos X. El ancho de las bandas del espectro Raman incrementa para las muestras que van desde $x=0.0$ hasta $x=0.4-0.6$ y luego va decreciendo hasta $x=1.0$. El aumento del ancho de las bandas corresponde al incremento en defectos, el cual está asociado con la diferencia de masa entre los iones Sr y Bi en los sitios A y los iones Ta, Ti y Nb en los sitios B.

El ancho de banda de un espectro Raman en un cristal, está relacionado con la vida media del fonón creado en el proceso Raman; así el posible mecanismo primario en un cristal perfecto es decaer el fonón óptico a través de un fonón acústico, cuyo vector de onda es de igual magnitud, pero opuesto. Sin embargo, en cristales imperfectos, como BTN, SBT y mezclas estequiométricas SBT-BTN, el fonón creado en el proceso Raman puede también

decaer a través de las fronteras de grano y de los defectos, tales como vacancia e iones diferentes ocupando el mismo sitio cristalográfico, reduciendo así la vida media del fonón y en consecuencia ensanchando las bandas Raman. De modo que, se puede esperar que los espectros Raman sean cada vez más anchas las bandas si se incrementa la densidad de defectos en el material [8].

3.2. Muestras en Películas Delgadas

Los estudios de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM), realizados en un área de $1\mu \times 1\mu$, indican que las muestras de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$, para $x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ y 1.0 , presentan una significativa variación del tamaño promedio de grano con la estequiometría. El grano aumenta de 140 nm para $x=0.2$ hasta 211 nm para $x=0.8$ y luego decrece ligeramente a 182 nm para $x=1$. Este resultado es opuesto al reportado en las muestras en polvo preparadas por métodos estándares de calcinación, donde el tamaño promedio de grano va decreciendo para las muestras que van de $x=0.2$ a $x=0.8$. Esto sugiere que existe en las películas delgadas una fuerte dependencia del tamaño de grano con el tipo de sustrato y/o el método de preparación. Además, las imágenes (no presentadas aquí) muestran un material libre de defectos y sin evidencias de rajaduras.

La figura 5 presenta el típico patrón de difracción de rayos X de las muestras, donde se revela que las películas son de naturaleza policristalina y sin orientación preferencial. Una comparación del parámetro de red c , entre las muestras en polvo y las películas delgadas, indica un comportamiento similar; sin embargo el valor de c de las películas es menor. Los análisis de rayos X de las películas delgadas muestran también la transición de estructura observada entre $x=0.4$ y $x=0.6$ en las muestras en polvo, la cual es apoyada por los resultados de la medición de polarización

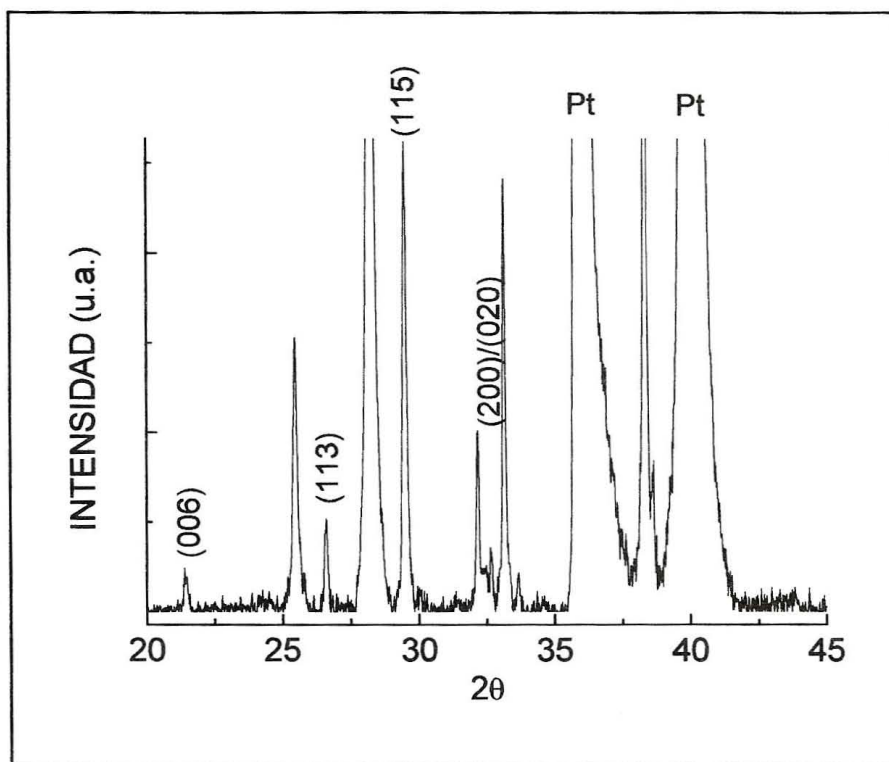


Figura 5: Patrón típico de difracción de rayos X encontrado en las películas delgadas de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$.

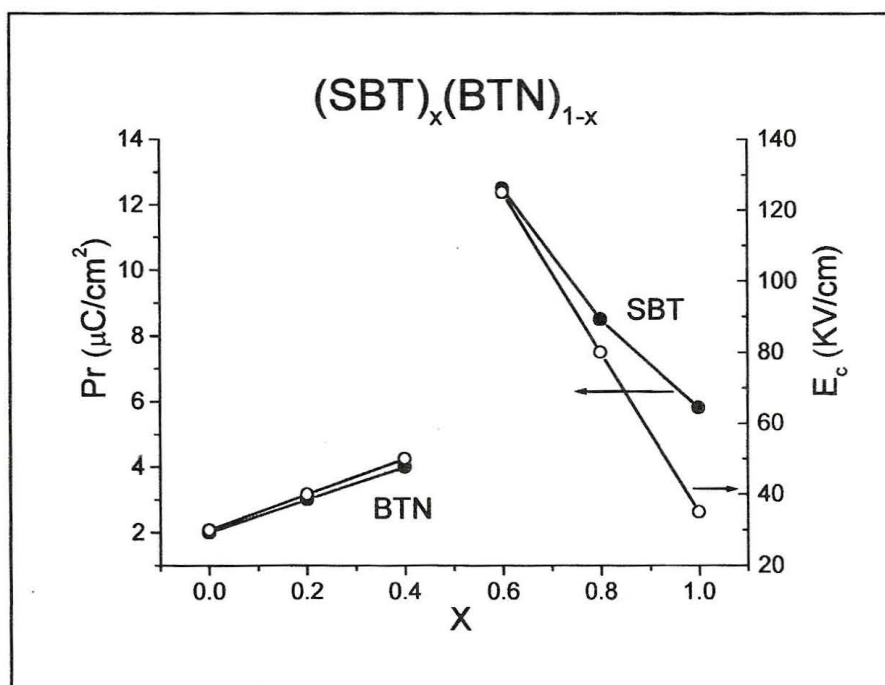


Figura 6: Evolución de la polarización remanente (P_r) y el campo coercitivo (E_c) con la estequiometría en películas delgadas de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$.

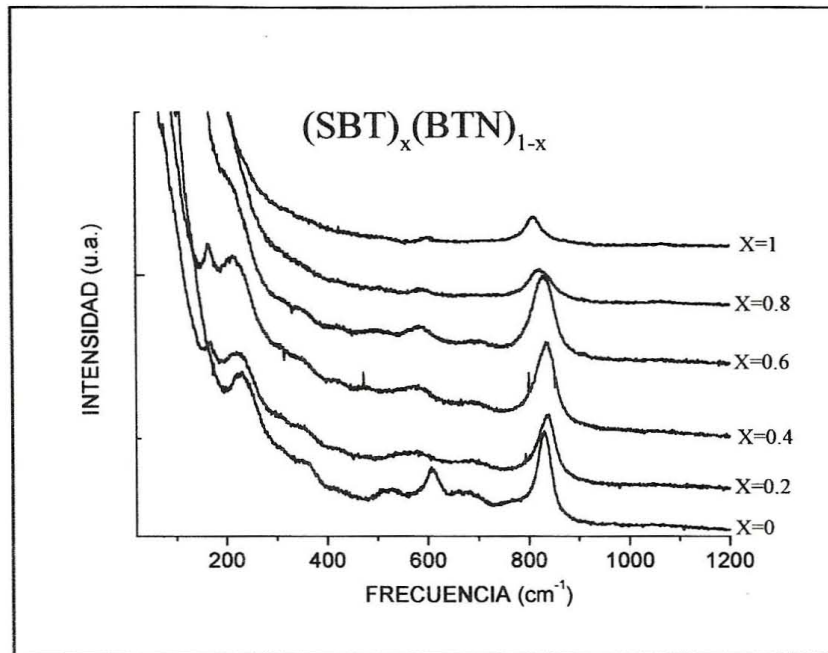


Figura 7: Espectros Raman de películas delgadas de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$.

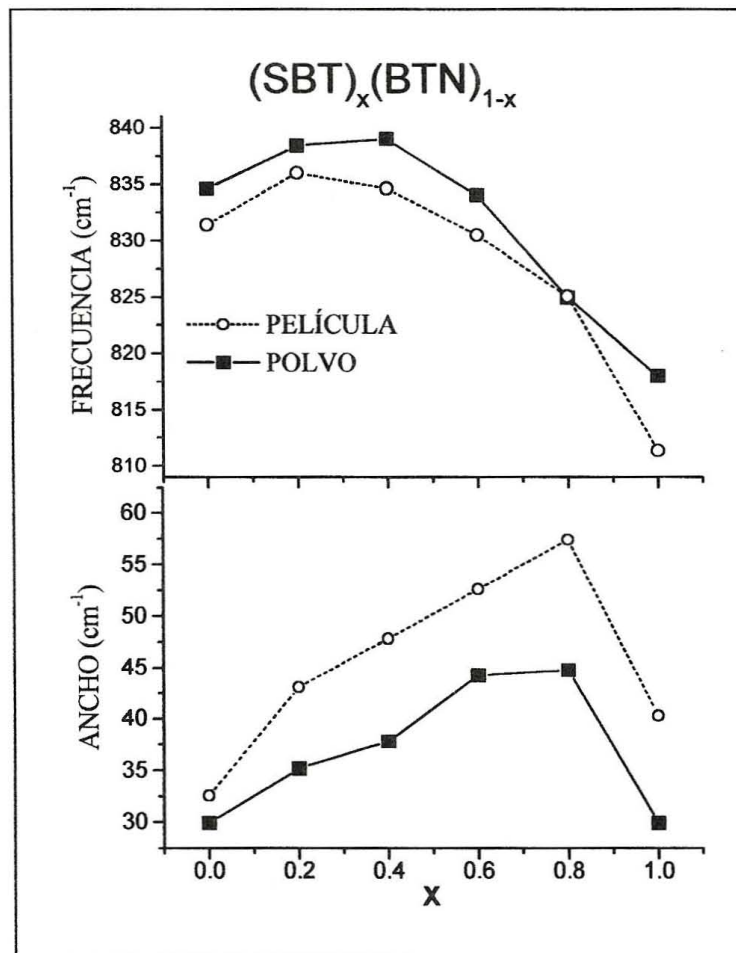


Figura 8: Evolución de la frecuencia y el ancho, de la banda Raman alrededor 832 cm^{-1} , con la estequiometría en películas delgadas y muestras en polvo de $(\text{SBT})_x(\text{BTN})_{1-x}$.

remanente (Pr) y campo coercitivo (Ec) en función de la estequiometría, figura 6. Aquí se observa una dependencia lineal con pendiente positiva para la región con características de BTN y en la región con características de SBT la relación también es lineal, pero con pendiente negativa. Las expresiones que mejor representan estas regiones son las siguientes:

$$Pr(\mu C/cm^2) = 5.0 * x + 2.0 \quad ; \quad Ec(KV/cm) = 5.0 * x + 30.0 \\ \text{para } 0 \leq x \leq 0.4$$

$$Pr(\mu C/cm^2) = -16.8 * x + 22.3 \quad ; \quad Ec(KV/cm) = -225.0 * x + 260.0 \\ \text{para } 0.6 \leq x \leq 1.$$

Donde x está en moles.

La figura 7 presenta el espectro Raman de cada una de las muestras a temperatura ambiente y las bandas encontradas son 170, 232, 337, 522, 608, 677 y 832 cm^{-1} . Desafortunadamente, la intensa señal Rayleigh hace difícil observar las bandas que se encuentran con frecuencias menores de 150 cm^{-1} , en todas las películas delgadas. Una comparación de estos espectros y los correspondientes en las muestras en polvo indica claramente la formación del material deseado. Además, un estudio topográfico revela que las muestras son homogéneas.

La figura 8 muestra la evolución de la banda en 832 cm^{-1} con la estequiometría, entre las películas delgadas y las muestras en polvo, en donde se observa un corrimiento en la frecuencia. Además, el ancho de esta banda es mayor en las películas que en las muestras en polvo, lo cual sugiere que el grado de cristalización es mayor en las muestras en polvo que en las películas delgadas. Este resultado parece estar asociado al esfuerzo originado en la interfase película-substrato; así, el corrimiento en frecuencia de la banda en 832 cm^{-1} puede estar relacionado con diferente longitud del enlace B-O entre las muestras en polvo y las películas delgadas.

Un estudio de temperatura realizado a estas películas delgadas, desde 50K hasta 580K, revela que la mayor contribución al ancho de las bandas Raman provienen de defectos que de interacción con otros fonones (anarmonicidad).

4. Conclusión

Muestras en polvo y películas delgadas de $(SBT)_x(BTN)_{1-x}$ para $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ y 1.0 fueron estudiadas por distintas técnicas analíticas. Todos los resultados indican una completa solución sólida entre SBT y BTN, en donde cambios importantes son observados con la inclusión de SBT en BTN. Las mediciones indican una transición en la característica de la estructura a ocurrir para x alrededor de 0.4-0.6, es decir que en las muestras en polvo o las películas delgadas con x de 0.0 a 0.4 la estructura de la matriz se comporta similar a las características de BTN, mientras que las muestras con x de 0.6 a 1.0 tienen características de SBT. Los estudios muestran que las películas delgadas son homogéneas y de naturaleza policristalinas, con el tamaño de grano incrementando para $x = 0.2$ hasta $x = 0.8$, teniendo además el parámetro de red c menor que el de las muestras en polvo. Los espectros Raman indican que las muestras presentan defectos relacionados a la diferencia de masas entre Sr y Bi en los sitios A y entre Ta, Ti y Nb en los sitios B. Adicionalmente, las películas delgadas presentan otros defectos que han sido asociados con esfuerzo en la interfase película-substrato, lo que conlleva a que existan iones que se encuentran fuera de su posición de equilibrio.

5. Agradecimiento

El autor da las gracias a la UTP-Panamá y al Programa CyTED por el apoyo brindado en el V Congreso Nacional de Electrocerámica, celebrado en Barcelona, España. Además

agradece al Dr. Ram Katiyar de la Universidad de Puerto Rico y al Dr. Sesu Desu de la Universidad de Massachussets por la colaboración y discusión del trabajo.

6. Bibliografía

- [1] G.A. Smolenskii, V.A. Isupov y A.I. Agranovskaya, "Ferroelectrics of the Oxygen-Octahedral Type with Layered Structure", *Soviet Physics-Solid State*, **3**, 651 (1961).
- [2] K. Amanuma, T. Hase, e Y. Miyasaka, "Structural and Ferroelectric Properties of SBT Thin Films", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **361**, 21 (1995).
- [3] S. Kojima, R. Imaizumi, S. Hamazaki, y M. Takashige, "Raman Scattering Study of Bismuth Layer Structure Ferroelectric", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 5559 (1994).
- [4] P.R. Graves, G. Hua, S. Myhra, y J.G. Thompson, "The Raman Modes of the Aurivillius Phases: Temperature and Polarization Dependence", *J. Solid State Chem.*, **114**, 112 (1995).
- [5] X. Zhang, P. Gu, y S. B. Desu, "Solid Solution in the SBT-BTN System", *Phys. Stat. Sol. (a)*, **160**, 35 (1997).
- [6] W. Pérez , E.Ching-Prado, A. Reynes-Figueroa, R.S. Katiyar, S. Tirumala y S. B. Desu, " Micro-Raman Study of SBT-BTN Thin Films", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **541**, 247 (1999).
- [7] E.Ching-Prado, W. Pérez, A. Reynes-Figueroa, R.S. Katiyar, D. Ravichandran, and A.S. Bhalla, "Raman Study of SBT Thin Films", *Ferroelectr. Lett.*, **25**, 97 (1999).
- [8] W. Pérez , E.Ching-Prado, A. Reynes-Figueroa, R.S. Katiyar, S. Tirumala y S. B. Desu, "Raman Scattering in the Aurivillius-Layered Ferroelectric SBT-BTN Thin Films", *Integr. Ferroelectr.*, **29**, 33 (2000).

ALTERNATIVA PARA LOS PRODUCTORES DE ACHIOTE, MAQUINA DESGRANADORA MANUAL

R.L. ALMANZA y A.B. SATURNO

CENTRO DE PRODUCCION E INVESTIGACIONES AGROINDUSTRIALES
(CE.P.I.A) UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PANAMA

RESUMEN

Se estudió el desarrollo del cultivo para el manejo de la producción y comercialización del achiote (*Bixa Orellana L.*), ya que Panamá tiene las condiciones climatológicas adecuadas y presenta una gran demanda por la prohibición de los colorantes sintéticos en los países consumidores; luego de haber analizado que el costo de producción del achiote no es competitivo internacionalmente y que además hay una falta de tecnología apropiada se confeccionó un molino manual con el propósito de apoyar al productor de este cultivo, para que pueda obtener un mejor producto. La máquina desgranadora arrojó una eficiencia de 83.13 %, lo que representa 10.37 libras de semilla y 1.0 libras de impureza en una operación de 69 minutos, lo que indica un tiempo promedio de 23 minutos por saco.

Palabras clave: achiote, máquina desgranadora

ABSTRACT

The production and commercialization of achiote (*Bixa Orellana L.*) is discussed. Panama has adequate climatological conditions for achiote. It presents a great demand due to the prohibition of synthetic coloring matters in the consuming countries. The production cost of achiote is not internationally competitive and there is a lack of appropriated technology. Thus, a manual mill machine was made with the purpose to help the farmer and obtain a better product. The threshing machine yields an efficiency of 83.13%, wich represents 10.37 pound of seed and 1.0 pound of impurity in an operation of 69 minutes, which indicates an average time of 23 minutes per bag.

Keywords: achiote, windmill machine

1. Introducción

Existe en la actualidad, una gran demanda por los colorantes naturales, a raíz de una prohibición de colorantes artificiales, ya que éstos podrán ser causantes de enfermedades.

Paralelo a esto, nuestro país adelanta políticas tendientes a incrementar la exportación de productos no tradicionales; sumado a esto la globalización del mercado, obligan al productor a buscar la eficiencia en los costos de producción.

Uno de los productos llamados a llenar las expectativas, es el cultivo de achiote (*BIXA ORELLANA L.*), en la Agroindustria Nacional y sus múltiples usos en la Industrias Alimenticias, Medicina y en la Cosmetología. Además, Panamá cuenta con el clima y suelos adecuados para este cultivo.

Este proyecto contribuirá al desarrollo de una máquina manual de material sólido (metal), el cual será puesto en contacto con el productor del cultivo a través del Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (CE.P.I.A.) de la Universidad Tecnológica de Panamá. Además, el presente estudio se diseñó para:

a) Dotar al pequeño productor de una Tecnología que le permita reducir los costos de producción.

b) Instruir a los pequeños y medianos productores sobre las nuevas tecnologías para obtener un mejor producto.

2. Consideraciones del Achiote

El achiote (*Bixa Orellana L.*) es un colorante natural utilizado desde hace muchos años para muy diversos propósitos.

Comercialmente se le ha utilizado para la coloración de productos alimenticios, en países más desarrollados se utilizan mayormente en la industria de los cosméticos, farmacéuticos, alimentación de aves de corral, textiles, colorantes de queso y mantequillas. [1]

En la actualidad el mercado nacional del achiote se encuentra en una etapa incipiente, debido a que no se cuenta con un gran número de empresas que se dediquen a la transformación del producto.

Actualmente la demanda por el achiote se esta incrementando en el mercado internacional, debido principalmente a una prohibición en los países industrializados a utilizar colorantes sintéticos, ya que se presumen son perjudiciales para la salud. [1]

La demanda internacional esta conformado principalmente por: Japón, Estados Unidos (E.E.U.U.), Puerto Rico, Alemania, Francia, Inglaterra, Isla de Cabo Verde, Isla Vírgenes, Curazao.

Se estima que el Mercado Mundial absorbe más de 3000 toneladas por año, teniendo en cuenta que el achiote debe contener 2.5% de bixina como mínimo.

En nuestro país, en los últimos años ha surgido gran interés por este cultivo, tanto es así que en ausencia de información técnico disponible,

el Instituto Panameño y Comercio Exterior (I.P.C.E), el Ministerio de Desarrollo Agropecuario (M.I.D.A.), con la colaboración del Instituto Interamericano de Cooperación por la Agricultura (I.I.C.A.) suman esfuerzos para orientar, capacitar al productor panameño con la intención de incrementar este cultivo, satisfacer el mercado local así como también todo lo relacionado con la exportación.

La información relacionada con los costos de producción para los distintos años de producción, ha sido obtenido en el Ministerio de Desarrollo Agropecuario a través de la Dirección de Agroindustria como se puede observar en el siguiente cuadro No.1 . [2]

AÑO	RENDIMIENTO qq/ha	PRECIO Bf.qq	INGRESO POR VENTA	COSTO DE PRODUCCIÓN
1				841.75
2				292.00
3	29.32	45.00	405.00	401.50
4	47.65	45.00	1319.00	489.00
5	59.93	45.00	2144.25	590.00
6	59.93	45.00	2696.85	663.50
7	59.93	45.00	2696.85	663.50
8	59.93	45.00	2696.85	663.50
9	59.93	45.00	2696.85	663.50
10	59.93	45.00	2696.85	663.50
11	59.93	45.00	2696.85	663.50
12	59.93	45.00	2696.85	663.50
13	59.93	45.00	2696.85	663.50
14	59.93	45.00	2696.85	663.50
15	59.93	45.00	2696.85	663.50

Cuadro 1: Costo de producción del Achiote.

El cultivo confines comerciales, debe preferirse los suelos fértiles con buenas materias orgánicas. El achiote se propaga por semilla, las que deben seleccionarse de plantas madres sanas y frutas que no sean atacadas por enfermedades virosas o fungosas, el trasplante debe realizarse a la entrada del invierno, de manera tal, que la planta aproveche los meses de lluvia y puedan alcanzar un buen desarrollo, durante el primer mes de vida de la planta que comprenden desde la germinación y los 30 días siguientes del desarrollo vegetativo son fundamentalmente para la futura vida de árbol, ya que si no recibe los nutrientes necesarios que demanda su rápido crecimiento, esto influirá en su vida productiva, así como en su defensa contra las enfermedades.

La planta de achiote a pesar que se encuentra cultivada en una variedad de climas desde el nivel de mar hasta los 1360 m sobre el nivel del mar por lo general se desarrolla sin mayores problemas en actitudes no mayores a los 800 m sobre el nivel del mar con temperatura que fluctúan entre los 25°C y 30°C, y con humedades atmosféricas igualmente elevadas. [3]

Las primeras cosechas se da entre los 18 y 24 meses. Es más rápida en zona costeras. Y a los cuatros años se obtienen ya abundantes cosechas.

Una buena producción, calculada en peso de semillas seca, esta los 1500 a 2000 kilogramos por hectáreas (33 a 44 qq). Las cápsulas se cosechan cuando están duras al apretarlas, cortando los racimos con todo y rama, usando un cuchillo o tijera de podar. Los racimos se colecta en sacos y se llevan a procesar.

El primer paso después de cosechar las cápsulas consisten en extenderlas sobre lonas o piso limpios y secos para que se sequen al sol, hay que protegerlas de las lluvias y el rocío, cuando empiezan a abrirse las bayas después de dos y tres días expuestas al sol estarán listas para el desgrane. El desgrane de las cápsulas constituyen uno de los principales problemas que confronta el productor, el cual consiste en colocar las cápsulas en sacos, los que se golpean después para liberar las semillas, tarea que es agotadora, obteniéndose un rendimiento estimado de semilla limpia de 110 a 120 libras por día.

Esta problemática ha sido resuelta al utilizar un Desgranador de Achiote, el cual facilita el desgrane, logrando un mejor aprovechamiento del achiote, por la cual se presenta en la Figura 1.

3. Materiales y Métodos

La Investigación tuvo una duración de cuatro meses (septiembre-diciembre de 1992), realizándose en el Centro de Producción e

Investigaciones Agroindustriales (CE.P.I.A.) de la Universidad Tecnológica de Panamá.

Se efectuaron entrevistas de los actuales productores del cultivo de achiote para conocer los problemas y necesidades, posteriormente se visitaron las empresas que se dedican al procesamiento, así como también se conocieron sus métodos y equipos utilizados.

Además se utilizó la información disponible existente del producto y que nos permitió realizar un contraste entre los diferentes métodos de cultivos y procesamientos del achiote en países como Nicaragua, Costa Rica, Jamaica, entre otros; países que están a la vanguardia en esta actividad [3]. Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante cuadros de distribución de frecuencias y gráficos de datos agrupados, así como de otras herramientas estadísticas manejable para la información.

También, se elaboró un esquema de diseño de la máquina propuesta como resultados de la investigación, la cual fue sometida a una demostración en el campo y se determinó la eficiencia en el desgrane manual.

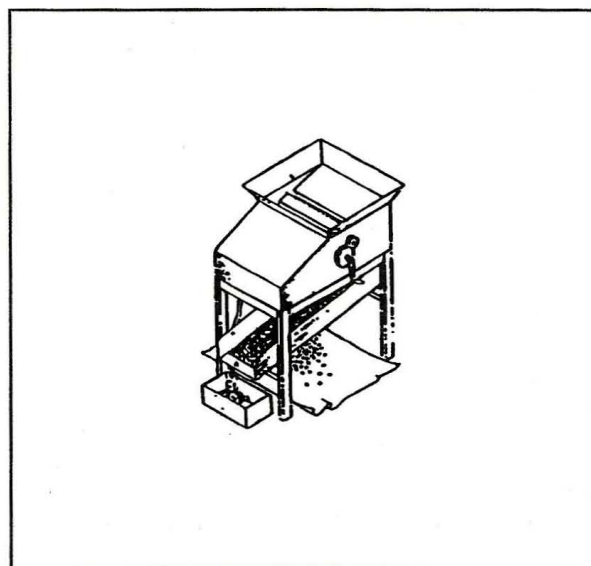


Figura 1: Desgranadora Manual de Achiote

4. Resultado y Discusión

La máquina construida íntegramente de metal galvanizado tiene un peso aproximado de 89 libras. Consta de un cilindro dentado molinero que rota, utilizando para ello una nueva manivela o brazo al ser colocado el ramo de achiote en este cilindro dentado, se tritura la cáscara que se empuja hacia la salida localizada en la parte inferior, donde un tamiz recoge la cosecha y el grano cae limpio a la lona que se encuentra debajo de la máquina. [4]

En demostración de la máquina, llevada a cabo en la población de Chepo, región Este de la provincia de Panamá; se utilizaron tres sacos de achiote de la variedad "Línea 66002", con un peso total de 32.5 libras. Como resultado se obtuvieron 8.62 y 1.75 libras en el primero y segundo pase, respectivamente. El resultado total fue de 10.37 libras lo que representa un promedio de 3.46 libras por saco.

La operación se realizó en 69 minutos (62 minutos para el primer pase y 7 minutos para el segundo), lo que representa un tiempo promedio de 23 minutos por saco.

Esta demostración de la máquina arrojó una eficiencia del 83.13%, lo cual representa 10.37 libras de semillas y 1.0 libras de impurezas (cascarillas, tallos y otros).

El método tradicional de golpear los sacos es muy agotador, obteniéndose en 75 sacos aproximadamente una cantidad de 25 libras de semilla, en una jornada de trabajo de ocho (8) horas, además de la pérdida de los sacos. En cambio, si es propulsada manualmente y utilizando la misma cantidad de 75 sacos se obtiene un aproximado de 259.5 libras de semillas, en una jornada de ocho horas; esta máquina puede ser operada por dos personas, y puede ser impulsada a motor.

La máquina tiene un costo aproximado de B/. 250.00, y su vida útil está estimada entre 7 y 10 años.

El proceso más sencillo desde el punto de vista operacional, para la obtención de la pasta de achiote es el método de agitación. En este proceso, las semillas se sumergen en agua y se agitan enérgicamente, hasta que se observe que todo el material colorante se ha desprendido de la misma, donde se recomienda el uso de agua caliente, para acelerar el desprendimiento del colorante. Con la solución turbia resultante se pone en reposo, para luego por decantación, separar la parte clara. El precipitado de consistencia pastosa se somete al secado, el cual puede realizarse por contacto directo con el aire hasta que se obtenga un producto que no sea quebradizo y a la vez pueda ser prensado.

De último se procede al moldeo del colorante en forma que se prefiera; una vez seco el colorante está listo para el mercado.

5. Conclusiones

Como resultado de las entrevistas, tanto con los productores y funcionarios del Departamento de Agroindustria, se puede establecer que existe poco y en otro caso ningún apoyo al productor de achiote para minimizar los costos de procesamiento.

Se puede indicar además que existen otros factores que limitan el desarrollo de este cultivo que permitan una real y efectiva proyección comercial de este rubro, a saber:

- (1) Ausencia de un estudio profundo, tendiente a identificar las distintas variedades de achiote con la que contamos, con el objetivo de identificar si contamos con las especies que producen los niveles de bixinas adecuados.
- (2) Otro factor que no se ha identificado es el tipo de suelo y clima más adecuado para este

cultivo, con la finalidad de orientar al productor.

(3) La productividad del cultivo se ve afectada por la ausencia de tecnología en el proceso de desgrane.

(4) Según el resultado de la máquina desgranadora manual de achiote vemos que el desarrollo de un equipo artesanal, aumentaría los rendimientos y disminuiría los costos de producción.

(5) El achiote es un cultivo de un alto potencial industrial tanto en los aspectos alimenticios, farmacéuticos, cosméticos, textiles y otras industrias.

6. Bibliografía

- [1] MADERA, Rafaela. La Industrialización del Achiote en la República Dominicana, Centro Dominicano de Promoción de Exportaciones, República Dominicana, 1988.
- [2] INSTITUTO PANAMEÑO DE COMERCIO EXTERIOR (IPCE). Producto No Tradicional de Exportación, El Achiote, 1992.
- [3] ARCE, Jorge A. Caracterización de 81 plantas del Achiote (*Bixa Orellana* L.), CATIE, Honduras y Guatemala; Propagación Vegetativa por Estaca, CATIE, Costa Rica, 1984.
- [4] SPENCER, Henry Dibujo Técnico Básico, Editorial CESCA, México, 1977.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA REPRESENTACIÓN DE ESPECIFICACIONES DE SOFTWARE ORIENTADAS A OBJETOS

Clifton E. Clunie B.
Universidad Tecnológica de Panamá
FISC- Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales

RESUMEN

El uso de la tecnología de orientación a objetos está en un proceso de expansión y está siendo utilizada en aplicaciones complejas y críticas. Como consecuencia de este comportamiento, la urgencia por la calidad se convierte en un aspecto fundamental.

Este artículo define atributos de calidad y procedimientos de evaluación de software desarrollado utilizando el paradigma de orientación a objetos, considerando las fases de especificación de requisitos y diseño. La organización y discusión de estos atributos se realiza de acuerdo a un método de evaluación de la calidad de software anteriormente propuesto.

Palabras claves : calidad de software, orientación a objetos, especificaciones orientadas a objetos, atributos de calidad de software orientado a objetos, ingeniería de software orientada a objetos

ABSTRACT

The scale of object-oriented technology has changed. Object-oriented technology use is expanding to large complex-critical applications being built by teams of developers with diverse skills. The urgency for quality assurance is heightened.

This work define quality attributes and evaluation processes for object-oriented software development considering the requeriments and design phases. The attributes organization and discussion are fulfilled according to a software quality evaluation method previously proposed.

Keywords: software quality, object oriented, object oriented specifications, quality attributes for object oriented software, object oriented software engineering.

1. Introducción

La Ingeniería del Software está realizando grandes esfuerzos, con el objetivo de ofrecer nuevas técnicas y métodos de desarrollo para alcanzar mayor calidad en los productos resultantes del proceso y disminuir los costos de desarrollo y mantenimiento de los sistemas.

La baja calidad y productividad en el proceso de desarrollo del software se atribuye, principalmente, al aumento constante del tamaño y la complejidad del software, al incremento de la demanda por nuevos

productos, al carácter dinámico e iterativo a lo largo de todo el ciclo de vida, a la falta de procedimientos normalizados de evaluación de la calidad y a la falta de métodos y herramientas adecuadas para construir nuevas aplicaciones [1].

Las nuevas aplicaciones que surgen son diversas en complejidad y dominios de aplicación. Tratar de representar y modelar el comportamiento de tales aplicaciones empleando métodos y lenguajes de programación convencional, muchas veces, no es simple ni eficiente. Esto se debe, en parte, a la dificultad para abstraer a partir de

un modelo de la realidad, un modelo computacional.

Resulta evidente que el aumento de la complejidad es un acelerador paralelo para el uso del paradigma porque ofrece el mejor camino en el tratamiento de la complejidad de los sistemas [2]. Además, la tecnología basada en objetos ofrece subsidios que atienden a la naturaleza iterativa y dinámica del proceso de desarrollo.

Estas ventajas hacen que existan pocas dudas de que el paradigma de orientación a objetos será utilizado de modo generalizado para el desarrollo de pequeñas y grandes aplicaciones de software, independiente del dominio de aplicación. Prueba de esta tendencia es la aparición de propuestas de procesos de desarrollo y notaciones orientado a objetos, como es el caso del Proceso de Desarrollo Unificado [3] y el uso ya extendido de la notación UML (*Unified Modeling Language*), que se define como un “*lenguaje que permite especificar, visualizar y construir los artefactos de los sistemas de software orientado a objetos*” [4].

Este artículo está organizado en cuatro secciones. Iniciamos las secciones 2 y 3 con una discusión sobre el desarrollo de especificaciones, definiendo un proceso de construcción y evaluación de especificaciones orientadas a objetos. En la sección 4, discutimos en detalle un conjunto de atributos de calidad para evaluar la confiabilidad de la representación de especificaciones orientadas a objetos. La organización de la discusión es realizada de acuerdo a un método de evaluación de la calidad. Finalmente, en la sección 5 son presentadas las conclusiones del artículo destacando sus contribuciones.

2. Generación y Evaluación de una Especificación Orientada a Objetos

La especificación describe como el software debe responder a los requisitos del problema y constituye la base sobre la cual se realiza todo el proceso de desarrollo. La generación de una especificación completa y con calidad es esencial para el éxito del esfuerzo de desarrollo de software. Consecuentemente, el proceso de generación de la especificación involucra las etapas de levantamiento de requisitos, construcción, evaluación y corrección de la especificación (Figura 1).

En la etapa de identificación de requisitos es realizado el proceso de extraer los requisitos. Este proceso tiene por objetivo hacer explícitos los deseos, las intenciones y necesidades de los usuarios con relación al software que va ser construido. En la etapa de construcción de la especificación es realizada la formalización del conocimiento obtenido en la etapa anterior, a través de una correcta representación, organización y documentación, utilizando un método de desarrollo orientado a objetos. En esta etapa son producidos modelos conceptuales, que describen estática y dinámicamente aspectos sobre el problema. En la etapa de evaluación de la especificación es utilizado el Plan de Control de la Calidad y el Manual para Control de la Calidad de Especificaciones Orientadas a Objetos. En este manual están definidos todos los criterios que serán evaluados. A través de la utilización del *scripting language* es posible capturar, a partir de los diagramas, algunos valores cuantitativos de criterios. En la etapa de corrección de la especificación, son realizadas las modificaciones necesarias para corregir los errores identificados en la evaluación.

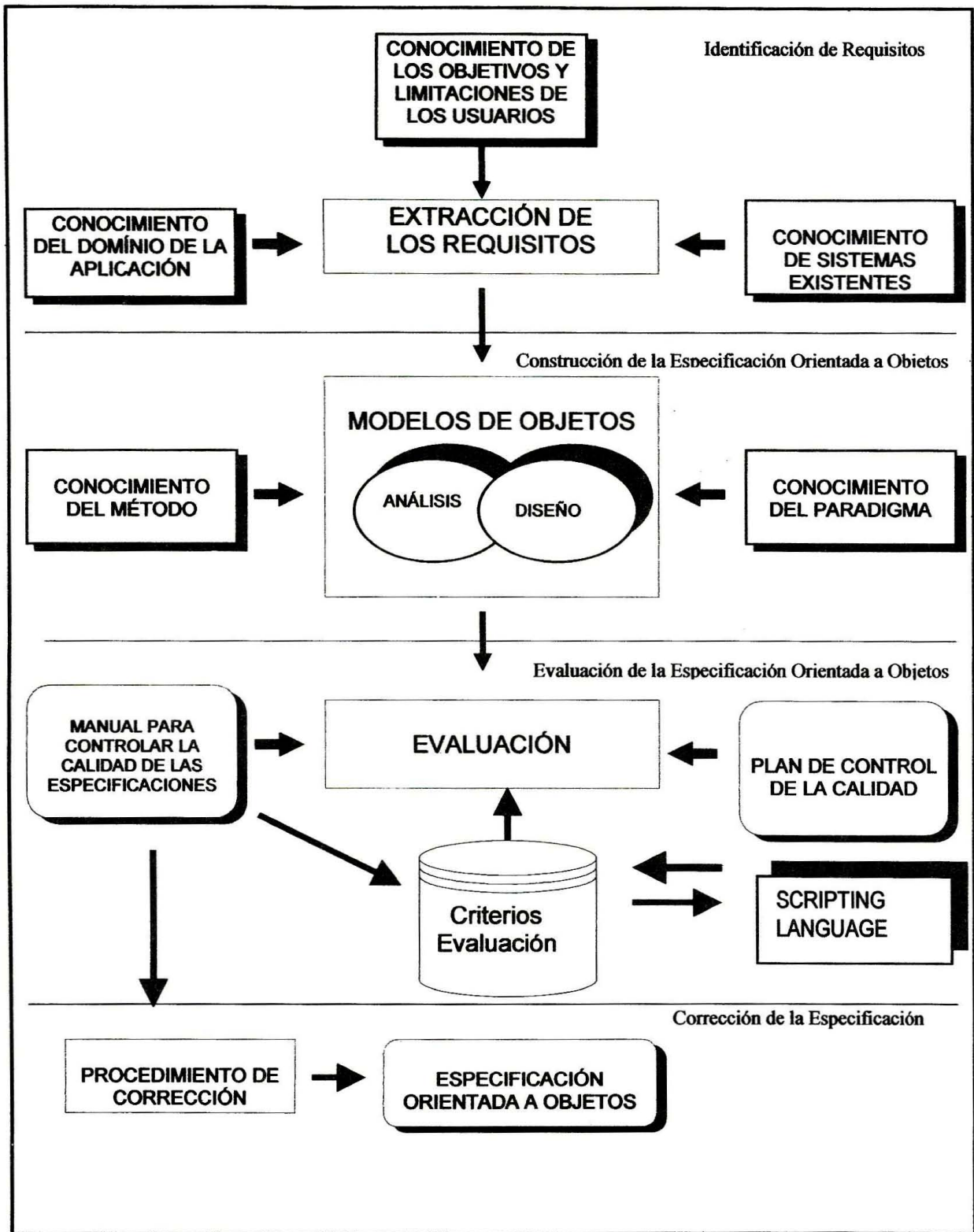


Figura 1: Proceso de Generación/Evaluación de Especificaciones Orientadas a Objetos

3. Desarrollo de Especificaciones Orientadas a Objetos

Los métodos de desarrollo orientado a objetos establecen un conjunto de actividades que deben ser realizadas en las fases de análisis y diseño. Sin embargo, la construcción de la especificación del sistema se realiza simultáneamente en diferentes dimensiones. La experiencia ha demostrado que en realidad existen algunas diferencias que pueden ser observadas en la generación de la especificación del sistema, si objetivos específicos son definidos para cada fase de desarrollo.

Basado en esto, varios aspectos pueden ser comentados con relación al desarrollo de una especificación orientada a objetos y las fases de análisis y diseño.

3.1 Con relación a los Niveles de Abstracción de las Clases

La identificación y documentación de las principales clases del dominio de la aplicación son realizadas a través de la revisión y discusión del documento de descripción del sistema (*casos de uso*) y de la interacción constante con los especialistas del dominio. Los criterios de selección de las clases, durante la fase de análisis, deben permitir identificar abstracciones que representen entidades del mundo real en el contexto del dominio del problema.

3.2 Con relación a las Jerarquía de las Clases

En la fase de análisis, son identificados las relaciones de tipo generalización – especialización con el objetivo de facilitar el entendimiento del modelo, observando las diferencias y semejanzas entre las clases formando una jerarquía. Sin embargo, en la fase de diseño, estas relaciones – *que incluye herencia simple y herencia múltiple* – son

tratadas considerando su influencia sobre las decisiones de implementación, pruebas, mantenimiento y reutilización.

3.3 Con relación a las Instancias de las Clases

Cuando especificamos una clase en el modelo de análisis, asumimos de manera natural que la clase tenga instancias múltiples. Sin embargo, en la fase de diseño, es crítico resaltar y especificar condiciones para crear y destruir instancias de una clase. En esta fase, es necesario detallar algoritmos de creación y destrucción de las clases considerando sus asociaciones.

3.4 Con relación al Nivel de Detalle de las Operaciones

En la especificación del modelo de análisis es común no especificar detalles de las operaciones en las clases. En ese instante, lo que interesa, es entender el papel que juega la clase en el contexto del dominio del problema y no invertir tiempo en detalles innecesarios relativos a una especificación detallada de sus operaciones. Las operaciones de diseño, sin embargo, deben ser especificadas en detalle, utilizando un lenguaje de diseño o un lenguaje de programación que será utilizado en la implementación.

3.5 Con relación a los Atributos en las Clases

En la fase de análisis estamos preocupados en representar, de la mejor manera posible, a través de un subconjunto de clases, el dominio de la aplicación. Los atributos identificados en esta etapa, generalmente, están incompletos y no representan propiedades de las clases relacionadas a implementación. En la fase de diseño, los atributos son adicionados para caracterizar mejor las clases e implementar las relaciones entre ellas.

3.6 Con relación al Agrupamiento de Clases

El agrupamiento de las clases, se realiza para mejorar el entendimiento del modelo, ofreciendo una organización de clases en una perspectiva superior, mostrando claramente los sub-dominios de la aplicación. En la fase de diseño, son representadas las clases de implementación, aumentando el nivel de detalle de las operaciones y especificando los atributos de implementación. El modelo crece en tamaño y cantidad de informaciones, permitiendo efectuar agrupamientos de clases de acuerdo a criterios diferentes.

4. Características de Calidad de Especificaciones Orientadas a Objetos

A pesar de que la comunidad de ingeniería del software cuenta con una propuesta de estandarización, UML (*Unified Modeling Language*) avalada por la OMG (*Object Management Group*), donde se integra lo mejor de las propuestas de métodos de desarrollo orientado a objetos, el proceso de desarrollo orientado a objetos aún no ha alcanzado su mayoría de edad.

En esta sección definimos un conjunto de atributos de calidad que deben ser considerados para evaluar especificaciones de un modo general y para el caso particular de especificaciones orientadas a objetos. Estos atributos de calidad fueron definidos tomando como referencias trabajos de calidad de especificaciones de software descritos en [5, 6, 7, 8, 9, 10], de la literatura técnica sobre calidad en orientación a objetos [11, 12, 13, 1, 14, 15] y [16, 17, 18, 2] de los métodos de desarrollo de software orientados a objetos. La organización y discusión de los atributos se realiza de acuerdo al Modelo de Evaluación de la Calidad, discutido en [19 y 20] que describimos a continuación (Figura 2):

- **Objetivos de Calidad:** son propiedades generales que el producto debe poseer;
- **Factores de Calidad del Producto:** determinan la calidad del producto desde el punto de vista de los diferentes usuarios (usuario final, mantenedor, etc.);
- **Criterios:** son atributos primitivos posibles de ser evaluados;
- **Procesos de Evaluación:** determinan el proceso y los instrumentos que serán utilizados para medir el grado de presencia, en el producto, de un determinado criterio;
- **Medidas:** indican el grado de presencia, en el producto, de un determinado criterio;
- **Medidas Agregadas:** son el resultado de la agregación de las medidas obtenidas en la evaluación de acuerdo con los criterios que cuantifican los factores;
- **Funciones Fuzzy:** relaciona y cuantifica los atributos de calidad primitivos o agregados, a través de términos lingüísticos.

Los objetivos de calidad son alcanzados a través de los factores de calidad, que pueden estar compuestos por otros factores y son evaluados a través de criterios. Los criterios definen los atributos de calidad para los factores. Medidas son valores resultantes de la evaluación de producto de acuerdo a un criterio específico. Objetivos y factores no son directamente mensurables y solo pueden ser evaluados a través de criterios. Un criterio es un atributo primitivo, o sea, un atributo independiente de todos los otros atributos. Ningún criterio aislado es una descripción completa de un factor o sub-factor determinado. Así como, ningún factor define completamente un objetivo.

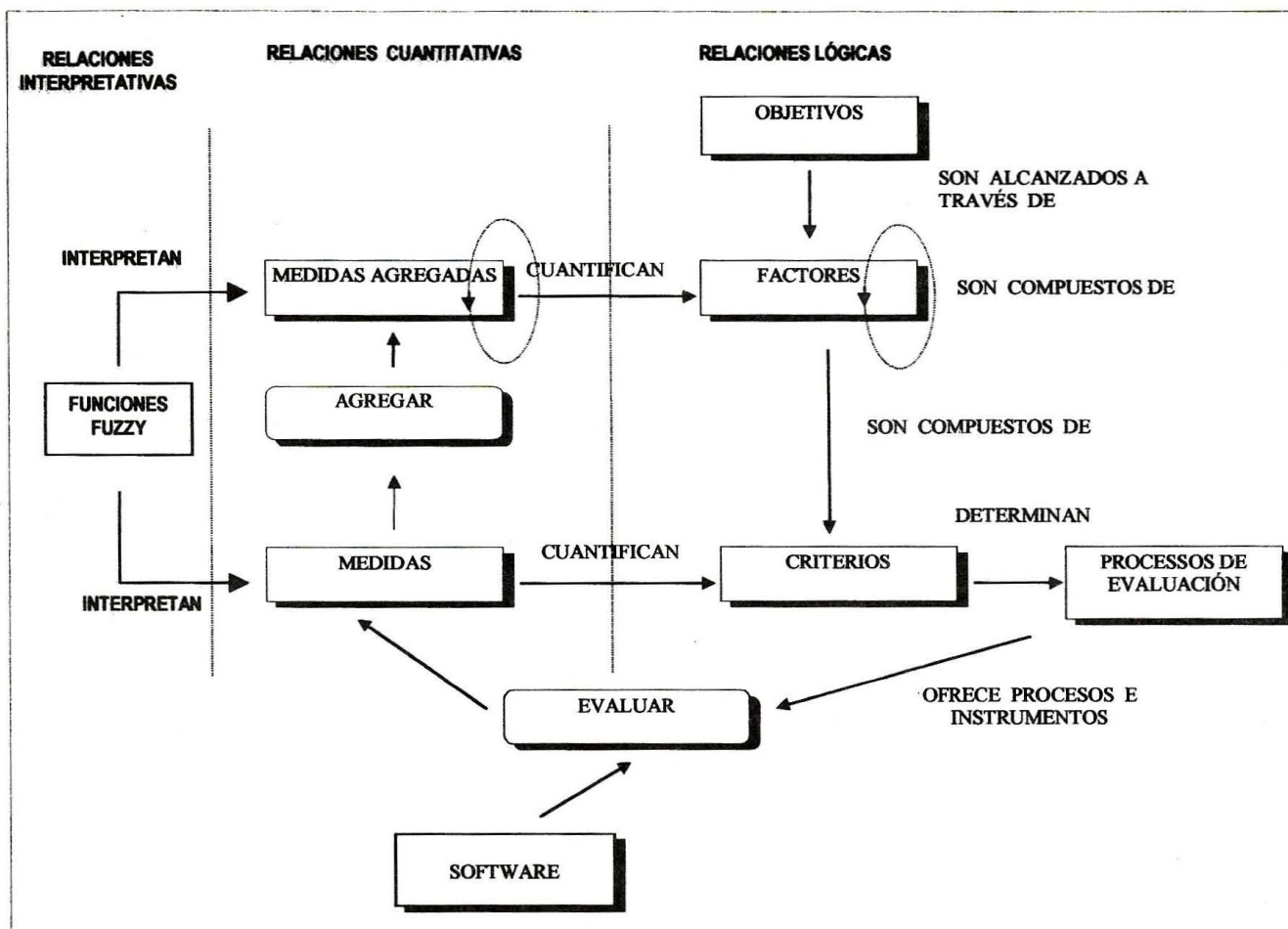


Figura 2: Modelo de Evaluación de la Calidad del Software.

Productos de software son desarrollados para atender a determinadas necesidades de sus usuarios. Después de que son colocados en operación, se espera que tengan una vida útil, larga y productiva. Para que esto pueda ser concretizado, deben ser alcanzados los siguientes objetivos de calidad: **Confiabilidad de la Representación, Confiabilidad Conceptual y Utilidad.**

4.1 Objetivo: Confiabilidad de la Representación

El objetivo **Confiabilidad de la Representación** se refiere a las características que hacen la especificación fiable para sus usuarios, considerando los aspectos relativos a su forma y que hacen posible su

comprensión y manipulación, considerando que la especificación evoluciona gradualmente a lo largo del desarrollo y debe ser modificada durante la vida útil del producto cuando se realizan acciones de mantenimiento. Este objetivo se realiza a través de los factores de calidad Comunicabilidad y Manipulabilidad.

4.1.1 Factor: Comunicabilidad – Conjunto de atributos de calidad que evalúan la capacidad de la especificación de comunicar su contenido.

Especificaciones orientadas a objetos incluyen modelos de clases y objetos, donde son representadas y documentadas las entidades que caracterizan el dominio de la aplicación y resuelven el problema. Estos modelos de clases y objetos sirven a diversos

ATRIBUTOS DE CALIDAD		Especificaciones en General	Modelo Análisis O. O.	Modelo Diseño O.O.
Factor: COMUNICABILIDAD				
Corrección en el Uso del Método				
Corrección de la Notación		×		
Corrección Sintáctica		×		
Corrección Semántica		×		
Corrección en el Uso del Formato de Documentación		×		
Uniformidad de Terminología				
Uniformidad de Términos		×		
Uniformidad de Notación		×		
Uniformidad con relación al Nivel Abstracción				
Uniformidad de Detalle de la Documentación		×		
Independencia de Detalles de Diseño		×		
Uniformidad de Abstracción de las Clases			×	×
Uniformidad de Abstracción de los Atributos			×	×
Uniformidad de Abstracción de las Operaciones			×	×
Uniformidad de Abstracción de los <i>Clusters</i>			×	×
Modularidad de la Documentación				
Cohesión de las Informaciones		×		
Acoplamiento entre las Secciones		×		
Estructura de la Documentación		×		
Corrección de la Arquitectura				
Nivel de Factorización de la Clase			×	×
Nivel de Profundidad de la Jerarquía de la Clase			×	×
Cohesión Estructural de la Clase				×
Cohesión Estructural del <i>Cluster</i>				×
Acoplamiento de Relación entre Clases			×	×
Acoplamiento de Relación entre <i>Clusters</i>				×
Acoplamiento de Interacción entre Clases				×
Acoplamiento de Interacción entre <i>Clusters</i>				×
Tamaño				
Tamaño de la Especificación		×		
Tamaño de la Clase			×	×
Tamaño de la Operación			×	×
Tamaño del <i>Cluster</i>				×
Tamaño de la Interface				×
Simplicidad				
Simplicidad de la Operación				×
Simplicidad del Atributo				×

Tabla 1: Características de Calidad del Objetivo Confiabilidad de la Representación.

objetivos: proporcionan una base de concordancia entre el cliente y el equipo de desarrollo, son la base para la implementación y permiten evaluar si los requisitos descritos están siendo implementados.

El factor comunicabilidad es evaluado a través de los sub-factores *Corrección en el uso del Método, Uniformidad de la Terminología, Uniformidad en el Nivel de Abstracción, Modularidad de la Documentación, Corrección de la Arquitectura, Tamaño y Simplicidad* (Tabla 1).

A continuación discutimos en detalle los sub-factores de calidad relacionados a modelos de clases, *Corrección de la Arquitectura, Tamaño y Simplicidad*. Atributos de calidad que corresponden a los otros sub-factores pueden ser encontrados en detalle en [21].

4.1.1.1 SubFactor: Corrección de la Arquitectura – *Conjunto de atributos de calidad que evalúan la corrección del modelo considerando la disposición, composición y relación entre sus componentes.*

Uno de los objetivos de construir modelos de clases y objetos es proporcionar una adecuada disposición, composición y relaciones entre sus componentes, considerando que el modelo resultante sea de fácil entendimiento, evaluación, implementación y mantenimiento y con posibilidades de reutilización en otros contextos similares. Para alcanzar estos objetivos, es necesario realizar una evaluación de los componentes del modelo, observando una perspectiva local, al nivel de clases y objetos y una perspectiva de conjunto, al nivel de *clusters*. Al evaluar este sub-factor, debemos considerar los siguientes criterios: *Nivel de Factorización de la Clase, Nivel de Profundidad de la Jerarquía de la Clase, Cohesión Estructural de la Clase, Cohesión Estructural del Clusters,*

Acoplamiento de Relación entre Clases, Acoplamiento de Interacción entre Clases, Acoplamiento de Relación entre Clusters, Acoplamiento de Interacción entre Clusters.

- **Criterio: Nivel de Factorización de la Clase - NFC**

El nivel de factorización de la clase es entendido como la cantidad de subclases inmediatas de una clase ancestral C_i . El valor puede ser obtenido a partir de:

$$NFC (C_i) = \text{Número de clases inmediatas de la clase } C_i$$

Si la clase presenta una gran cantidad de descendientes inmediatos, es una indicación de cuantas clases de especialización van a heredar los atributos y operaciones de la clase ancestral. Aunque esto sea considerado positivo, bajo la óptica de reutilización, una clase con muchos descendientes podrá requerir de un mayor esfuerzo durante el proceso de pruebas de las operaciones de las clases involucradas, porque las operaciones de la clase ancestral necesitan ser nuevamente probados en las clases descendientes.

- **Criterio: Nivel de Profundidad de la Jerarquía de la Clase - NPJ**

Una estructura de generalización - especialización representa una jerarquía de clases formadas por varios niveles. A través de un análisis de la jerarquía, es posible identificar en que medida las clases ancestrales afectan a las demás clases, observándose la profundidad de las clases en la jerarquía y el número de operaciones heredadas. Estas informaciones indican el grado de complejidad de la estructura.

Sean C_1, \dots, C_n las clases y $NPC(C_i)$ el nivel de la clase en la jerarquía, el nivel de profundidad NPJ es dado por:

$$NPJ = \frac{\sum_{i=1}^n NPC(C_i)}{n}$$

El aumento de los niveles de profundidad de la jerarquía implica en un esfuerzo mayor para la comprensión y mantenimiento de las clases. Esto se debe, a que la herencia afecta la localizabilidad y el principio de encapsulamiento.

- **Criterio: Cohesión Estructural de la Clase - CEC**

Si una clase tiene diferentes operaciones realizando funciones diferentes sobre el mismo conjunto de argumentos, entonces la clase tiene alta cohesión. Para realizar esta verificación, es posible determinar el grado de similaridad¹ entre las operaciones especificados en la clase, observando el conjunto de argumentos que participan en ellas. Operaciones que trabajan con los mismos argumentos pueden ser una indicación de que los servicios están relacionados.

Sea la clase C_i , con n operaciones O_1, \dots, O_n y $\{A\}$ el conjunto de argumentos declarado en la operación O_i , onde $1 \leq i \leq n$. Entonces, existen N conjuntos $\{A_1\}, \dots, \{A_n\}$, tal que M (número de conjuntos disjuntos) es generado a partir de la intersección entre los conjuntos de argumentos $A_i \cap A_j$. La **Cohesión Estructural (CEC)** puede ser calculado por la relación entre el número de conjuntos disjuntos M y el conjunto total de argumentos N .

$$CEC(C_i) = (1 - M/N)$$

¹ Según [22] en [15], la similaridad entre dos entidades es determinada a partir de la comparación de sus propiedades.

Un valor alto de **CEC** es una indicación de que existe una fuerte relación entre las operaciones especificadas en la clase. De lo contrario, puede indicar que la clase deba ser subdividida en dos o más clases, pues probablemente realiza operaciones no relacionadas, haciendo que la clase sea más compleja aumentando las posibilidades de errores.

- **Criterio: Cohesión Estructural del Cluster - CCL**

La cohesión de un conjunto de clases puede ser calculada a través de la media del número de relaciones internas entre las clases. Sea CL un *cluster* y r el número de relaciones que son internas al *cluster*. Sea n el número de clases en el *cluster*. Entonces, el indicador de la **Cohesión Estructural del Cluster (CCL)** puede ser calculado de la siguiente manera:

$$CCL(CL_i) = \frac{(r + 1)}{n}$$

(El valor de 1 en la ecuación evita que $CCL = 0$, cuando $n=1$)

Un valor alto de **CCL** es una indicación de que existe una fuerte relación entre las clases, de lo contrario, el objetivo definido para el *cluster* debe ser reformulado.

- **Criterio: Acoplamiento de Relación entre Clases - ACR**

El **Acoplamiento de Relación** es definido por el número de relaciones - *dependencia estática* - que una determinada clase tiene con otras clases en el modelo, excluyendo las relaciones por herencia. Sea C_i una clase del modelo y r la indicación del número de relaciones con otras clases. Entonces **ACR** es dada por:

$$ACR(C_i) = \sum_{i=1}^n r_i$$

Un modelo de clases con un alto *Acoplamiento de Relación* puede tornar el modelo difícil de entender y llevar a errores durante el desarrollo. Un cambio, o una falla, en una clase puede tener un efecto de propagación en otras clases en el modelo. Esto hace difícil la actividad de mantenimiento y la realización de las pruebas.

- **Criterio: Acoplamiento de Relación entre Clusters - ARCL**

Un *cluster*, además de estar compuesto por un conjunto de clases relacionadas, deben tener dependencia mínima con relación a otros *clusters*. El acoplamiento entre *clusters* es definido por el número de relaciones entre clases del *cluster* y clases que pertenecen a *clusters* diferentes. Sea CL_i, \dots, CL_n un conjunto de *clusters* y r la indicación del número de relaciones entre clases que pertenecen a *clusters* diferentes. Entonces, *ARCL* es dado por:

$$ARCL(CL_i) = \sum_{i=1}^n r_i$$

Un valor pequeño para *ARCL* es deseable, en la medida en que las relaciones entre las clases quedan confinadas a los *cluster*, sin atravesar sus fronteras. Eso permite que el conjunto de clases pueda ser implementado, probado y reutilizado de modo casi independiente, sin afectar los demás *clusters*.

- **Criterio: Acoplamiento de Interacción entre Clases - ACI**

Una clase tiene *Acoplamiento de Interacción* con otra clase si una de ellas actúa sobre la otra a través de mensajes, o sea, si sus operaciones utilizan las operaciones o atributos de otra clase. A partir de las operaciones especificadas en la clase, es posible determinar el grado de interacción

que una clase tiene con otras clases. Sea C_i una clase con S_1, \dots, S_n los servicios declarados y R_i el conjunto de operaciones llamados por $S_i = \{R_{ij}\}$, entonces el indicador que mide el grado de comunicación de la clase es el siguiente [15, 2]:

$$ACI(C_i) = S_i \cup \{R_{ij}\}$$

Un valor alto de *ACI* es una indicación de que la clase se comunica vía mensaje con una gran cantidad de otras clases, lo que puede significar una alta complejidad de la clase. A través de este indicador es posible determinar la complejidad de las pruebas en varias partes del modelo.

- **Criterio: Acoplamiento de Interacción entre Clusters - AICL**

Un *cluster* tiene *Acoplamiento de Interacción* si existe comunicación vía mensajes entre clases del *cluster* y clases que pertenecen a *clusters* diferentes. Sea CL_i un *cluster* formado por las clases C_1, \dots, C_n y $ACI(C_i)$ el acoplamiento de interacción de la clase C_i . El indicador del grado de *Acoplamiento de Interacción entre Clusters* es calculado a partir de:

$$AICL(CL_i) = \frac{\sum_{i=1}^n ACI(C_i)}{n}$$

Un valor bajo para *AICL* es deseable, pues indica que la mayoría de las interacciones entre las clases se realizan dentro de los límites del *cluster*. Esto permite que el conjunto de clases pueda ser implementado, reutilizado y probado con mayor facilidad. Para el caso específico de las pruebas de *clusters*, estos se tornan más complejos, pues deben ser planeados casos de prueba considerando las clases que están dentro y fuera del *cluster*.

4.1.1.2 Subfactor: Tamaño - conjunto de atributos de calidad que evalúa si la especificación contiene la cantidad mínima de componentes sin comprometer su calidad.

Al considerar el sub-factor *tamaño*, para el caso de especificaciones orientadas a objetos, deben ser considerados, los siguientes criterios: **Tamaño de la Clase, Tamaño de la Operación, Tamaño del Cluster y Tamaño de las Interfaces**. A seguir presentamos una discusión sobre los mismos.

- **Criterio: Tamaño de la Clase - TC**

El tamaño adecuado para una clase varía dependiendo de la complejidad de la aplicación y de su responsabilidad en el contexto del problema. El *Tamaño de la Clase* es definido como la cantidad de atributos y operaciones declaradas en la clase. Sea la clase C_i con NA atributos y NO operaciones. El tamaño de la clase puede ser calculado a partir de:

$$TC(C_i) = NA + NO$$

Una clase con un valor de TC muy grande - comparado con valores para otras clases -, puede ser una indicación de la necesidad de dividir en clases menores. Si es necesario, se debe preservar la cohesión de las operaciones que serán definidas en ellas.

Desde el punto de vista de la reutilización, el tamaño de la clase objetos es un dilema. Por un lado, si se considera el costo/beneficio, una clase con una gran cantidad de atributos y operaciones es deseable, en la medida en que sus especializaciones puedan heredar y utilizar una gran cantidad de atributos y operaciones.

- **Criterio: Tamaño de la Operación -TO**

El *Tamaño de la Operación* puede ser obtenido a partir del número de líneas de

pseudocódigo declaradas en las operaciones. Sea $O_1 \dots O_n$ las operaciones definidas en la clase C_i . El tamaño de la operación puede ser obtenido a partir de:

$$TS(O_i) = \text{número de líneas de pseudocódigo de la operación } O_i$$

Podemos identificar algunas consecuencias no deseables, de la existencia de TO muy grandes: a) son más difíciles de comprender; b) Pueden ser un indicador de que el código que va ser generado es más orientado a funciones que a orientado a objetos c) Son probablemente, más complejos y más orientado a aplicaciones específicas, minimizando sus posibilidades de reutilización.

- **Criterio: Tamaño del Cluster - TCL**

El *Tamaño del Cluster (TCL)* es entendido como la cantidad de clases definidas en el cluster. Sea CL_i un cluster compuesto por clases-objetos C_1, \dots, C_n . Su tamaño puede ser obtenido a través de:

$$TCL(CL_i) = \text{número de clases en el cluster } CL_i$$

A través del empleo de un mecanismo de identificación incremental de clases, es posible tener un mejor control, minimizar los errores y aumentar la productividad. Valores exactos de cantidad de clases para un determinado *cluster*, todavía no son establecidos. Sin embargo, se recomienda que un *cluster* adecuado, contiene en media cinco a veinte clases.

- **Criterio: Tamaño de la Interface - TI**

Una forma de construir diseños de alta calidad, con clases reutilizables, es a través del refinamiento de los protocolos estándar. Esto puede ser realizado a través de la reducción del número de argumentos que participan en los mensajes, dividiendo un

mensaje en varios. Esto aumenta el número de mensajes con argumentos similares. Por consiguiente, el **Tamaño de las Interfaces (TI)** es entendido como la cantidad de argumentos definidos en un determinado mensaje. Sea M_i un mensaje compuesto por los argumentos A_1, \dots, A_n . Su tamaño puede ser calculado a través de:

$$TI(M_i) = \text{número de argumentos del mensaje } M_i$$

Según [23], un buen número para **TI** es próximo a seis. Por otro lado, [24] recomienda que el protocolo de mensajes debe ser lo más simple posible y contener pocos parámetros, el autor sugiere que tenga en media, tres parámetros.

4.1.1.3 Subfactor: Simplicidad - conjunto de atributos de calidad que evalúan el grado de complejidad de las operaciones y atributos definidos en la clase.

Las especificaciones sufrirán inevitablemente mantenimiento, debido a que frecuentemente encontramos fallas en las especificaciones. Con el objetivo de minimizar los impactos causados por modificaciones y/o posibles extensiones en la especificación, la simplicidad debe ser una característica a ser considerada durante la generación de clases. Clases con atributos y servicios complejos son más difíciles de entender, implementar, reutilizar y probar.

Al considerar el subfactor *Simplicidad*, debemos considerar los criterios: **Simplicidad de las Operaciones** y **Simplicidad de los Atributos**.

- **Criterio: Simplicidad de Operación - SIO**

El criterio **Simplicidad de las Operaciones** evalúa el grado de simplicidad de cada clase a través del análisis de cada una de sus

operaciones. De esta manera, se determina el esfuerzo necesario para desarrollar, probar y mantener la clase. Sea C_i una clase, con n operaciones O_1, O_2, \dots, O_n y sean s_1, s_2, \dots, s_n valores de 0 - 1 asociados al nivel de simplicidad de cada operación, según la Tabla 2.

Nivel de Simplicidad de la Operación	Significado
0	Operaciones con instrucciones CASE, IF's, Ciclos
0.25	Operaciones con instrucciones IF's, Ciclos
0.50	Operaciones con instrucciones IF's
0.75	Operaciones con instrucciones Ciclos
1	Operaciones sin instrucciones IF's, CASE, Ciclos

Tabla 2: Escala de valores para el criterio simplicidad de la operación considerando su estructura de control.

El valor de la **Simplicidad de la Operación** de la clase es dada por:

$$SIO(C_i) = \sum_{i=1}^n s_i / n$$

Un valor pequeño de **SIO**, puede significar un gran impacto en las subclases, debido a la herencia de operaciones. Mientras mayor sea el valor de **SIO**, probablemente, más fácil será la reutilización, mantenimiento y prueba de la clase, pues se torna menos compleja. Se espera, que el valor de **SIO** sea lo mayor posible.

- **Criterio: Simplicidad de Atributos - SIA**

El criterio **Simplicidad de Atributos** evalúa el grado de simplicidad de los atributos definidos en cada clase. De esta manera es

conocido el esfuerzo necesario para desarrollar y mantener la clase. Sea C_i una clase, con n atributos A_1, A_2, \dots, A_n , y sean a_1, a_2, \dots, a_n los valores de 0 - 1 asociados al grado de simplicidad de cada atributo, según la Tabla 3.

Nivel de Simplicidad De los Atributos	Significado
0	Listas/Vectores
0.25	Referencias
0.50	Registro/Estructura
0.75	Carácter
1	Entero, Real, Booleano

Tabla 3: Escala de valores para el criterio simplicidad de atributos considerando su estructura.

El valor de la simplicidad de atributos de la clase es dada por:

$$SIA(C_i) = \sum_{i=1}^n a_i / n$$

Un alto valor para SIA es un indicador de la existencia de una clase menos compleja, y probablemente mas fácil de ser entendida, modificada, extendida y reutilizada.

5. Conclusión

En este artículo fue discutido un conjunto de características de calidad propuesto para evaluar la confiabilidad de la representación de especificaciones orientadas a objetos, en lo que respecta al modelo de clases y su documentación asociada. Estos atributos fueron definidos a partir de trabajos sobre calidad de especificaciones, de la literatura técnica sobre calidad en orientación a objetos y del uso de métodos de desarrollo orientado a objetos. La organización y discusión de los atributos es realizada de acuerdo a un

método de evaluación de la calidad de software.

6. Referencias Bibliográficas

- [1] (Basili et al. 1996). V. Basili, L. Briand, W. Melo, "A Validation of Object-Oriented Design Metrics as Quality Indicators", En *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol 22, no.10, octubre, pp. 1-29.
- [2] (Henderson-Sellers 1996). B. Henderson-Sellers, *Object-Oriented Metrics - Measures of Complexity*, Prentice-Hall, Inc.
- [3] (Jacobson et al. 1998). I. Jacobson, *Unified Modeling Process*, Addison Wesley.
- [4] (Larman 1998). Craig Larman, *Applying UML and Patterns. An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design*, Prentice-Hall, Inc.
- [5] (Clunie 1987). C. E. Clunie, *Verificação e Validação de Software na Fase de Especificação de Requisitos*, Tesis de Maestría, COPPE/UFRJ.
- [6] (Clunie et al. 1995a). C. E. Clunie, C. Werner, A. R. Rocha, "Metrics of Quality and their Relation with the Object-Oriented Modeling", En *Proceedings of the 5th. International Symposium on Systems Research, Informatics and Cybernetics - ISAS*, Baden-Baden, Alemania.
- [7] (Clunie et al. 1995b). C. E. Clunie, R. M. Araujo, C. M. Werner, A. R. Rocha, G. H. Travassos, "Una Experiencia en el Desarrollo de un Sistema Orientado a

- Objetos”, En *Proceedings of the II International Congress on Information Engineering - ICIE' 95*, Buenos Aires, Argentina.
- [8] (Clunie et al. 1996). C. E. Clunie, C. M. Werner, A. R. Rocha, “How to Evaluate the Quality of Object-Oriented Specification”, En *Proceedings of the 6th. International Conference of Software Quality*, Canada, outubro, pp. 283-293.
- [9] (Clunie e Rocha 1987), C. E. Clunie, A. R. Rocha, “Verificação e Validação de Software na Fase de Especificação de Requisitos” En *XIII Conferencia Latinoamericana de Informática*, Bogotá - Colombia.
- [10] (Davis 1995). A. Davis, “Object-Oriented Requirements to Object-Oriented Design: An Easy Transition?”, En *Journal Systems and Software*, volumen 30, julio- agosto, pp. 151-159.
- [11] (Love 1993). T. Love, *Object Lessons - Lessons Learned in Object-Oriented Development Projects*, SIGS Books, New York.
- [12] (Kolewe 1993). R. Kolewe, “Metrics in Object-Oriented Design and Programming”, En *Software Development*, octubre, pp. 53-62.
- [13] (Abreu e Carapuça 1994). F. B. Abreu, R. Carapuça , “Candidate Metrics for Object-Oriented Software within a Taxonomy Framework”, En *Journal of Systems and Software*, volumen 26, no.1, pp. 87- 96.
- [14] (Coad e Yourdon 1994). Coad P., Yourdon E., *Object-Oriented Analysis*, Yourdon Press, Englewood Cliff, New Jersey.
- [15] (Chidamber y Kemerer 1994). S. Chidamber , C. Kemerer, “A Metrics Suite for Object-Oriented Design”, En *IEEE Transactions on Software Engineering*, 7(5), pp. 510-518.
- [16] (Chen y Lu 1994). J-Y Chen, J-F Lu , “A New Metric for Object-Oriented Design”, Em *Information and Software Technology*, volumen 35, no.4, abril, pp. 232 - 239.
- [17] (Stiliglic et al. 1995). B. Stiliglic, M. Hericko, R. Ivan, “How to Evaluate Object-Oriented Software Development?”, Em *ACM SIGPLAN Notices*, volume 30, no. 5, mayo, pp. 3-10.
- [18] (Lorenz e Kidd 1994). M. Lorenz, J. Kidd, *Object-Oriented Software Metrics*, PTR Prentice Hall, Englewood Cliff, New Jersey.
- [19] (Rocha 1983). A. R. Rocha, *Um Modelo para Avaliação da Qualidade de Especificações*, Tesis de Doctorado, PUC-RJ.
- [20] (Belchior 1997). A. D. Belchior, *Avaliação da Qualidade de Software utilizando Lógica Fuzzy*, Tesis de Doctorado, COPPE/UFRJ.
- [21] (Clunie 1997). C. E. , *Manual para el Control de Calidad de Especificaciones Orientadas a Objetos*, Informe Técnico - No.1, UTP.
- [22] (Bunge 1977). M. Bunge, *Treatise on Basic Philosophy: Ontology I: The Furniture of the World*; Boston Riedel.

- [23] (Jonhson y Foote 1998)., ***"Designing Reusable Classes"***; En Journal of Object Oriented Programming, vol. 1, No.2.
- [24] (Yourdon, Edward 1994)., ***"Object - Oriented Design"***; Yourdon Press., Englewood Cliffs, NJ.

GUÍA PARA AUTORES DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

DEFINICIONES

Artículos: Son trabajos originales de investigación, experimental y/o teórica no previamente publicados, cuyos resultados constituyen un aporte al estado del conocimiento en el tema tratado y dirigidos a una audiencia especializada.

Notas Técnicas: Son exposiciones de experiencias novedosas de aplicaciones de tecnologías de producción nacional o foránea a la solución de problemas de campo en ingeniería; además de resultados parciales o avances de investigación que contengan información novedosa y sustancial del proyecto. También se incluyen modificaciones a técnicas analíticas o experimentales existentes que no ameriten la confección de un artículo o cualquier otra modalidad contemplada en la Revista.

Ensayos Cortos: Son el resultado de un examen crítico de artículos de investigación científica publicados previamente, en donde se resaltan los trabajos más importantes o los que han brindado mayor aporte al conocimiento en un área determinado. También se incluyen, en esta modalidad, trabajos de reflexión y opinión sustentados y relacionados a la temática de ciencia y tecnología. En general serán limitados y solamente por invitación del Comité Editorial.

COMPONENTES DEL MANUSCRITO

Título: El título debe ser simple y conciso, reflejando el contenido del documento. En algunas ocasiones se puede describir el título utilizando dos partes. Se empezará la primera palabra con letra mayúscula y de allí en adelante se utilizará la mayúscula solamente

para los nombres propios, de marca o símbolos químicos. Se evitará el uso de abreviaciones y siglas en el título así como de palabras innecesarias (como un, una, sobre, el, etc.) al principio del título.

Nombre del (de los) autor(es) y afiliación: Se recomienda a los autores usar la misma forma de su nombre en todas las publicaciones. Se debe escribir el nombre, la dirección institucional del o de los autores de la manera más completa afin de permitir una comunicación efectiva. Se recomienda incluir direcciones físicas, apartados postales, departamentos y direcciones electrónicas.

Resumen: Todo trabajo debe incluir un resumen de hasta 250 palabras presentado en español e inglés. También se deben incluir un máximo de seis(6) palabras claves para ambos idiomas presentadas en orden alfabético, permitiendo identificar y clasificar los contenidos del documento.

El resumen debe estar totalmente justificado, desde el inicio de la primera página, después de la información del autor. Debe usarse la palabra Resumen y Abstract como título del mismo.

Extensión: Los artículos científicos tendrán una extensión máxima de 30 páginas incluyendo ilustraciones y gráficos; las notas técnicas y los ensayos un largo no mayor de 15 páginas. Por página se entiende una cara de papel "8.5 x 11", escrito a doble espacio (unas 22 líneas) con letra de 12 puntos tipo Times Roman, no comprimido, todos los márgenes de 1".

Cuerpo del Manuscrito: Las componentes principales del manuscrito debe ser dividido en

secciones con un uso apropiado de títulos y subtítulos según lo requieran la organización y el desarrollo lógicos del material. Las secciones más usuales, pero NO limitante, son las siguientes:

a. Introducción: Debe ubicar al lector en el contexto del trabajo. La introducción debe contener:

- La naturaleza del problema cuya solución se describe en el documento.
- El estado del arte en el dominio tratado (con sus respectivas referencias bibliográficas).
- El objetivo del trabajo, su relevancia y su contribución en relación al estado del arte.
- Los métodos utilizados para resolver el problema.
- Descripción de la forma como el documento está estructurado.

b. Material y Método: Deben consignarse los criterios de selección del material tratado y los controles y estudios planeados y realizados. Las medidas deberán ser en el sistema métrico decimal. Las abreviaturas usadas deben ser previamente definidas en su primera aparición en el texto. Se intentará evitar abreviaturas que no fueran de uso común.

c. Resultados: Se recomienda presentar los resultados en orden lógico y de la forma acostumbrada. En este apartado no deben realizarse consideraciones o comentarios, ni se emplearán citas bibliográficas.

d. Discusión: Se destacarán y comentarán los aspectos importantes del trabajo. Toda afirmación debe estar avalada por los resultados obtenidos o por citas bibliográficas aportadas. Se recomienda extremar el poder de síntesis evitando repeticiones innecesarias.

e. Conclusión: Deben ser enunciadas con claridad y deberán cubrir :

- Las contribuciones del trabajo y su grado de relevancia.
- Las ventajas y limitaciones de las propuestas presentadas.
- Referencia y aplicaciones de los resultados obtenidos.
- Recomendaciones para futuros trabajos.

f. Agradecimiento y Reconocimientos

g. Referencias Bibliográficas: Las referencias se identificarán en el texto mediante números arábigos entre corchetes, alineados con la escritura. Se enumerarán correlativamente por orden de aparición en el texto apareciendo al final de cada trabajo. Las listas de referencias deberán realizarse siguiendo el estilo de la IEEE. Las citaciones de artículos de revistas deberán seguir este orden: nombre de autor, título del artículo, nombre de la revista, número de volumen y número de páginas, año de la publicación. Las citas de un libro deberán incluir el nombre del autor, título del libro, lugar de la publicación, editor, año de la publicación. No se aceptará que los nombres de todos los autores de un artículo o libro se den como *et al.*, debiéndose especificar la cita completa.

Para el caso de referencias electrónicas debe ser aplicada la Norma ISO 690.

El autor es responsable de la exactitud del contenido y citación de todas las referencias. Todas las referencias deberán ser citadas en el documento. Los números en el texto deben colocarse entre paréntesis.

Ejemplos:

Citación de un artículo:

- [1] J. Kajihara, G. Amamiya y T. Saya, "Learning from Bugs", *IEEE Software*, vol0, pp. 46-54, Septiembre 1999.
- [3] N. E. Fenton, M. Neil, y G. Ostrolenk, "Metrics and Models for Predicting Software Defects", Technical Report Report CRS/10/02, Centre for Software Reability, City Univ., Londres, 1995.

Citación de un libro:

- [5] J. Juran, *Managerial Breakthrough*, New York: McGraw-Hill, 1968.

Citación de un documento electrónico:

- [6] Land , T. *Web extensión to American Psychological Association style (WEAPAS)* [en línea], Rev. 1.4, <http://www.uvm.edu/ncrane/estyles/mia.htm> [Consulta: 24 abril 1999].

h. Apéndices: Cualquier otro material que impida el desarrollo continuo de la presentación, pero que pueda ser importante para justificar los resultados del artículo.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Los autores deberán enviar tres (3) copias de su manuscrito a:

Universidad Tecnológica de Panamá
Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión
Comité Editorial
Apdo. Postal: 6-2894, El Dorado
Panamá, Rep. de Panamá

Además, debe adjuntarse una página con la dirección del autor para canje de correspondencia y envío de correcciones. Por favor incluir número telefónico, número de fax y dirección de correo electrónico.

Los dictámenes serán realizados por lectores con experiencia en el tema a evaluar y mantendrán su anonimato.

Para cualquier consulta sobre el procedimiento, favor enviar correo electrónico a la siguiente dirección:

ridtec@vipe.utp.ac.pa

El someter el manuscrito a esta Revista implica que el documento no ha sido publicado previamente y que tampoco está siendo considerado para su publicación en otra revista.

**Esta revista se terminó de imprimir en
la Imprenta de la
Universidad Tecnológica de Panamá
bajo la administración del
Ing. Héctor M. Montemayor A.
en el mes de marzo de
2002**