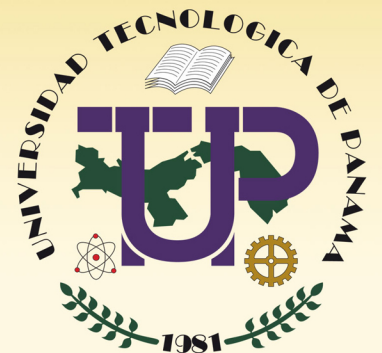


ISSN 1860-8894

REVISTA DE **I+D**
TECNOLÓGICO

Vol. 4 - No. 1 y 2



REVISTA DE I + D TECNOLÓGICO

VOLUMEN IV

• Revista I + D •

2005

**AUTORIDADES DE LA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ**

RECTOR
Salvador A. Rodríguez G.

VICERRECTORA ACADÉMICA
Marcela Paredes de Vásquez

VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN, POSTGRADO Y EXTENSIÓN
Delva Batista de Chambers

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO
Benigno Vargas

SECRETARIO GENERAL
Luis Barahona

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

Darío Solís

COMITÉ EDITORIAL

Humberto Alvarez

Clifton Clunie

Eleicer Ching

Wedleys Tejedor

PORTADA

Arte y diseño:

DRICOM

Universidad Tecnológica de Panamá

**LEVANTADO DE TEXTO
Y DIAGRAMACION**

Pablo Montero

Impreso en Panamá

200 ejemplares

Imprenta

Universidad Tecnológica de Panamá

CONTENIDO

Levantamiento de Acabados de piso y Losas Postensadas	7
..... <i>N. Yau; L. García</i>	
<hr/>	
La Gestión de la Producción en Ambientes de Ingeniería y Fabricación Bajo Pedido: Un Enfoque de Empresa Virtual.	17
..... <i>D. de Chambers; F. Sastrón</i>	
<hr/>	
Investigación e Innovación en la Agroindustria Panameña: Modelo Dinámico de las Agrocadenas.	25
..... <i>H. Alvarez</i>	
<hr/>	
Diseño de Una Pierna Robotica con Accionamientos no Lineales.	35
..... <i>R. Caballero</i>	
<hr/>	
Red Nacional de Movimientos Fuertes (Rnmf) UTP: Acelerógrafos Dentro de Edificios y a Campo Abierto en Panamá.	45
..... <i>J. Toral; C. Ho</i>	
<hr/>	
Control de Calidad del Concreto. (Normas, pruebas y cartas de Control).	59
..... <i>O. Patiño; R. Méndez</i>	
<hr/>	
Modelo de Transferencia de Fase de Bases Orgánicas en Sistemas Suelo-Agua	65
..... <i>J. Fábrega</i>	
<hr/>	
Respuesta de Dinámica de Motores Piezoeléctricos de Onda Viajera Fabricados con Materiales Compuestos Laminados	71
..... <i>C. Plazaola; H. Rodríguez</i>	
<hr/>	
Estabilidad de un Robot Cuadrúpedo Durante un Modo de Caminar Cuasi-Estático Mediante Realimentación del Zmp.	79
..... <i>H. Montes</i>	

A MODO DE PRESENTACIÓN

Siendo las actividades de Ciencia y Tecnología las llamadas a impulsar el desarrollo y crecimiento de toda nación, la incubación de trabajos de investigación, innovación y desarrollo que redunden en la generación de nuevo conocimiento, representan una prioridad fundamental para nuestra universidad y nuestro país.

Bajo este concepto, la Universidad Tecnológica de Panamá, manteniendo la vanguardia en lo que a educación y saber tecnológico se refiere, lleva a cabo actividades tendientes a fomentar el intercambio científico de tecnologías y conocimientos con la comunidad. Un ejemplo de esto fue el Primer Congreso Nacional de Ingeniería, Ciencias y Tecnología: Perspectivas Innovadoras para el Desarrollo del País. Celebrado en la U.T.P. el 3, 4 y 5 de octubre de 2005.

Este magno evento contó con la participación de un gran número de profesionales nacionales y extranjeros especialistas en diversas áreas del saber, los cuales dieron a conocer sus tareas, oportunidades y esfuerzos realizados, sirviendo así de motivación e incentivo para el nacimiento de nuevos proyectos y el desarrollo de nuevas iniciativas de colaboración científica.

Siendo la Revista I + D Tecnológico el vehículo oficial para- la divulgación de los resultados de la investigación en la Universidad Tecnológica de Panamá, aprovechamos esta oportunidad para presentar una pequeña muestra de las 73 Ponencias Científicas expuestas en nuestro Primer Congreso. En próximas ediciones estaremos presentando trabajos adicionales derivados del resto de los temas de las ponencias del Congreso, junto con los nuevos artículos que con mucho entusiasmo esperamos recibir de las diferentes unidades académicas, administrativas y de investigación de nuestra Universidad.

Ing. Salvador A. Rodríguez G.
Rector

LEVANTAMIENTO DE ACABADOS DE PISO Y LOSAS POSTENSADAS

Ing. Nicanor Yau Rivera
Universidad Tecnológica de Panamá

Dr. Luis García Dutari

RESUMEN

La Cultura del uso de pisos con acabados finos, como las baldosas de pasta, mármol, granito, congrani, porcelanato y cerámicos; se viene dando desde inicios del Siglo XX en Panamá, pero no es hasta finales del mismo cuando comienzan a presentar problemas de levantamientos, principalmente en estructuras Postensadas, lo que dio paso a investigar el motivo de este fenómeno.

Después de realizar investigaciones locales, sobre los productos utilizados; determinando la calidad de las baldosas y los pegamentos utilizados, encontramos que los mismos no mostraban deficiencia en la calidad del producto; lo que nos llevó a investigar como se realizaba el trabajo en otros países.

Las investigaciones nos presentan que el sistema de instalación para estos acabados están normados desde mediados del siglo XX. Las normas hacen énfasis en la calidad de los productos utilizados, principalmente en el porcentaje de absorción y el porcentaje de expansión – contracción de las baldosas y el uso de juntas de dilatación – contracción, especialmente en losas postensadas que tienen mayor luz de separación entre las columnas.

Para nosotros en Panamá, el problema se acentúa cuando el 90 % de las construcciones son en sistemas postensados y los planos no presentan los estándares de instalación, lo que crea el defecto a corto plazo.

1. Introducción

Es normal encontrarse en construcciones actuales, problemas con levantamiento de baldosas o pisos de cerámica. Generalmente la baldosa se levanta del piso, se flexiona hacia arriba y en muchas ocasiones, se rompe, produciendo un ruido apreciable, que genera el temor de un colapso estructural.

Este problema no es nuevo. Está sucediendo desde hace mucho tiempo y su aparición, coincide con el inicio de la construcción masiva de la losa postensada, como sistema estructural en Panamá. Existen algunas características comunes de este problema, que se mencionan a continuación:

- El levantamiento de baldosas, es independiente del sistema de losa estructural. Se han registrado casos de levantamiento en pisos sobre tierra, donde la deformación producida por los pisos, es casi nula.
- El problema se presenta generalmente asociado con pisos de cerámicas de poco espesor, pegados con morteros especiales (pegamentos de piso).
- También se han presentado levantamientos en pisos de congrani o mármol de apartamentos de lujo, con grandes salas y comedores.
- En muchos de los casos de patología estudiados, se ha encontrado que la baldosa tiene un alto índice de expansión, es decir, su variación de tamaño, al pasar de un estado

tamaño, al pasar de un estado totalmente seco a un estado 100% de saturación es alto. Sin embargo, no todas las baldosas tienen estos problemas de expansión. Existen baldosas muy económicas sin expansión y baldosas muy caras con este problema.

- Las losas postensadas que actualmente se utilizan, presentan deformaciones mayores que los sistemas constructivos antiguos, efecto que se debe considerar. Además, existe un acortamiento axial producido por la compresión de los cables.

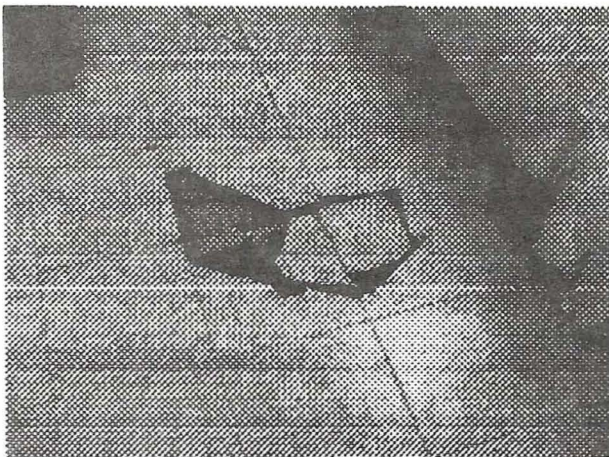


Foto 1.

La foto 1 muestra el problema visualmente, vemos como la baldosa se ha levantado de la base y está completamente fisurada. Puede verse además, como se ha extendido el levantamiento a lo largo de la recámara.

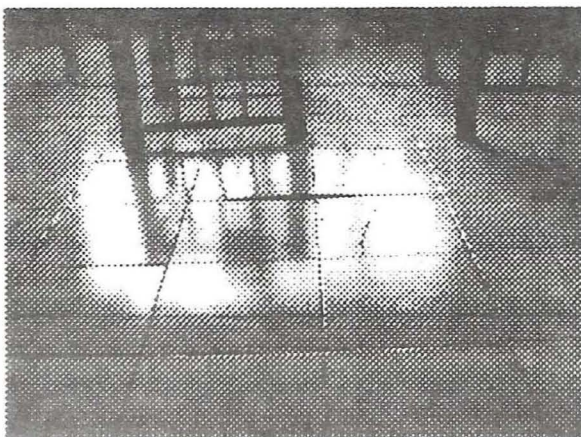


Foto 2.

La foto 2, muestra el problema del levantamiento de la baldosa, antes de que la misma se rompa. Puede observarse como la baldosa no cabe dentro del recuadro horizontal del piso.

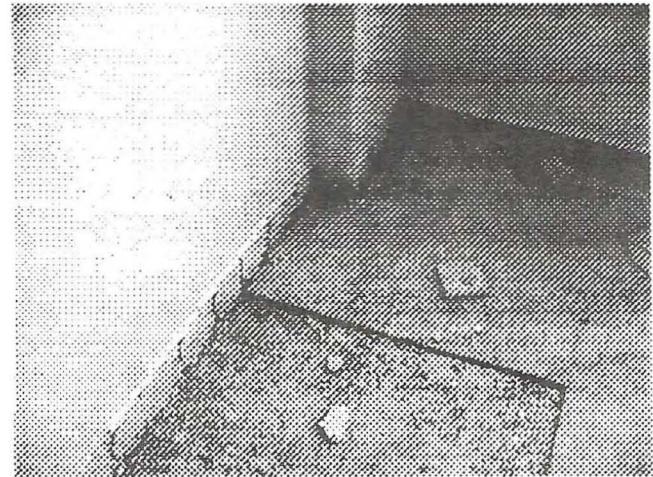


Foto 3.

En la foto 3, se muestra como no se deja la junta de expansión de la baldosa, debajo del zócalo, impidiendo que la baldosa pueda moverse horizontalmente, absorbiendo la expansión.

2. Factores que pueden contribuir al levantamiento de baldosas

2.1 Losas postensadas

Las losas postensadas, han significado un fuerte cambio en el proceso constructivo de Panamá. Este sistema permite una construcción más rápida de todo el edificio, permite luces mayores sin la utilización de vigas y reducir los espesores de las losas de una manera importante.

Es posible diseñar una losa postensadas de acuerdo con las especificaciones del ACI-318-2002, y tener deformaciones para luces de 8m del orden de 22mm al cabo de 3 años. obsérvese que la magnitud de las deformaciones, no es función del sistema estructural, sino que son dadas por las limitaciones del código ACI, las cuales, también son válidas para estructuras de hormigón armado sin postensado.

La principal variación entre el sistema anterior de losas típicas y las losas postensadas, es el incremento en las luces entre columnas. Con los sistemas convencionales de losas de viguetas, una losa de 30cm de espesor, podía utilizarse

para luces no mayores de 5.50 m, mientras que una losa de 20cm postensada, puede utilizarse, sin ningún problema, para una luz de 8m.

Si ambas losas cumplen con la deformaciones del código, la deformación de la losa de viguetas es de 15.2mm mientras que las de la losa postensada es de 22.2 mm, es decir, actualmente construimos estructuras cuyas losas se deforman 46% más que las losas anteriores de vigueta, cumpliendo con las especificaciones del ACI-318-2002.

Pero el incremento en esta deformación, producido por el cambio de las losas, no se debe a la utilización de la losa en sí, se debe a que este sistema permite utilizar luces mayores y por lo tanto habrá que tolerar más deformaciones.

2.2 Tipos de baldosa y su colocación.

Otro factor determinante que ha cambiado en la construcción actual, es la utilización de baldosas para piso de cerámica o porcelanato, comparado con la práctica anterior de utilizar mosaicos de pasta o granito.

Las baldosas de cerámica o porcelanato tienen mayores dimensiones que las baldosas de pasta anteriores, y son más delgadas. También el material es diferente, dado que las baldosas actuales son, en su mayoría de cerámica, la cual en cierta medida tiene un coeficiente de expansión mayor que las baldosas de pasta o granito.

Es importante entender, que las baldosas hechas a base de arcillas y en general cualquier material de construcción actual, a excepción del acero y algunas piedras naturales, cambian de tamaño con la humedad. Al incrementarse la humedad, las piezas se incrementan de tamaño.

La variación en el tamaño, depende tanto de los materiales como del proceso de fabricación y no es una característica única de las baldosas de piso. Estas variaciones de tamaño, pueden existir en paredes de bloques de cemento, de arcilla, mosaicos para pisos, y los mismos suelos naturales.

Hemos notado actualmente, la tendencia existente en la construcción, de colocar baldosas o acabados de cualquier tipo, sin la debida saturación en agua. Era una práctica constructiva habitual, sumergir los

acabados totalmente en recipientes de agua por unas 6 horas como mínimo, antes de colocar el material.

El problema al no adoptar esta práctica, consiste en que se está colocando el acabado en seco, lo que implica que tiene la posibilidad de expandirse cuando gane humedad.

Cuando se coloca la baldosa seca, la misma ocupa una área específica, por ejemplo, entre las paredes de una habitación. Cuando esta baldosa se moja, se expande y tratará de ocupar un área mayor. Pero esta expansión va a ser impedida porque todas las baldosas están coaccionadas en el perímetro de la habitación, el resultado es una compresión en la baldosa que puede producir el levantamiento de la misma.

otro aspecto importante de la saturación de los acabados, es el efecto que tiene el colocarlos secos contra los morteros o pegamentos, que fijarán los mismos contra las paredes, los pisos o el mortero de nivelación.

Todos los pegamentos o pastas para colocar baldosas, requieren de la adición de agua, la cual es necesaria para la hidratación. Si la baldosa se coloca sin saturar, la misma absorberá el agua que existe en la interfase entre el pegamento y la baldosa, la cual es precisamente, la parte más importante para garantizar una buena adherencia.

El no mojar las baldosas antes de la colocación, necesariamente implica que se producirá una deficiencia en el pegue de la misma.

Es importante recalcar, que aún materiales como el mármol, puede ser susceptibles a levantarse, aun cuando los mismos no sufran tantos cambios debido a cambio de humedad.

El problema del levantamiento de mármoles, se ha observado cuando los mismos se pegan sin juntas y acompañado de grandes luces, como es el caso de apartamentos de lujo, donde pueden existir pisos de sala comedor de mármol de 9 a 11m de largo sin juntas.

La deformación de la losa, en este caso es de 25 a 28 mm. y si no se utilizan juntas, es muy probable que existan levantamiento del piso, porque la baldosa y el mortero de

colocación es incapaz de poder tomar esta deformación sin fisurarse o levantarse.

2.3 Ejecución de las juntas de pisos.

Es importante reconocer que la buena colocación de baldosas, implica necesariamente que se utilicen juntas. Estas juntas se deben hacer para que el piso pueda moverse o expandirse y por consiguiente, las mismas deben estar totalmente libre de cualquier material que impida su movimiento.

La figura 1, muestra un problema común en las juntas debajo del zócalo. El proceso constructivo es primero colocar el mortero de nivelación y luego, pegar la baldosa, ya sea con mortero de cemento o con los morteros especiales, denominados comúnmente pegamentos.

Si el proceso constructivo se realiza, como se observa en la figura (a), se impide el movimiento entre el mortero de colocación y la pared. Al estar la baldosa pegada físicamente al mortero, también se está impidiendo el movimiento de este y la junta de zócalo, para efectos prácticos, no funciona.

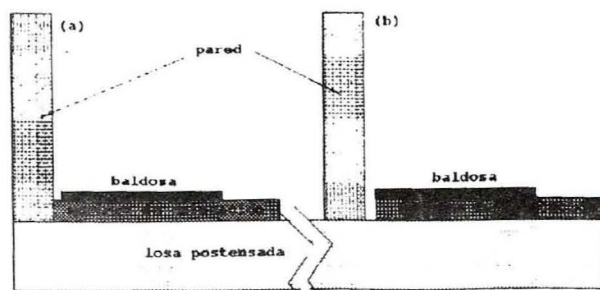


Figura 1.

Sin embargo, al realizar la junta de zócalo como se muestra en la figura 1(b), se permite que exista un movimiento relativo entre la losa y el conjunto baldosa mortero de colocación, ayudando grandemente a eliminar las compresiones que se producen durante el acortamiento.

Cuando se realiza la colocación de baldosas en grandes áreas, las mismas necesariamente requieren de juntas, con el fin de no impedir el movimiento horizontal de la baldosa. De acuerdo con la referencia (1), Se debe considerar que existirá una variación de 6.5mm en 3.2m de largo, en cualquier dirección del acabado, valor que

puede ser útil para definir el tamaño y colocación de las juntas.

Otro comentario interesante se encuentra en la norma colombiana citada en la referencia (2), la cual indica que se deben colocar juntas para dividir áreas mayores de 20m². Estas juntas deben ser necesariamente de dilatación, para permitir el movimiento entre las baldosas de piso.

Nuevamente, recalamos el hecho, de que las juntas horizontales entre baldosas, no pueden realizarse, como lo muestra la figura 2 (b), donde se puede observar nuevamente, que la continuidad del mortero de colocación, impide el movimiento relativo.

La forma correcta es utilizar un material elástico que divida tanto el acabado, como el mortero de colocación, como puede observarse en la figura 2(a).

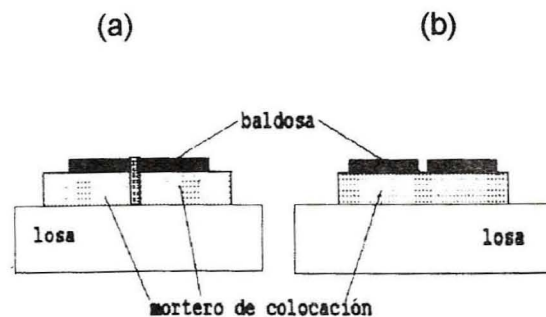


Figura 2.

3. Acortamiento de la losa con respecto al acabado.

Las baldosas se levantan, porque existe un acortamiento relativo entre la losa y el acabado. Este acortamiento relativo tiene dos factores: la expansión de la baldosa y el acortamiento de la losa. Estudiemos estas componentes para una sala de 10m de largo, el cual es un caso extremo.

La deformación de la losa produce un acortamiento en la parte superior del piso, sin embargo, el mismo es muy pequeño. Para 10m de luz, y una deformación de 27mm, el mismo es de 0.2mm.

Otra fuente de acortamiento de las losas es la Retracción. Todas las losas de hormigón postensadas o reforzadas sufren, además de las deformaciones producidas por las cargas a flexión, deformaciones por

retracción, debido a que todo hormigón se acorta a medida que transcurre el tiempo.

La deformación total por retracción, es del orden de 51×10^{-5} mm/mm, esto quiere decir que una losa de 30m de largo total, se acorta en toda su vida 15.3 mm, una sala comedor de 10m se acorta 5.1mm.

Prácticamente el 40% de esta retracción se presenta en los primeros dos meses de edad de las losas, lo que indica, que al momento de colocar la baldosa, se espera un acortamiento restante de 3.06mm, para nuestro caso de una sala de 10m.

En el caso particular de la losa postensada, también tenemos el acortamiento producido por la compresión del cable sobre la losa, el cual puede estimarse en unos 11 kg/cm^2 , lo que produce una deformación unitaria de 4.33×10^{-5} . Esta deformación deberá triplicarse aproximadamente, por el problema de la fluencia, llegando a tener un valor de 13.0×10^{-5} .

Sin embargo, gran parte de esta deformación por fluencia, se presenta antes de la colocación de la baldosa, aceptando un valor de 40% la deformación unitaria, podemos estimar que en una sala de 10m, la deformación por compresión de los cables, después de colocada la baldosa es: $(1-4) \times 10000.0 \times 13.00 \times 10^{-5} = 0.78 \text{ mm}$.

La suma de las componentes del acortamiento de la losa es de $3.06 + 0.78 + 0.2 = 4.04 \text{ mm}$. Traducido en porcentaje $4.04/10000 \times 100 = 0.04\%$.

Si se coloca un acabado sin saturar, que expanda un 0.1% ¹, para el caso de nuestra luz de 10m de sala, obtenemos una expansión de $10000 \times 0.001 = 10 \text{ mm}$. Si comparamos el acortamiento de la losa, con la expansión de la arcilla, observamos que la última componente es responsable del 71% del acortamiento relativo.

3. Conclusiones sobre el problema del levantamiento de baldosas en losas postensadas.

Lo más importante que debemos recordar en esta discusión, es que estamos trabajando con tres nuevos factores en el proceso constructivo actual:

1. Luces mayores, producto de la mayor capacidad de la losa postensada.
2. Nuevos materiales de acabados, basados mayormente en arcillas, las cuales sufren, mayores cambios de volumen por cambios de humedad.
3. Necesidad de juntas en los pisos, en áreas mayores.

El hecho de utilizar luces mayores en la estructura, implica aceptar la necesidad de acomodar mayores deformaciones, esto implica que los procedimientos de colocación de baldosas deben adaptarse a esta deformabilidad. Si esto no es posible, debemos regresar a luces que generen deformaciones que nuestros procesos constructivos permitan.

La referencia (1), tiene un compendio de recomendaciones para la colocación de baldosas, dependiendo de la deformabilidad de la losa inferior de sustento.

En particular, cuando las losas son: "estructuras de pisos de hormigón prefabricado, postensadas o de hormigón normal, sujetas a deformaciones o movimientos por flexión", indica que se debe utilizar una junta horizontal con un material tipo lámina de poliuretano, entre la losa postensada y el mortero de colocación, que permita el mejor movimiento relativo. Esta recomendación está contenida en la propuesta de especificación técnica que se presenta posteriormente.

Los nuevos materiales que se están utilizando como acabados, no son iguales a los utilizados anteriormente, por consiguiente es necesario la adaptación y actualización de la práctica constructiva a los mismos, sin olvidar las buenas costumbres adquiridas.

Es necesario antes de la colocación de las baldosas de piso, hacerles pruebas de expansión para las arcillas, con el fin de medir su grado de expansión con respecto a cambios de humedad.

También es necesario saturar las baldosas en agua antes de su colocación. La saturación de los elementos de acabados

¹ Se han encontrado baldosas con coeficientes de expansión del 1%.

en agua es importante, debido a que así colocamos la baldosa en su condición más dilatada, la cual se produce cuando está totalmente saturada.

4. Procedimiento para la colocación de baldosas cerámicas en losas postensadas.

4.1) Elección de la Baldosa.

Al momento de seleccionar el tipo de baldosa para el recubrimiento de una superficie, se debe tener presente si es para piso o para pared y las características que debe tener como: la dimensión, la resistencia, la dureza, la expansión, la absorción, el brillo, el color y la tonalidad. Estas características son diferentes para las baldosas según el uso que se le vaya a dar.

No es lo mismo, una baldosa para baño que la utilizada en la sala, se necesita mayor resistencia al tráfico en la sala que en el baño.

4.2) Características de una buena baldosa.

4.2.1) Tamaño de la baldosa (axb), máxima variación aceptada (a+1mm) x (b+1mm), donde a y b son las dimensiones de la baldosa en planta.

4.2.2) Alabeo. se requiere que la baldosa sea lo mas plana para aceptarla y tener un buen acabado.

4.3) Interpretar el plano y especificaciones.

4.3.1) El plano debe especificar las juntas de expansión, indicando su ubicación y detalle, según la modulación de la superficie dependiendo del tamaño de la baldosa. Ver el apartado 5 para una sugerencia en las juntas de expansión.

4.4) Instalación de baldosas en losas postensadas, con el sistema multicapas. Los distintos estratos que componen un recubrimiento cerámico, especialmente los horizontales, están sometidos a una serie de tensiones provocadas por los movimientos diferenciales que se generan en esa multicapa. Estas tensiones pueden causar diversas patologías de colocación.

La tendencia actual para corregir estas consecuencias negativas es la de aislar el

pavimento cerámico y su capa de agarre del resto del sistema, colocando una capa separadora, efecto que viene a complementar el realizado por las juntas de deformación.

Esta capa separadora también llamada capa de deslizamiento, tiene como misión dejar "flotar el pavimento" sobre la superficie portante permitiéndole pequeños desplazamientos de forma que las tensiones de la estructura no se trasmitan al pavimento.

El material usado para realizar esta capa de deslizamiento puede ser: desde una simple capa de arena (espesor aprox. 20 mm) hasta paneles o laminas de poliestireno, corcho, plásticos, mantas bituminosas, y paneles prensados de poliuretano. Estos materiales junto con esta labor estructural, asumen otras tareas como aislamiento térmico o acústico.

Tras esta capa de deslizamiento se coloca una capa de mortero de cemento. Esta capa llamada de regulación o nivelación, servirá para eliminar posibles irregularidades de la superficie y definir el plano de colocación, sobre el que se aplicara el adhesivo y el pavimento cerámico. La capa de regularización lleva un refuerzo, que puede ser una parrilla metálica de reparto de cargas o malla de refuerzo (alambre) o utilizar fibras sintéticas en el mortero de nivelación.

Preparada la superficie de apoyo, se procede a la colocación del pegamento (adhesivo) y a la colocación de la pieza de cerámica. Es recomendable proceder por zonas de extensión reducidas para evitar la contaminación del pegamento.

Al colocar el pegamento, este se debe esparcir con una llana dentada para producir surcos que permitan la liberación de aire al colocar la baldosa. (El dentado de la llana a utilizar, dependerá del tamaño de la baldosa).

Se recomienda sumergir en agua las baldosas cerámicas durante un tiempo prudencial dependiendo de su capacidad de

absorción, sin llegar a empaparse. (saturación)

Las baldosas se colocaran ejerciendo una ligera presión respetando la junta de colocación prevista (se usaran distanciadores para garantizar un tamaño de junta constante.

Se limpiaran todas las juntas de posibles restos de pegamento (adhesivo) para poder realizar posteriormente un correcto rejuntado.

Para el relleno de las juntas se ha de seleccionar el material elastomérico a utilizar en función de la anchura y prestaciones físicoquímicas requeridas, se aconseja usar mezclas prefabricadas para garantizar la composición. El rejuntado o relleno de juntas, se debe realizar después de un mínimo de 24 horas de haberse colocado las baldosas.

Es importante rellenar con el material elastomérico las juntas perimetrales antes de colocar los zócalos (o remates) para evitar que estas se tapen con el pegamento de los remates. Hacemos énfasis, que el material de relleno de la junta debe ser elástico para que permita el movimiento de la misma.

RECOMENDACIONES ADICIONALES.

- Durante los 3 @ 4 días posteriores a la instalación se debe evitar el tránsito sobre el mismo. Transcurrido ese tiempo proceder a la limpieza superficial.
- No someter a cargas estáticas o dinámicas intensas hasta que transcurra un mes de la colocación.

5. Propuesta de especificación técnica para las baldosas

ACABADOS DE PISOS Y BASES O ZOCALO

1. Trabajo Requerido: El trabajo requerido en esta Sección, comprende el

suministro de todo el material y mano de obra necesarios para la completa terminación de los acabados de pisos y bases indicados en los planos.

2. Calidad de los Materiales: El Contratista someterá al Inspector, para su aprobación y antes de la entrega de los materiales en la obra, muestra de cada tipo y color especificado o seleccionado, los cuales servirán de patrón del material con respecto a las muestras aprobadas, será causal de rechazo y el Contratista reemplazará a su costo las piezas que no cumplen con lo aprobado.

2.1. Todos Los acabados deberán tener la prueba de expansión del Laboratorio de Materiales de la Universidad Tecnológica de Panamá.

2.2. El material de los acabados de pisos y bases, serán de las características y dimensiones indicadas en los planos.

2.3. No se aceptarán desviaciones de tono mayores de las intrínsecas de la fabricación del material.

2.4. El material de las bases serán del mismo largo que las del acabado de piso, con una altura del nivel de piso de diez (10) centímetros, salvo que el fabricante indique otra cosa.

3. Materiales de Instalación:

3.1. El agua será limpia, fresca, libre de aceites, ácidos, sustancias alcalinas, materiales orgánicos y otras sustancias dañinas.

3.2. La arena estará limpia de granos duros, libres de polvo, material orgánico, arcilla, pizarras, álcalis, materiales blandos y escamosos.

3.3. El mortero debe tener las siguientes proporciones:

a) Paredes: 1 cemento – 3 arena – 1 pasta de cal.

b) Pisos: 1 cemento – arena

- c) Lechada: cemento blanco y agua
- 3.4. En caso de que para instalar el material de acabados de piso indicado en los planos, se requiera otro método se usará el especificado por el fabricante y de acuerdo a sus instrucciones.
4. Procedimiento de Instalación:
- 4.1. Piezas de Acabados de Pisos y Bases:
Se instalarán siguiendo las instrucciones del fabricante.
- 4.1.1. El mortero de adherencia, antes de ser asentado, será templado mediante la adición de una lechada a base de cemento. La misma será consistente, teniendo en cuenta que ha de mantenerse agitado todo el tiempo para evitar que ésta se asiente. Prepare cantidades que sean consumidas durante la siguiente hora.
- 4.1.2. Todas las piezas de baldosas de cerámica y pasta, deberán colocarse después de haberlas saturado por inmersión en agua, al menos debe transcurrir 6 horas sumergidas, antes de la colocación.
- 4.1.3. Se colocarán maestras y niveles para instalar las piezas, guardando relación con las escuadras que den las paredes del edificio. Los niveles serán determinados tomando en cuenta lo que señalan los planos de construcción.
- 4.1.4. La colocación de las piezas será perfectamente a nivel en las áreas interiores y con declives en las exteriores, sujetos a la caída de las aguas hacia los sumideros, desagües o finales de pisos.
- 4.1.5. Todas las piezas tendrán un asentamiento mínimo sobre el mortero de un 90% y serán comprimidas con macetas de caucho, cuyo tamaño tenga relación con el tamaño de las piezas. Evite el tráfico por veinticuatro horas. Las juntas entre piezas será de 1/16 de pulgada, salvo que se indique lo contrario en los planos.

- 4.1.6. Todos los cortes serán hechos con guillotinas o tranchas, cuando los mismos queden escondidos debajo de los zócalos. Sin embargo, los cortes vistos deben ser realizados con sierras eléctricas de discos de carburo de silicio, fabricado para estos fines. Todos los cortes serán lo más próximo posible a las paredes, de forma que los zócalos sean instalados de igual forma, lo más próximo a las paredes.
- 4.1.7. Las bases se colocarán con piezas especiales cuyo alto es de diez centímetros, y su espesor no mayor de 1.2 cm. Todas las esquinas o ángulos serán rematados con ángulo visto de 1 cm por lado, eliminando mediante un corte cuarenta y cinco (45) grados, el revés de las piezas.
- 4.1.8. De producirse cambios de nivel, serán realizados con piezas especiales, conocidas como piezas de escaleras. Estas piezas se utilizarán en los bordes vistos, tales como en los balcones, terminado con granulado de mármol, igual que en la superficie de la baldosa.
- 4.1.9. Terminada la colocación de los pisos, se rellenarán las juntas entre piezas con una lechada a base de cemento Pórtland de igual color que el fondo de las baldosas. Refiérase al fabricante para su preparación.
- 4.1.10. Las juntas entre pieza quedarán libres de los residuos del mortero de asentamiento. La primera vez se hará una hora después de haber sido asentada las piezas, la segunda vez se hará al preparar el área para ser lechada. Esta limpieza se lleva a cabo introduciendo un fleje acerado como el de la hoja de una segueta para cortar metales, removiendo con ella cualquier excedente de mezcla que haya quedado entre baldosas. Una vez terminado el procedimiento, VEINTICUATRO HORAS DESPUÉS proceda a barrer y lavar el piso, dejándolo limpio y húmedo. El piso estará listo ahora para ser lechado a la mañana siguiente.

4.1.11. Prepare la lechada en proporción de una parte de cemento Pórtland coloreado por una parte y media de agua. Revuélvase completamente, agitando sus componentes con un mezclador sobre el piso, esparciéndolo con un escurridor hasta que penetre en todas las juntas.

4.1.12. Prepare una segunda tanda para finalizar el relleno entre las juntas; esta vez con una proporción de una y media (1-1/2) partes de cemento Pórtland coloreado por una parte de agua. Proceda de la misma forma que antes, hasta completar el relleno de las juntas.

4.1.13. El tiempo que se emplee para la utilización de la lechada no debe exceder una hora. Si la lechada se va a dejar limpia, espere el tiempo necesario hasta que la misma tenga el temple adecuado.

4.1.14. Limpie espolvoreando el mismo cemento coloreado, en seco, y friccione las piezas con un trapo de algodón grueso. Limpie el mismo, cuantas veces sea necesario, barra el área terminada con un escobillón fino de cerda vegetal tipo Tampico. Humedezca el área dos horas después para evitar los efectos antes mencionados.

Cuando la lechada se va a dejar sobre las piezas, porque las mismas serán posteriormente pulidas, proceda a remover el excedente con una llama de acero, asegurándose que todas las juntas queden llenas. Humedezca el área dos horas después para evitar los efectos antes mencionados.

Para completar el fraguado hidratado, mantenga las áreas húmedas los tres días subsiguientes.

5. Limpieza: Al terminar. El contratista procederá a limpiar completamente el área de trabajo, eliminando toda traza

de cemento, polvo o manchas de cualquier clase.

6. Juntas:

6.1. Juntas entre losa postensada:

6.2. Juntas horizontales en el acabado: En áreas grandes (mayores de 20 m²), se deben realizar juntas en materiales no rígidos (ejemplo, madera o masillas elásticas), para evitar levantamiento de las baldosas; las juntas perimetrales son obligatorias en todos los casos. Las figuras 3 y 4, muestran como deben ser las juntas de piso.

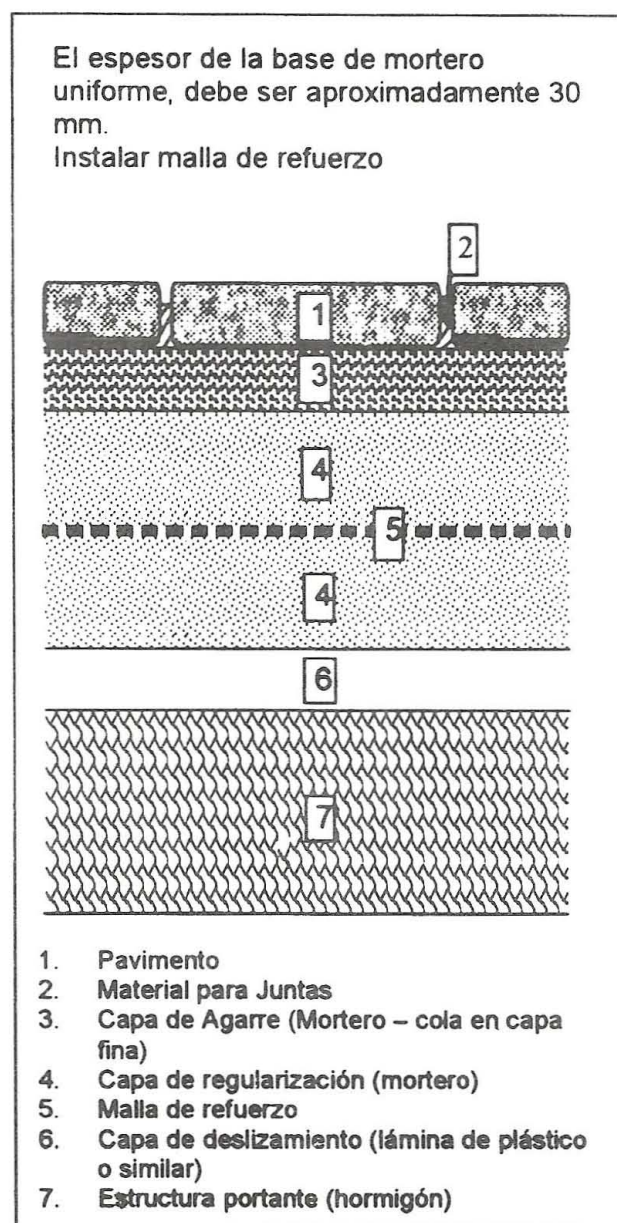
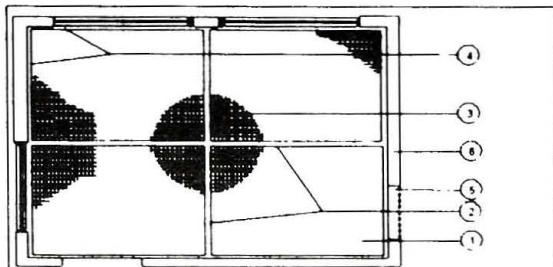


Fig. 3. Juntas entre Losa Postensada



- 1 Distribuir las zonas a pegar en áreas aproximadamente de 20 m² (cuadrados o rectangulares)
- 2 Juntas de dilatación de 5 mm de ancho entre las zonas llenas con material elástico o plástico
- 3 Juntas de expansión de 2 mm de ancho entre los azulejos
- 4 Juntas de dilatación de 3 a 5 mm de ancho contra todos los muros perimetrales
- 5 Posibles ajustes en los umbrales con piezas de madera
- 6 Muros de corre perimetrales

Fig.4 Distribución de juntas (Planta azulejos tiles)

Referencias

- [1] Handbook for Ceramic Tile Installation. The Tile Council of America. USA. P14. (TCA)
- [2] Procedimiento técnico: Aplicación de Azulejos Cerámicos en zonas interiores. Comité Técnico Asesor. CAMACOL. Antioquia. Colombia.
- [3] Ceramic Floor and Wall Tile Performance and Controversies. Published by EDI.CER. S.P.A

LA GESTIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN AMBIENTES DE INGENIERÍA Y FABRICACIÓN BAJO PEDIDO; UN ENFOQUE DE EMPRESA VIRTUAL.

Delva Batista de Chambers
Francisco Sastrón Baguena

RESUMEN

Este artículo presenta un nuevo modelo de arquitectura para la gestión de la producción en ambientes de Ingeniería y fabricación bajo pedido (ETO/MTO), con base al soporte de las tecnologías evolucionarias y revolucionarias en materia de información y comunicación para la integración entre organizaciones participantes en una empresa virtual.

Palabras claves: Gestión de la producción, fabricación bajo pedido, ingeniería bajo pedido, empresa virtual, fabricación a medida.

1. Introducción

La gestión de la producción se reconoce hoy día como una herramienta que ofrece grandes ventajas competitivas a una empresa. En las últimas dos décadas (80 y 90), ha obtenido un gran reconocimiento por su papel estratégico en las organizaciones y ha sido empleada para atender las operaciones eficazmente, utilizando innovadores métodos, técnicas y herramientas que han permitido a las empresas competir en aspectos tales como precio, costo, calidad, servicio y tiempo de entrega.

Chase [Chase99] define gestión de la producción (*Operations Management*) como "el diseño, la operación y el mejoramiento de los sistemas de producción que crean los bienes y/o servicios básicos de las empresas". El campo de acción de la gestión de la producción en el marco de ésta definición está dirigido a atender las funciones de la gerencia de línea en una empresa.

Este marco de acción de la gestión de la producción es un sistema en el que los insumos son transformados en un producto o servicio. Estos insumos son en realidad los recursos con que cuenta el sistema para operar; por ello algunos autores lo denominan "recursos operacionales".

Entre los recursos operacionales se pueden mencionar: la materia prima, los

clientes, un producto semi-terminado o terminado que provenga de otro sistema, la información, una orden de producción, etc. Los recursos operacionales consisten en lo que se ha denominado las cinco "P" de la gestión de la producción: **P**ersonas, **P**lantas, **P**artes, **P**rocesos y el **S**istema de **P**lanificación y **C**ontrol. [Motoa2000]

La gestión de la producción implica problemas sumamente complejos, los cuales están apoyados por dos pilares básicos: la planificación y el control de la producción.

Esta puede verse como un proceso jerárquico diferenciado por niveles, que se extiende desde las funciones de planificación hasta las del control de las actividades de producción. La Figura 1 muestra la distinción entre estos niveles, destacando que la diferencia se haya en el horizonte de planificación empleado y en el nivel de detalle usado para representar la información de planificación. Browne distingue los siguientes niveles:

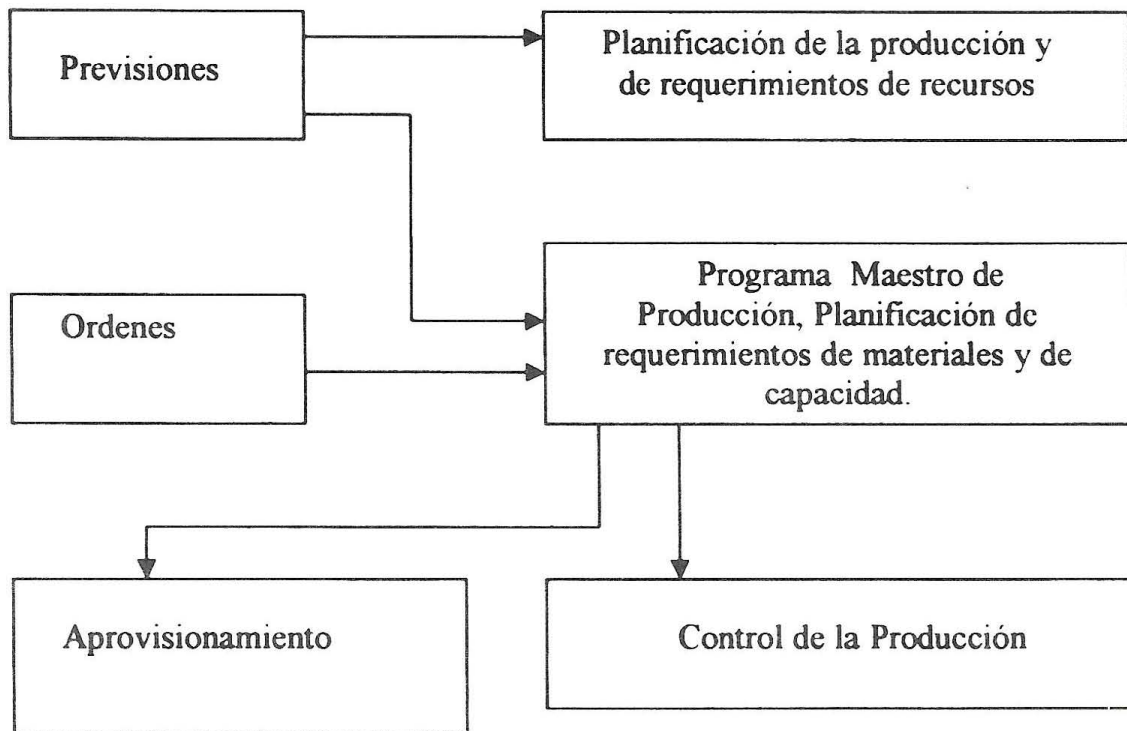
- La planificación de requerimientos de recursos productivos, que es el estudio cuantitativo de requerimientos en términos de personal, recursos físicos, inventario, recursos financieros, El plan de producción agregado para los planes de aprovisionamiento de recursos financieros, las nuevas

fábricas y las grandes, subcontrataciones-outsourcing.

- El plan maestro de producción MPS, incluye la construcción y determinación de los requerimientos de capacidad y de materiales. Este plan es parte de la función de logística de medio plazo y se encarga de

compensar los pedidos y los pronósticos con la disponibilidad de material y capacidad. El plan de materiales es un programa detallado recomendado tanto para la compra como para el lanzamiento de órdenes de fabricación.

Figura 1. Jerarquía del Sistema de Gestión de la Producción



- Los aprovisionamientos y las actividades de control de la producción: alimentados por el plan de materiales son niveles inferiores, pero que pueden también alimentar y facilitar niveles superiores de planificación. [Browne88]

abarca muchas actividades. Cuatro categorías pueden destacarse en estas industrias, que generalmente se tipifican como "tipos de ambientes de producción". En la siguiente sección se presentan estas categorías.

2. Tipos de Ambientes de Producción

Son cuatro los tipos más comunes en que se clasifican los sistemas o ambientes de producción: Fabricación contra inventario (Make-to-Stock), Fabricación bajo pedido

En cada nivel el proceso de decisión debe ponderar entre dos fuerzas opuestas que son la prioridad de lo que debe ser producido y la capacidad disponible para producirlo. La industria de la fabricación

(Make-to-Order), Ingeniería bajo pedido (Engineer-to-Order) y Ensamble bajo pedido (Assemble-to-Order).

Existen algunas otras formas de nombrar estos tipos de ambientes de producción, que autores, estudiosos del tema y desarrolladores de *software* de producción, le dan a esta clasificación, tales como Ship-to-Order (Embarque bajo pedido), Build-To-Order (Fabricar bajo Pedido) y One-Of-a-Kind (Ingeniería bajo pedido), Available-To-Promise (ATP).

A continuación se presenta una revisión de estas estrategias de producción.

2.1. Fabricación contra inventario (*Make-to-Stock*)

La Fabricación contra inventario, también conocida como "*Make-to-Stock*" (MTS) es la típica producción en línea o en cadena, en la cual la producción corresponde a un alto volumen pero de una gama pequeña de productos. El grado de repetición es alto, se utiliza maquinaria especializada, pero la mano de obra no necesita un alto grado de especialización. Se caracteriza por lo siguiente:

- Productos estándares elaborados según pronóstico
- Se trabaja con catálogos que describen la configuración: partes, componentes y especificaciones del producto.
- Los productos se despachan a los clientes desde el inventario
- Las principales tareas del control de la producción son: la determinación del pronóstico por productos finales y la preparación de un plan de producción para estos productos considerando la disponibilidad de capacidad restringida.
- Las órdenes de trabajo para piezas o artículos sobre un muy bajo nivel en la estructura del producto, pueden ser

derivados directamente desde el plan de producción para los productos finales.

2.2. Ensamble bajo pedido (*Assemble-to-Order*)

El Ensamble bajo pedido (ASO) es la llamada producción por lotes, donde se producen volúmenes medios de productos, siempre y cuando exista la previsión de nuevos pedidos, lo cual se determina en función de la demanda. Entre sus principales características podemos mencionar las siguientes:

- Existe una amplia variedad de productos finales estándares.
- Los productos finales son ensamblados para órdenes del cliente desde ensambles estándares y componentes.
- Las principales tareas del control de la producción son la determinación del pronóstico de "piezas o artículos" y órdenes específicas del cliente de productos finales; el control de la producción de la parte dirigida por pronóstico es similar a *Make-to-Stock*, y para las "piezas o artículos" que no pertenecen a una orden específica del cliente, se prepara un plan de producción y un pronóstico.
- Las órdenes de trabajo para "piezas o artículos" sobre un muy bajo nivel en la estructura del producto, pueden ser derivados directamente desde el plan de producción para los productos finales.

La decisión de aceptar la orden del cliente inicia la producción del producto final; para esta decisión es necesario verificar la disponibilidad de piezas o artículos obtenidos mediante pronóstico y la capacidad para acordar una fecha de terminación, que debe ser monitoreada para el control del progreso de la misma.

2.3. Fabricación bajo pedido (*Make-to-Order*)

La fabricación bajo pedido, trata de una amplia gama de productos en pequeñas cantidades cada uno, pero que se empiezan a producir a solicitud de un cliente. Este tipo de producción utiliza mano de obra especializada y maquinaria más general. Las principales características de la fabricación bajo pedido son las siguientes:

- No lleva inventarios de bienes terminados
- Elabora cada pedido del cliente conforme se necesita
- Existe una gran cantidad de posibles configuraciones del producto
- Existe una pequeña probabilidad de anticipar las necesidades exactas del cliente.

2.4. Ingeniería bajo pedido (*Engineer-to-Order*)

La Ingeniería bajo pedido es aquella en la que se hace bajo pedido el desarrollo del producto y la planificación de la fabricación, así como la fabricación en sí. Los proyectos de ingeniería bajo pedido, son un buen ejemplo de este tipo de situación de producción, que trata la producción singular (única) de grandes bienes para los cuales se incluye el desarrollo completo del diseño, el cual es sólo válido para ese producto concreto.

En este tipo de ambientes de fabricación se destacan como características más relevantes las siguientes: [Vollman97]

- Pueden darse una gran gama de configuraciones de un producto, dando origen a una variedad y cantidad de restricciones a satisfacer.

- Se opera en un alto nivel de incertidumbre y existe una baja probabilidad de poder anticipar los requerimientos del cliente, ya que la puesta en marcha de la Programación Maestra de la Producción, no se puede realizar de una manera tan directa, porque la definición y diseño del producto se realizan sobre la marcha conforme se fabrica el producto (o sea que se está fabricando el producto y aún no se ha completado su definición y diseño).
- El producto no está especificado total y técnicamente en el momento en que se acepta la orden del cliente.
- Se lleva a cabo una red de tareas agregadas, basándose en las especificaciones gruesas de la orden del cliente: [Vollman97]
- Se estima el "lead time" para cada tarea agregada y el uso de las capacidades críticas.
- Se programa la red agregada y se promete la fecha de terminación.
- Basados en las especificaciones de cada tarea agregada se elabora una red de actividades detalladas (fecha de inicio y fin).
- Se libera la programación detallada al taller.
- El control de la producción es más complejo, ya que se requieren decisiones específicas para cada una de las situaciones.
- El punto de control más importante es la acumulación de pedidos.

Nuestro trabajo está orientado principalmente, a la Ingeniería bajo Pedido (ETO) que es aquella en la que se hace bajo pedido el desarrollo del producto y la planificación de la fabricación, así como la fabricación en sí, y a la fabricación bajo pedido (MTO), que es una especie de

modalidad de la ETO, ya que una vez fabricado un producto singular, único mediante ETO, el proceso de ingeniería y diseño, si se solicitara el mismo producto, serviría para la fase de MTO en una posterior sesión de fabricación.

La Figura 2 muestra nuestra área de interés en el marco de las estrategias de producción, la complejidad del producto y los factores de integración de tecnologías de la información, tal y como lo presentan Jagdev y Szirbik [Jagdev2001].

Todo lo anterior, nos hace considerar la necesidad de establecer sistemas de información, que puedan responder a las necesidades de pequeñas y medianas empresas e incluso de gran escala, para la fabricación o desarrollo de un proyecto, en este tipo de ambientes (ETO/MTO), en los cuales la diversidad no solo por sus características, sino también de sus requerimientos en la gestión de la producción, hace que se tienda a la creación de alianzas entre los diferentes actores o participantes en la ingeniería y fabricación del proyecto o producto. [Lee 97]

Cada vez más, cobra mayor importancia, la necesidad de integrar, de enlazar a las empresas en redes virtuales, que les permitan compartir habilidades y destrezas y subsanar las debilidades en torno a los actuales sistemas de gestión de la producción que no se ajustan a sus necesidades básicas, debido que se maneja mucha y diversa información, que debe intercambiarse y compartirse y que tiene que cumplir con características de calidad (oportuna, completa, resumida, gráfica, veraz, segura, etc.). [Afsarmanesh97b]

Creemos que el paradigma de empresa virtual, es un eficaz marco de referencia de aplicación en este tipo de industria, porque este enfoque induce a considerar modelos que no representan lo clásico, lo tradicional, pues le da tanto importancia a la parte tecnológica como a los aspectos

organizacionales, sociales y de integración empresarial, que son los conceptos que nos permiten encontrar el límite entre las distintas situaciones de producción en una industria.

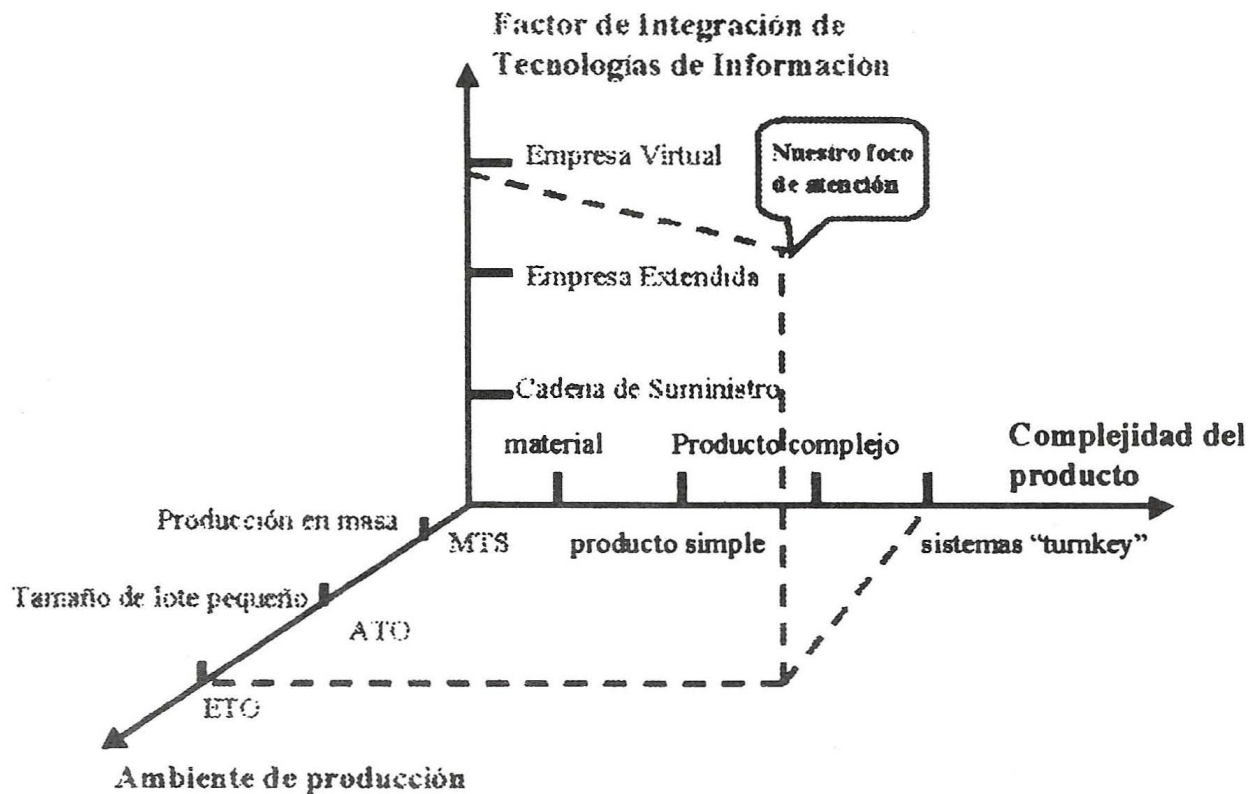
3. Avances de la tecnología informática en la gestión de la producción

La gestión de los modelos de fabricación mixtos tales como *Make To Stock*, *Assembler To Order*, *Make To Order*, *Engineer To Order*, *Flow Manufacturing*, etc., permite en los diferentes casos cuyo soporte informático a la gestión de la producción, en la actualidad se encuentra en los llamados sistemas GPAO (Gestión de la Producción Asistida por Ordenador), también llamados sistemas MRP II (*Manufacturing Resources Planning*) y ERP (*Enterprise Resource Planning*), tiene grandes limitaciones en la actualidad, para el soporte adecuado de la gestión de la producción en ambientes ETO/MTO.

El mencionado soporte informático de los MRP tradicionales, se orienta fundamentalmente a industrias de fabricación repetitiva, con unas estructuras de producto y demanda de los mismos mínimamente estables, que permiten abordar tareas de planificación de acopios (aprovisionamiento) y de uso de capacidad de fabricación.

Desde el punto de vista teórico, tres son los tópicos, que se considera de suma importancia tratar en esta sección para tener un marco referencial del tema con el propósito de establecer dónde encaja la Ingeniería y Fabricación bajo pedido; los sistemas de gestión de la producción asistidos por ordenador/MRP, más profundamente; y los sistemas "*Leitstand*" (sistemas "*Scheduling*").

Figura 2. Marco de las estrategias de producción, la complejidad del producto y los factores de integración de tecnologías de la información. [Jagdev2001].



3.1. Avances Evolucionarios

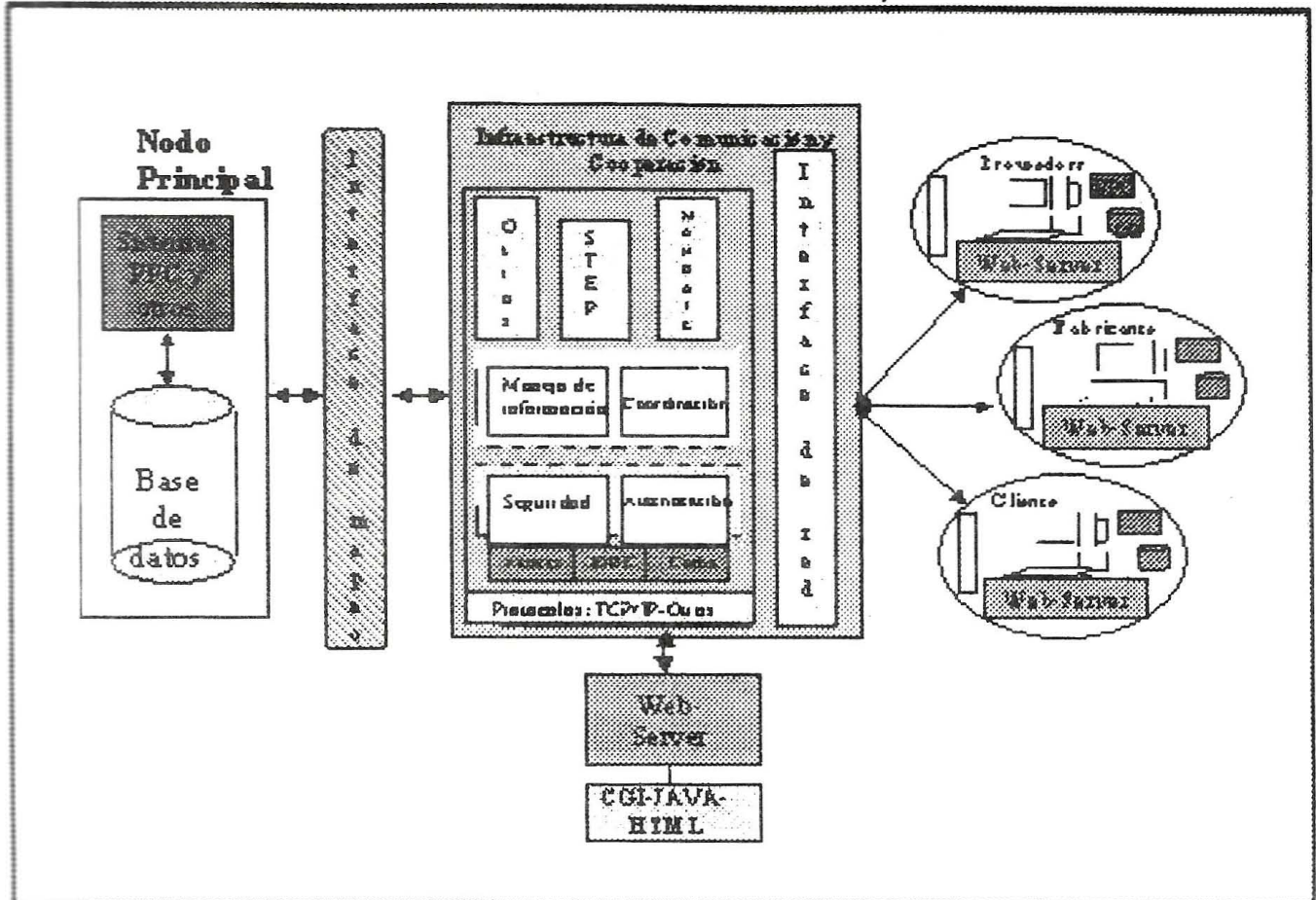
Los avances evolucionarios de la tecnología informática en la gestión de la producción contempla los sistemas MRPII/ERP. La información recopilada en una investigación realizada anteriormente [Chambers98], incluye los paquetes principales de GPAO: SAP R/3/78666 y BaanERP y de los sistemas *Leitstand* (*scheduling*), el Sistema AHP, por ser uno de los mejores en su género.

Si bien es cierto que existe una gran cantidad de paquetes de esta naturaleza, consideramos SAP R/3 y BaanERP, como los que más se aproximan al enfoque de las situaciones de producción ETO/MTO, aunque como veremos más adelante, también tienen sus limitaciones.

El análisis de estos paquetes, también se basó en las referencias que de ellos se hace en la mayoría de los artículos relacionados con el tema que nos ocupa y la gran incidencia que tienen en la industria [SoftSelect97], [Manufacturing Systems97]. Sin embargo, cuando los sistemas MRP/ERP son aplicados a ambientes bajo pedido no ofrecen buenos resultados, dado que utilizan capacidad; sin embargo son útiles y válidos como una base de información para la empresa.

Creemos que el paradigma de empresa virtual, es un eficaz marco de referencia de aplicación en este tipo industria (ETO/MTO), porque este enfoque induce a considerar modelos que no representan lo clásico, lo tradicional, pues le da tanto importancia a la parte tecnológica como a los aspectos organizacionales, sociales y

Figura 3. Modelo del Sistema en el marco de la empresa virtual



de integración empresarial, que son los conceptos que nos permiten encontrar el límite entre las diferentes situaciones de producción en una industria.

La Figura 3 muestra el esquema que concebimos como un modelo que conjugue como un trinomio casi perfecto los tres aspectos más relevantes de la problemática presentada: Tópicos de Gestión de la Producción, las Tecnologías Informáticas y la respuesta a un mundo globalizado que requiere soluciones en tiempo real. La propuesta de un ambiente virtual basado en tecnologías de información y comunicación de vanguardia, que permita gestionar toda la cadena del valor con eficacia.

Estos tipos de sistemas pueden compartir información y sus plataformas de integración deben ser capaces de manejar las transacciones (intercambio) de información a través de ambientes heterogéneos (hardware y sistemas

operativos diferentes, sistemas propietarios, entre otros), que traspasan los límites de la empresa y enlazan las operaciones de diferentes organizaciones; con una concepción flexible de la integración de datos para una visualización del estado de las operaciones a todo lo largo de la cadena logística, desde el suministrador de materiales al cliente final.

Todos los expertos están de acuerdo en que el principal cambio y el de mayor impacto en la sociedad ha sido el explosivo crecimiento de Internet y las tecnologías y aplicaciones relacionadas con ella.

La Internet está cambiando la forma como las empresas operan, la forma como la gente trabaja y la forma como esta tecnología soporta las operaciones de negocios y también, las actividades de los usuarios finales.

4. Conclusiones

Los avances tecnológicos en informática y comunicaciones habidos en el último cuarto del siglo XX y muy especialmente en la última década, han desencadenado una gran revolución económica e industrial. Han surgido nuevos mercados y en muchos de los existentes las empresas han tenido que adaptarse a las nuevas condiciones y cambiar drásticamente su forma de operar.

Entre las consecuencias de esta revolución se encuentra la aparición de nuevos paradigmas de organizaciones interempresariales, destacando los de empresa virtual y empresa extendida. Estos avances en las IT y la alta competitividad entre las empresas, demandan sistemas de información para la gestión de la producción, que atraviesen los límites de la empresa, diferentes a las opciones que generalmente existen en el mercado como las diversas redes de ordenadores y aplicaciones propietarias, que elevan los costos de implantación de los sistemas de información y también del mantenimiento. Una solución sin duda alguna es el enfoque de empresas virtuales.

Es casi seguro, que en un corto plazo, el sector de las empresas involucradas en los grandes proyectos de ingeniería va a evolucionar hacia nuevos escenarios basados en el paradigma de la empresa virtual, en los que como ya se ha dicho antes, los sistemas de información van a jugar un papel preponderante.

Entre las empresas que se ven afectadas por estos nuevos escenarios, se encuentra la industria ETO/MTO, debido a que adolecen de un bajo nivel de informatización en las actividades de la gestión de la producción. Primero porque una propuesta en este escenario, requiere la consideración de todos los procesos y actividades relacionadas y también de todos los actores internos y externos involucrados en los mismos. Segundo porque debe ser lo suficientemente flexible para integrarse con los sistemas de información propios de cada empresa participante.

Los sistemas MRP/ERP de hoy, presentan muchas mejoras en cuanto al apoyo que brindan a la gestión de la producción en términos generales, y también en el tema específico que nos ocupa: la ETO/MTO y la Planificación y control de la producción, si se comparan con los MRP tradicionales, sin embargo si son aplicados a ambientes TO-ORDER no ofrecen buenos resultados, dado que utilizan capacidad; sin embargo son útiles y válidos como una base de información para la empresa.

Referencias Bibliográficas

- [1] [Afsarmanesh97b] Afsarmanesh, Hamideh. Virtual Enterprises and Federated Information Sharing. ESPRIT PRODNET II. 1997.
- [2] [Jagdev2001]. Jagdev, H. and D.K. Thoben. Anatomy of Enterprise Collaborations, Journal of Production Planning and Control. 2001.
- [3] [Lee97] Lee, H. L. Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. et al., Management Science, 43(4):546 - 558, 1997.
- [4] [Vollman97] Vollman, Thomas E., Berry, William L., Whybark, D. Clay. Sistemas de Planificación y Control de la Fabricación. Tercera Edición. Editorial Irwin, 1997.

Autores: Delva Batista Mendieta de Chambers, Profesora Titular y Vicerrectora de Investigación, Posgrado y Extensión de la Universidad Tecnológica de Panamá. Ingeniera Industrial y Candidata al Doctorado en Ingeniería Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Francisco Sastrón Baguena, Doctor Ingeniero Industrial y Profesor Titular del Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial, División de Ingeniería de Sistemas y Automática del ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid.

LA INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN LA AGROINDUSTRIA PANAMEÑA: MODELO DINÁMICO DE LAS AGROCADENAS

Humberto R. Álvarez A., Ph. D.
Profesor de Ingeniería Industrial y Director
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales
Universidad Tecnológica de Panamá

RESUMEN

Una agrocadena se puede definir, de manera general como la secuencia de actores y actividades que permiten que los productos agrícolas y pecuarios lleguen a los puntos de demanda después de una serie de procesos que añaden valor a dicho producto. Es por esto que se hace necesario entender como el sistema "agrocadena" funciona y estudiar los efectos que cambios en políticas, reglas o características tienen sobre todo el sistema. Para esto se propone en este proyecto utilizar metodologías que permitan delinear flujo de información, actividades y decisiones, y sus influencias en los diferentes componentes del sistema, así como entender toda la dinámica que se desarrolla dentro de la agrocadena.

En la ponencia se presentará una propuesta de modelo integrado de la agroindustria nacional, considerando los diferentes elementos, fuerzas impulsoras y elementos moderadores del mismo, así como una propuesta de modelo dinámico que permita analizar, en futuras investigaciones, el efecto de las mismas sobre componentes específicos del modelo.

Palabras claves: Agrocademas, sistemas sociales complejos, dinámica de sistemas

ABSTRACT

The agrochain can be generally defined as the sequence of actors and activities that allow agricultural products to reach demand points. It is because of this definition that it is necessary to understand how the agrochain system functions and to study how changes in policies, rules of characteristics will affect the system. A system dynamic simulation model for the agrochain is proposed to define the information, activities and decision flows and their influences within the elements of the system. The model will help in understanding the dynamics involved in the agrochain.

This paper proposes an integrated model of the national agroindustrial system as an important element of the agrochain and how it affects all the components of this chain from a systemic approach.

Keywords: Agrochain, complex societal systems, system dynamics.

Antecedentes y Objetivos del Proyecto:

El mundo actual presiona a las organizaciones y personas a cambiar continuamente para poder mantenerse al ritmo de la nueva sociedad de la información que nos domina. Este cambio se debe más que nada a la influencia de los avances tecnológicos que han hecho que el mundo se convierta en un sistema dinámico de cambios constantes que obligan a crear e innovar constantemente para poder sobrevivir en el mismo.

Para los países en vías de desarrollo, la agricultura se ha convertido, no solamente en su medio de subsistencia, sino en una oportunidad para aprovechar ciertas ventajas competitivas propias de sus zonas geográficas para entrar en mercados mundiales. Aún así, la CEPAL [1] concluye que en la región latinoamericana, a medida que el Producto Interno Bruto Agrícola (PIBA) aumenta, el ingreso per cápita de su población disminuye (figura 1).

En otras palabras, aunque la agricultura es fundamental en la economía de los países en vía de desarrollo, su impacto en la economía global de dichos

Panamá, por otro lado, es un país pequeño, con un área total de 78,200 km² donde 2,210 km² corresponden a agua y el resto, 75,990 km² a superficie terrestre.

Su población estimada a julio del 2004 es de un poco más de 3 millones de habitantes con una edad promedio de 26 años. De acuerdo a los indicadores de desarrollo del Banco Mundial [2], Panamá tiene una tasa de crecimiento de 1.31% con una expectativa de vida de: 72 años. Nuestro nivel de alfabetización es del 92% y el ingreso per cápita es de B/.4,000.00. Estos indicadores, hacen que de acuerdo al Global Competitiveness Report [3, 4], Panamá esté considerada como la economía número 58 del mundo. El mismo reporte, considera que la sostenibilidad del crecimiento económico hace también que Panamá se considere como el país número 59 del mundo en competitividad de los negocios.

Panamá no se ve aislado del efecto decreciente de la agricultura en la economía. De acuerdo a datos del Ministerio de Economía y Finanzas, los servicios y la industria manufacturera, de construcción y servicios marítimos representan más del 90% del Producto Interno Bruto, mientras que la agricultura contribuye en un 7% al PIB nacional. Por otro lado, las exportaciones agrícolas representan el 22% de las exportaciones totales, unos 174 millones de balboas. En la figura 3 es posible apreciar que más de la mitad de las exportaciones son de banano, rubro que se ve cada vez más afectado por problemas de mercado, costos y calidad. Adicionalmente, La generación de empleo presenta una tendencia negativa, siendo que desde 1997 al 2000, se han perdido 20, 000 empleos [5].

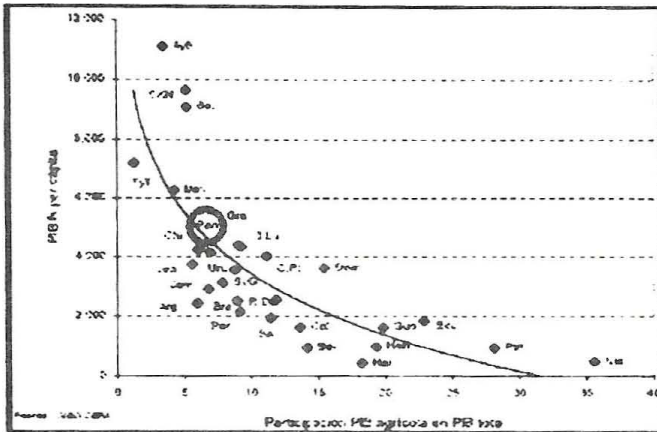
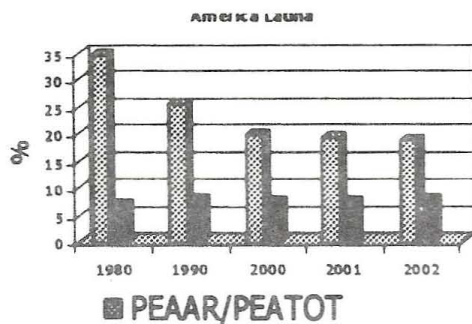


Fig. 1 PIBA vs. Ingreso Per cápita países va disminuyendo paulatinamente.



De igual manera, tal y como se aprecia en la figura 2 [1], aunque la agricultura ha sido una fuente de empleos relevante en estos países, es posible apreciar, según fuentes del Banco Mundial, que el número de personas empleadas ha ido disminuyendo significativamente con el paso del tiempo a pesar de que el PIBA se ha mantenido relativamente constante durante dicho intervalo de tiempo.

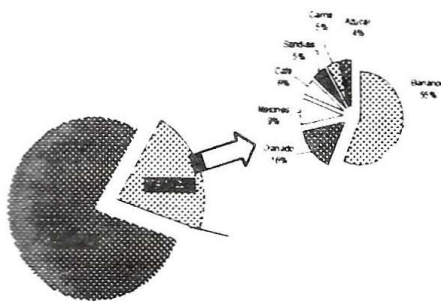


Figura 3 Exportaciones agrícolas de Panamá, año 2002.

De acuerdo al mismo Banco Mundial [2], Panamá es el sexto país en el mundo con mayor diferencia en la distribución de los ingresos. En nuestro país el 20% más rico de la población recibe el 62,7% del ingreso, el 20% más pobre recibe menos del 2%, donde el 10% más rico consume más de B/. 6,500 al año, el 10% más pobre solo consume alrededor de B/ 200.00. En nuestro país 4 de cada diez panameños no tienen recursos para sobrevivir dignamente y en el campo, 6 de cada 10 personas son pobres donde en las áreas indígenas 9 de cada diez son pobres. Aun más, el 71% de

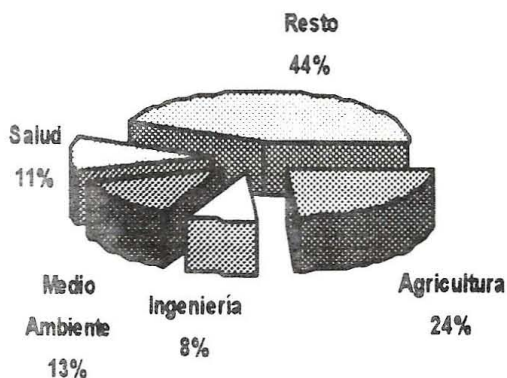


Fig. 4 Gasto en I + D

los pobres rurales son pequeños agricultores donde el 24,4%, de los niños padecen de desnutrición y en las indígenas 50,5%. Aun así, cerca de una cuarta parte del gasto en I + D panameño va dirigido hacia la investigación agrícola (figura 4).

Finalmente, datos de CEPAL (figura 5 [1]) muestran como Panamá muestra déficit tanto como exportador de productos básicos como de alimentos procesados, siendo en este rubro más crítico este déficit, donde solo un equivalente del 10%

	EXP/IMP Alimentos	EXP/IMP Total rural
Argentina	24,2	12,5
Brasil	2,8	4,2
Chile	0,6	2,7
Colombia	0,5	1,9
Ecuador	0,4	3,4
Perú	0,1	0,7
Venezuela	0,1	0,2
México	0,2	0,7
Panamá	0,3	0,8
América Latina	1,1	1,8

Fig. 5. Balance de Agroexportaciones de Panamá vs. la región

del valor del producto importado se exporta.

Por lo tanto Panamá debe posicionarse de nuevos segmentos y actividades que le permitan sostener e impulsar la actividad económica y el empleo, evolucionando de productos genéricos hacia productos más especializados y hacia actividades con la generación de mayor valor agregado. La agro exportación no tradicional, ha mantenido un crecimiento importante, pero basado en productos genéricos, donde hace falta una agroindustria oportuna para el desarrollo tanto de nuevos productos que tengan entrada a los cada vez más exigentes mercados, pero a la vez para el uso de subproductos, productos de desecho o productos rechazados que pueden convertirse en fuentes de ingresos importantes. Así, es posible afirmar que el sub sector agroindustrial (pequeñas, medianas y grandes agroindustrias y la agroexportación) está llamado a constituirse en factores de desarrollo para el sector agropecuario, con efecto e impactos socioeconómicos favorables para el país.

Sánchez y López [6] definen agroindustria como:

"Aquella actividad económica ligada al territorio, donde la materia prima de origen agrícola, ganadera, acuícola o forestal, alimentaria o no alimentaria, es procesada, dándole un valor agregado para su posterior comercialización, con el apoyo de factores involucrados al sistema

como son: la capacitación, asistencia técnica, leyes, mercadeo y financiamiento”

De acuerdo a diagnósticos realizados a la agroindustria rural panameña ([8], [9]), los principales problemas que enfrentan las empresas agroindustriales rurales, sean estas alimentarias o no alimentarias, en Panamá, en orden de importancia son: maquinaria y el equipo, falta de capital de trabajo, de instalaciones e infraestructura, comercialización y materia prima. Por otro lado, de acuerdo a Sánchez y López [6], la agroindustria es el eslabón de la cadena de producción al que se le ha prestado menor atención, ya sea por falta de definiciones, reglas claras de juego, incentivos, cultura empresarial, objetivos, mercados, o una combinación de todas ellas. Afirman las autoras que hay que identificar claramente aquellas empresas líderes, empresas con capacidad de llegar a triunfar y ser líderes y a aquellas empresas con capacidad de subsistir pero no de crecer, a fin de poder lograr objetivos y políticas de desarrollo claramente definidas.

Así, este proyecto busca presentar la agroindustria como un elemento clave dentro una cadena completa donde el inicio de la misma se da en el campo, con el producto básico y el final de ésta se encuentra con el consumidor final pasando por una serie de procesos y actividades de transformación, empaque. Esta agrocadena, se puede definir de manera más exacta como la secuencia de actores y actividades que permiten que la oferta llegue a los puntos de demanda. Por otro lado, las agrocadenas se pueden ver como organizaciones permanentes formales o informales de actores e instituciones relacionadas

El objetivo primordial de este proyecto es el de poder modelar el sistema del agronegocio, o agrocadena, como un sistema complejo, utilizando metodologías avanzadas de modelado que permitan expresar de manera clara la dinámica de las agrocadenas de una manera integrada, considerando los diferentes eslabones que

forman la cadena y las variables que afectan cada uno de dichos eslabones.

A fin de alcanzar los objetivos propuestos en este proyecto, y considerando las características de complejidad de las agrocadenas, se aplicarán metodologías multidisciplinarias para la solución de problemas sociales complejos para describir y modelar de manera genérica las agrocadenas y poder definir, estudiar, entender y predecir sus comportamientos debido a la introducción de variabilidades controladas y no controladas que influyan el modelo.

De manera específica el proyecto buscará explicar de una manera holística:

- ¿Hasta qué punto la dinámica de sistemas puede modelar las agrocadenas de manera genérica?
- ¿Cómo la dinámica del comportamiento de los diferentes elementos de la agrocadena afecta el comportamiento de la misma?
- ¿Qué tanto de la variabilidad del modelo se debe a variables controlables?
- ¿Cuáles son las relaciones principales que modelan el comportamiento de las variables y componentes que forman la agrocadena?

Es por esto que se hace necesario entender como el sistema "agrocadena" funciona y estudiar los efectos que cambios en políticas, reglas o características tienen sobre todo el sistema. Para esto se propone en este proyecto utilizar metodologías que permitan delinear flujo de información, actividades y decisiones, y sus influencias en los diferentes componentes del sistema, así como entender toda la dinámica que se desarrolla dentro de la agrocadena.

Metodología:

En las agrocadenas existen factores que afectan la competitividad que no permiten

cambios aislados. Estos factores pueden externos, internos, estratégicos, tácticos, operativos, etc., pero hacen de las agrocadenas sistemas sociales altamente complejos.

Un sistema social complejo se puede definir en función a ciertas características [9]:

- La respuesta a las decisiones y acciones en sistemas sociales complejos es no lineal
- Los efectos raramente son proporcionales a sus causas
- Los resultados son localmente diferentes en el sistema a pesar de tener un objetivo global
- Son resistentes a cambios
- Tienen la capacidad de reconfigurarse a si mismo en nuevas formas después de un cambio o decisión dramática

En tal sentido, DeTombe [10] desarrolla una metodología para la solución de problemas sociales complejos (COMPRAM) basada en los métodos cuantitativos tradicionales pero incorporando etapas y procesos orientados hacia la investigación de sistemas complejos. La figura 7 describe gráficamente este proceso. De acuerdo a lo presentado en la figura, las tres primeras etapas son típicas de cualquier proceso o metodología formal de investigación, donde se define el problema, se justifica el mismo y se estudia la literatura a fin de adquirir conocimientos y entender lo que hasta el momento se ha hecho al respecto. Adicionalmente, se generan las hipótesis, proposiciones, preguntas, etc.

En la cuarta etapa de la metodología propuesta por DeTombe [10], las islas o áreas de conocimiento que deben interactuar en el análisis y solución del problema social. Esta etapa es muy importante ya que los estudios a problemas sociales complejos deben ser de manera integral, multidisciplinaria y utilizando un enfoque sistémico.

Una vez definidas las etapas anteriores inicia el desarrollo del modelo del sistema social complejo a fin de poder conocer sus características, complejidades y comportamientos bajo condiciones controladas experimentales.

A fin de lograr el desarrollo de dicho modelo, DeTombe recomienda la aplicación de la dinámica de sistemas como herramienta. La dinámica de sistemas es una herramienta que permite representar de una manera más dinámica los aspectos fluctuantes de la toma de decisiones. Hace posible entender las relaciones entre el

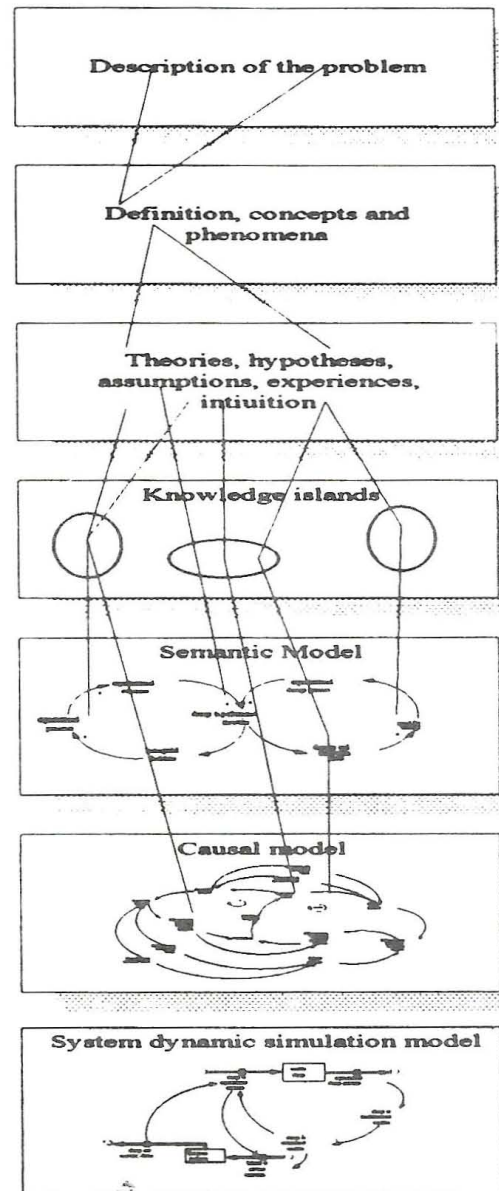


Fig. 7 La Metodología COMPRAM

contexto de la decisión, los comportamientos asociados y los posibles resultados y su efecto en el sistema. Para entender como el sistema social complejo funciona, la dinámica de sistemas utiliza diagramas que delinean el flujo de información, actividades y decisiones, y sus influencias en los diferentes componentes

del sistema, y que permiten, como resultado, estudiar los efectos que cambios en políticas, reglas o características tienen sobre todo el sistema.

Coyle [11] afirma que la dinámica de sistemas es la rama de la Teoría de Control relacionada con los sistemas socio-económicos y la controlabilidad de los mismos. Forrester [12] es el padre de la dinámica de sistemas aplicada al comportamiento organizacional como herramienta para la investigación de las características de la información de retroalimentación en sistemas organizacionales y el uso de modelos como guía para el rediseño de organizaciones

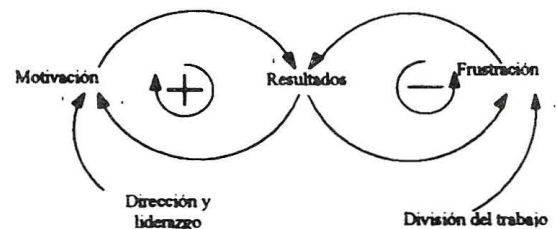
El objetivo de la dinámica de sistemas [13] es el de ayudar entender la interacción de las variables críticas que dominan un sistema social en función del tiempo, la interacción total del sistema y su ambiente, explicando las complejidades que aparecen envueltas en los procesos de cambio organizacional y toma de decisiones y mostrar como los sistema funcionan utilizando diagramas que delinean el flujo de información, actividades y decisiones, y sus influencias en los diferentes componentes del sistema. Se compone de diagramas de lazo y flujos y acumulaciones.

Los diagramas de lazo (figura 8a) son diagramas causa-efecto muestran de manera sencilla modelos mentales acerca de las estructuras y estrategias del sistema. Implican la retroalimentación de la información y las relaciones existentes entre los elementos de toma de decisión, los resultados y la retroalimentación

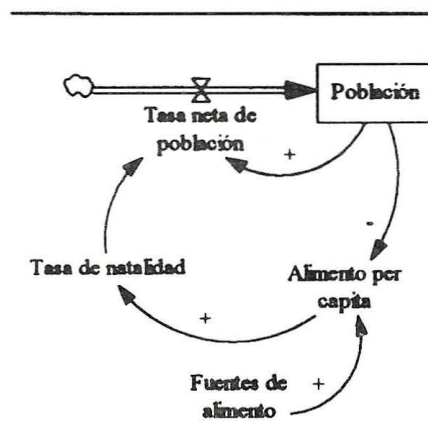
Por otro lado los flujos y acumulaciones (figura 8b) caracterizan el estado del

sistema mostrando entradas y salidas de flujo en cierto momento. Adicionalmente:

- La no linealidad se representa a través de flujos y acumulaciones o stocks
- Son los elementos que generan inercia
- Son fuentes de retrasos
- Crean desequilibrios dinámicos al desacoplar el flujo dentro del sistema
- Proveen la base para acciones y decisiones en la modelación



a) Diagramas causales o de lazo



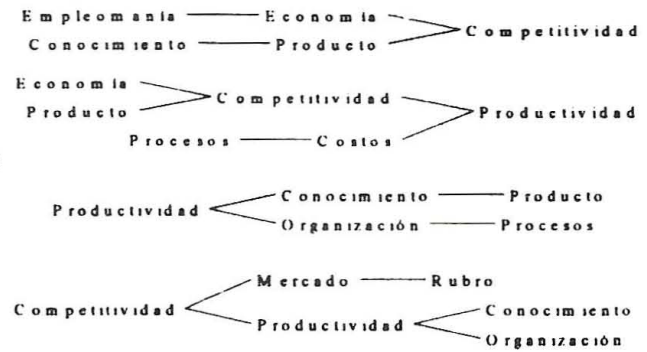
b) Flujos y acumulaciones

Fig. 8 Componentes de la dinámica de sistemas

En la etapa del modelo semántico, se tratará, a través de palabras y modelos gráficos y mentales de mostrar la percepción de los actores principales de las agrocadenas sobre sus características, elementos, procesos y otros aspectos de



Fig. 10 Ejemplo del modelo causal



Así, por ejemplo Jang y Klein (2002) definen la utilidad que tenga un productor asociado a una cooperativa o grupo de productores como:

$$f(n) = p_0Q - (p_0 - p_1) \frac{D_1}{n} - p_0 \int_0^{Q-D_1/n} \Phi(x) dx$$

Sin entrar en mayores detalles, esta expresión es función de precios de mercados, demanda y la probabilidad de producción de la asociación o cooperativa. Por otro lado, los autores muestran que la demanda de cierto producto depende de cierta función acumulada de probabilidad $\Phi(x)$ que es a su vez función tanto de los precios, como de los costos por inventario, envíos y otros costos asociados tal que:

$$D = \Phi^{-1} \left(\frac{s - p_2}{h + s} \right)$$

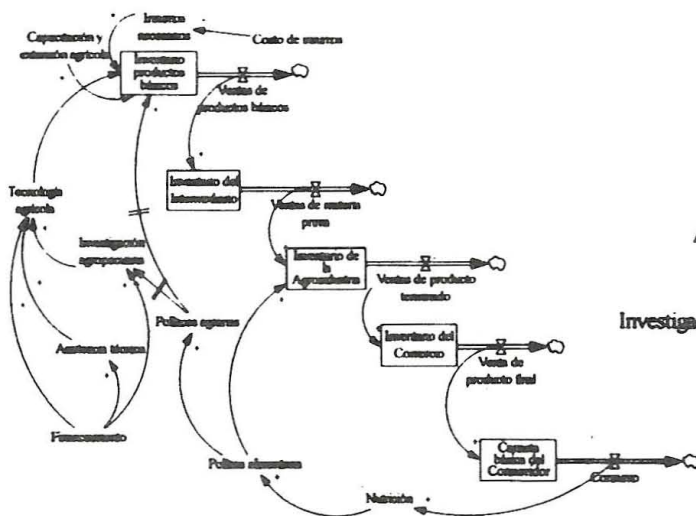


Fig. 11 Ejemplo del modelo dinámico

En esta etapa del proyecto se utilizan técnicas cuantitativas y computacionales a fin de poder definir estas expresiones para definir las diferentes relaciones cuantitativas que rigen el modelo de manera genérica y siguiendo los procesos causales identificados en la etapa anterior. Siguiendo la metodología propuesta por DeTombe [10] se presenta una primera aproximación del modelo de simulación utilizando sistemas dinámicos utilizando la variable inventario como variable de salida del modelo. En este caso se considera esta variable en vista de los efectos que el inventario tiene tanto en la cadena total de suministros de productos a lo largo de la agrocadena, como por sus efectos en los costos directos e indirectos del productor.

Un aspecto importante en la metodología de este proyecto es la validación del modelo. La validación del modelo no es más que verificar que los resultados del modelo se ajustan a los resultados de la vida real de la cual el modelo fue tomado [15]. Ahora bien, por las características de los modelos de dinámica de sistemas, estos tienden a ser incompletos y parcialmente subjetivos [16]. Por lo tanto, la validación del modelo se hará más que nada en función a su aplicabilidad, sus estructuras internas de los comportamientos resultantes y no a su robustez matemática o estadística.

Resultados esperados:

Al finalizar este proyecto se espera:

- Definir las variables principales que influyen las relaciones entre los diferentes componentes de las agrocadenas.
- Entender de manera holística las relaciones existentes entre las variables que controlan y que resultan en las agrocadenas y los diferentes componentes de las mismas.
- Demostrar el papel estratégico que tiene la agroindustria dentro de las políticas de desarrollo de las agrocadenas.
- Un modelo de dinámica de sistema que permita entender dichas relaciones e influencias.

El modelo una vez obtenido servirá a los tomadores de decisiones para desarrollar políticas y ejecutar planes y acciones que permitan:

- Identificar problemas que afectan la competitividad y el crecimiento de eslabones y de la cadena en su conjunto
- Identificar acciones y políticas que ayuden a superar los problemas y a mejorar el funcionamiento de las cadenas

- Calcular precios, costos y utilidades a lo largo de la cadena
- Identificar causas de las diferencias entre el precio al productor y el precio pagado por el consumidor
- Evaluar posibilidades productor aumente participación valor agregado que genera la cadena
- Y en general, analizar la capacidad de la cadena para estar presente en los mercados en forma duradera.

Para terminar, siendo la agroindustria el elemento de la agrocadena al que menor atención se le ha puesto, este proyecto ayudará a identificar claramente su papel de integrador de la cadena, añadiendo valor a los productos y procesos que se dan a lo largo de la misma. A través de este tipo de investigación se promueven los cambios de cultura empresarial y gubernamental, promoviendo a su vez nuevos modelos empresariales, procesos de innovación organizacional, tecnológica y gubernamental asegurando la disponibilidad alimentaria local e internacional a través de políticas integrales que promuevan no solamente la disponibilidad sino la independencia, al menos parcial, de mercados sujetos a los vaivenes de políticas y comportamientos fuera del control de los productores, agrocadenas y el gobierno nacional.

Nota: Este proyecto ha sido sometido a la consideración de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Panamá (SENACYT) dentro de la convocatoria 2005-2006 del Programa de Fomento a la Investigación y Desarrollo

Referencias

- [1] Junguito, R. (2005), *La agricultura de América Latina: Desafíos y Oportunidades*. Conferencia presentada en la IV Conferencia Regional de FORAGRO, Panamá 5 de abril de 2005.

- [2] Banco Mundial (2004), *Panama at a glance*
http://www.worldbank.org/cgi-bin/sendoff.cgi?page=%2Fdata%2Fcountrydata%2Faag%2Fpan_aag.pdf
- [3] World Economic Forum (2003)a *Global Competitiveness Report*,
http://www.weforum.org/pdf/Gcr/Growth_Competitiveness_Index_2003_Comparisons
- [4] World Economic Forum (2003)b *Global Competitiveness Report*,
http://www.weforum.org/pdf/Gcr/Business_Competitiveness_Index_Porter
- [5] Ministerio de Economía y Finanzas de la República de Panamá *Indicadores Económicos y Sociales 1995 – 2000*
- [6] López, K y B. Sánchez. (2005) *La Agroindustria. Modelo Conceptual Y Perspectivas De La Actividad En Panamá*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Industrial. Universidad Tecnológica de Panamá
- [7] Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (2002) *Diagnóstico de la Agroindustria Rural Panameña*. CEPIA – Universidad Tecnológica de Panamá – IICA
- [8] González, L. (2005) *Análisis De La Situación Actual De La Agroindustria No Alimentaria En Panamá*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Panamá
- [9] Álvarez, H (2002) *A Diagnostic Investigation And A Corrective Model For Implementing Change In Response To Innovation*. Disertación Doctoral, Universidad de Missouri, Columbia, Estados Unidos.
- [10] DeTombe, D. J. (2001) "Compram, A Method for Handling Complex Societal Problems," *European Journal of Operational Research*, v. 128, n. 2, pp. 266-261.
- [11] Coyle, R. G. (1996) *System Dynamics Modeling: A Practical Approach*, Chapman and Hall, New York.
- [12] Forrester, J. W. (1961) *Industrial Dynamics*, The M. I. T. Press – Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc., U. S. A.
- [13] Zayas-Castro, J. L., T. J. Crowe y H. Alvarez (2002) "Organizational Change: A Case for More Systematic and Dynamic Modeling," *Proceedings of the 2002 Annual Industrial Engineering Research Conference*, Institute of Industrial Engineers, Orlando, Florida, May 18-22, 10 pages, CR-ROM published.
- [14] Jang W., y C. Klein (2002) "Supply Chain Models for Small Agricultural Enterprises," *Proceedings of the 2002 Annual Industrial Engineering Research Conference*, Institute of Industrial Engineers, Orlando, Florida, May 18-22, 6 pages, CR-ROM published.
- [15] Vennix, J. A. M. (1996) *Group Model Building. Facilitating Team Learning Using System Dynamics*, John Wiley Sons, New York.
- [16] Klabbers, J. (2000) "Learning as Acquisition and Learning as Interaction," *Simulation & Gaming*, v. 31, n. 3, September, pp. 380-406.

DISEÑO DE UNA PIERNA ROBOTICA CON ACCIONAMIENTOS NO LINEALES

Rony Caballero
Universidad Tecnológica de Panamá

RESUMEN

En este artículo se demuestra que la utilización de accionamientos no lineales en las articulaciones de una pierna robótica, puede mejorar sustancialmente la eficiencia energética de la misma. Esta clase accionamiento pueden compensar más efectivamente las fuerzas inerciales y gravitatorias que otras realizaciones clásicas, además de contar con propiedades de auto-frenado al acercarse a las restricciones cinemáticas propias de la articulación.

INTRODUCCIÓN

Los robots bípedos son sistemas dinámicos complejos usualmente con doce o más grados de libertad. Uno de los principales problemas relacionados con el control de este tipo de sistemas, es proveer la estabilidad en apoyo monopodal, con la ayuda de accionamientos motorizados en las articulaciones. Estos accionamientos, no solamente deben brindar la energía necesaria para estabilizar el sistema frente a perturbaciones externas, si no que también deben compensar las fuerzas gravitatorias, inerciales y de fricción propias del ciclo de locomoción.

Los accionamientos motorizados más comunes en la robótica son los de razón de transmisión constante [Hiroshi et al.]. En este diseño, las fuerzas resultantes del proceso de locomoción, se compensan con ayuda de transmisiones mecánicas con una alta relación de reducción y motores de alta potencia. En muchos casos, este enfoque deriva en accionamientos pesados y de alto consumo energético, lo que obliga a sacrificar las capacidades cinemáticas del robot seleccionando motores de menor potencia y transmisiones con mayor relación de reducción.

Sin embargo, la utilización de accionamientos con relación de transmisión no lineal a demostrado mejorar el desempeño de muchos sistemas electromecánicos [Akinfiyev, Armada., 1998], [Akinfiyev et al., 1999], [Peshkin et al., 1999],

[Van De Straete, De Schutter, 1999], [Akinfiyev et al., 2000]. En este artículo, se analiza la factibilidad de utilizar un accionamiento no lineal, formado por un motor y una transmisión cinemática no lineal cuya relación de reducción varía en función de la posición angular del accionamiento. Adicionalmente, se evalúa el desempeño de este accionamiento en comparación con un motor con relación de transmisión constante.

EL MODELO DEL PÉNDULO INVERTIDO

Algunos investigadores [McMahon, 1984][Furushu, Masubushi, 1987][Alexander, 1994] sugieren que el cuerpo humano durante la locomoción se comporta como un péndulo invertido. Esto se debe principalmente a que durante el apoyo monopodal el muslo y la pantorrilla son casi colineales en la pierna de soporte, y a que el centro de masa del cuerpo pasa aproximadamente por el centro de la cadera. Esta aproximación tiene las siguientes implicaciones de carácter práctico:

- El tobillo de la pierna de apoyo tiene que soportar el mayor par de carga efectivo de todas las articulaciones del cuerpo.
- Esta aproximación sugiere que debe existir cierta relación entre los ángulos de giro del tobillo y de la cadera respecto al par de carga presente en

dichas articulaciones en la etapa de apoyo monopodal.

- Si el peso de una pierna no es muy significativo en comparación con el resto del cuerpo, los pares ejercidos por las articulaciones de la pierna en fase de transferencia serán despreciables en comparación con los ejercidos por las mismas articulaciones en la fase de apoyo.
- Las velocidades de los ángulos de giro de las articulaciones en una misma pierna parecen ser mayores en la fase de transferencia que en la fase de apoyo.
- Los magnitudes máximas de par y velocidad angular no se dan simultáneamente. El par alcanza sus

valores máximos cerca de los límites del ángulo de giro de la articulación, mientras que la velocidad angular lo hace cerca del centro de la trayectoria del ángulo de giro de la misma.

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE ACCIONAMIENTOS PARA ROBOTS

Este trabajo se limitará al diseño de accionamientos formados por motores y transmisiones mecánicas. Si se consideran los accionamientos como fuentes de par ideal, las ecuaciones de velocidad, par, potencia y energía pueden escribirse de forma generalizada como:

$$\dot{q} = \frac{\omega(t)}{r} \quad \text{para } |\omega(t)| \leq \omega_{\max} \quad (1)$$

$$T_L = r\tau(t) \quad \text{para } |\tau(t)| \leq \tau_{\max} \quad (2)$$

$$P = \tau(t)\omega(t) + k_d\tau(t)^2 \quad (3)$$

$$E = \int_0^{t_0} P(t) dt = \int_0^{t_0} [\tau(t)\omega(t) + k_d\tau(t)^2] dt \quad (4)$$

donde r es la ventaja mecánica de una transmisión ideal (sin pérdidas), $\omega(t)$ es la velocidad angular en el eje del motor, ω_{\max} es la velocidad máxima soportada por la transmisión, $\tau(t)$ es el par de carga en el eje del motor, τ_{\max} es el par de carga máximo que puede suministrar el motor, P es la potencia eléctrica consumida por el motor, k_d es un a constante que relaciona $\tau(t)^2$ con las pérdidas por disipación de calor en el motor, y E es la energía consumida por el motor (considerando que el motor puede regenerar energía) durante el movimiento en el intervalo $[0, t_0]$.

DISEÑO CLASICO

En este enfoque se utilizan motores con transmisiones mecánica con relación de transmisión constante siguiendo los siguientes pasos:

1) Selección de la transmisión: La transmisión mecánica debe poder soportar el par de carga T_L y la velocidad ω_{\max} . La razón de transmisión debe calcularse como:

$$r = \frac{\omega_{\max}}{|\dot{q}|_{\max}} \quad (5)$$

donde $|\dot{q}|_{\max}$ es la velocidad máxima de salida de la articulación.

2) Selección del motor: Una vez seleccionada la transmisión se selecciona un motor que sea capaz de soportar un par límite τ_{lim} . Este par límite $\tau_{\text{lim},p}$ para un motor puede expresarse de acuerdo a una norma específica p de forma que la desigualdad siguiente se cumpla para todos los movimientos [Van De Straete, De Schutter, 1999]:

$$\tau_{\text{lim},p} \geq \|\tau(t)\|_p = \left\| \frac{T_L(t)}{\eta r} \right\|_p = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{T_L(t)}{\eta r} \right|^p dt \right)^{\frac{1}{p}} \quad (6)$$

donde η es la eficiencia de la transmisión y $\tau(t)$ representa el par producido por la corriente eléctrica del motor; si $p=2$, entonces $\|\tau(t)\|_2$ representa el par rms límite del motor y si $p=\infty$ entonces $\|\tau(t)\|_\infty$ representa el par de pico límite del motor. En el caso particular de máquinas caminantes, dado que es un proceso de naturaleza intermitente, normalmente se diseña utilizando la norma 2 primeramente y luego se verifica que no se viole el par de pico límite del motor.

El principal problema con esta técnica de diseño, es que no se puede aprovechar el hecho que durante el ciclo de locomoción el par y la velocidad no alcanzan sus máximos simultáneamente. Lo que normalmente deriva en accionamientos sobredimensionados de alto consumo energético o en accionamientos lentos con una alta relación de reducción.

HIPÓTESIS

En base a lo expresado anteriormente se propone, la siguiente hipótesis:

- Utilizar un accionamiento con una relación de transmisión variable mejorará el consumo energético sin sacrificar las capacidades cinemáticas de la articulación. Esta transmisión es función del ángulo de giro y define

una ventaja mecánica que alcanza sus valores máximos en los límites del ángulo de giro de la articulación y alcanza su valor mínimo en el centro de la trayectoria del ángulo de giro de la misma.

DISEÑO DE UN ACCIONAMIENTO CON RELACION DE TRANSMISIÓN NO LINEAL

Para diseñar este tipo de accionamiento, es necesario encontrar una función de transmisión que minimice el consumo energético. Esto puede lograrse si se minimiza la potencia disipada por el motor a lo largo del ciclo de locomoción:

$$P_d = Ri^2 = \frac{R}{k_t^2} \left(\frac{T_L}{\eta r} \right)^2 = \frac{R}{k_t^2 \eta^2} A_v^2 T_L^2 \quad (7)$$

para la restricción cinemática,

$$A_v \geq \frac{|\dot{q}|}{\omega_{\max}} \quad (8)$$

donde A_v es la inversa de la ventaja mecánica de la R es la resistencia del devanado del motor y k_t es la constante de par del motor.

Si se considera que la eficiencia de la transmisión η es independiente de la relación de transmisión, (7) minimiza la potencia disipada por el motor en la medida que, $A_v \rightarrow 0$, o que la ventaja mecánica $r \rightarrow \infty$. Por lo tanto, la función de A_v que minimiza la potencia consumida queda definida por:

$$A_v(t) = \frac{|\dot{q}(t)|}{\omega_{\max}} \quad (9)$$

Si la relación de transmisión fuese constante:

$$r = \frac{1}{A_v(q,t)_{\max}} = \frac{\omega_{\max}}{|\dot{q}|_{\max}} \quad (10)$$

lo que coincide con (5). La relación (9) sugiere la utilización de una relación de transmisión función del tiempo. No obstante, es importante destacar que el diseño mecatrónico de dicho accionamiento puede resultar muy complejo. Así, se propone la utilización de una relación de transmisión, que fuese únicamente función de la posición del ángulo de giro de la articulación. Esto lleva a una solución subóptima,

$$A_{v,so}(q) = \frac{|\dot{q}_{so}(q)|}{\omega_{\max}} \quad (11)$$

donde q es la posición del ángulo de giro de la articulación y $\dot{q}_{so}(q)$ es una función que cumple con la restricción,

$$|\dot{q}(t)| \leq |\dot{q}_{so}(q)| \leq |\dot{q}(t)|_{\max} \quad (12)$$

que permite aprovechar mejor el hecho que durante el ciclo de locomoción el par y la velocidad no alcanzan sus máximos simultáneamente. Existen, múltiples funciones $\dot{q}_{so}(q)$ que pueden sintetizarse mediante engranajes circulares, elípticos, bandas y mecanismos de barras, sin embargo, el análisis se limitará a transmisiones de accionamientos SMART (Special Mechatronic Actuator for Robots joints) los que pueden aproximarse por la siguiente función:

$$A_v(x) \approx k \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_0^2}} \quad (13)$$

para,

$$x_0 = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{2} + \alpha$$

$$x = q - \frac{q_{\max} + q_{\min}}{2}$$

que describe un perfil de velocidad sinusoidal en la articulación, al aplicar un perfil de velocidad constante en el eje del motor. Bajo este enfoque el accionamiento se diseña siguiendo los siguientes pasos:

1) Selección de la transmisión: Los parámetros α y k de la transmisión mecánica se diseñan para minimizar el par máximo reflejado sobre el motor:

$$\tau_{\max} = \left| \frac{k}{\eta} \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_0^2}} T_L \right|_{\max} \quad (14)$$

considerando la siguiente restricción cinemática:

$$\left(\frac{\dot{x}}{k} \right)^2 + \left(\frac{x}{x_0} \right)^2 \leq 1 \quad (15)$$

para,

$$x_0 = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{2} + \alpha$$

$$x = q - \frac{q_{\max} + q_{\min}}{2}$$

$$\dot{x} = \dot{q}$$

2) Selección del motor: Una vez seleccionado los parámetros de la transmisión se selecciona un motor que sea capaz de soportar los pares límite

$$\|\tau\|_{\lim_2} \text{ y } \|\tau\|_{\lim_\infty} :$$

$$\tau_{\lim_2} \geq \|\tau(t)\|_2 = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left| A_v(q(t)) \frac{T_L(t)}{\eta} \right|^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$\tau_{\lim_{\infty}} \geq \|\tau(t)\|_{\infty} = \left| A_v(q(t)) \frac{T_L(t)}{\eta} \right|_{\max} \quad (17)$$

COMPARACIÓN ENTRE AMBOS DISEÑOS

Ahora se hace necesario comparar la efectividad de los accionamientos no lineales (en este caso del tipo SMART) con los sistemas de actuación clásicos en el proceso de locomoción en condiciones

ideales (transmisiones sin pérdidas). Como se mencionó anteriormente, las leyes de movimiento de las articulaciones son de naturaleza oscilatoria y el cuerpo humano puede aproximarse a un péndulo invertido durante la marcha. Por lo tanto, como patrón prueba se elige un péndulo invertido excitado mediante una señal armónica que cumpla $\theta = \theta_0 \cos(\omega t)$, que no es más que el primer componente armónico de la trayectoria de movimiento del tobillo.

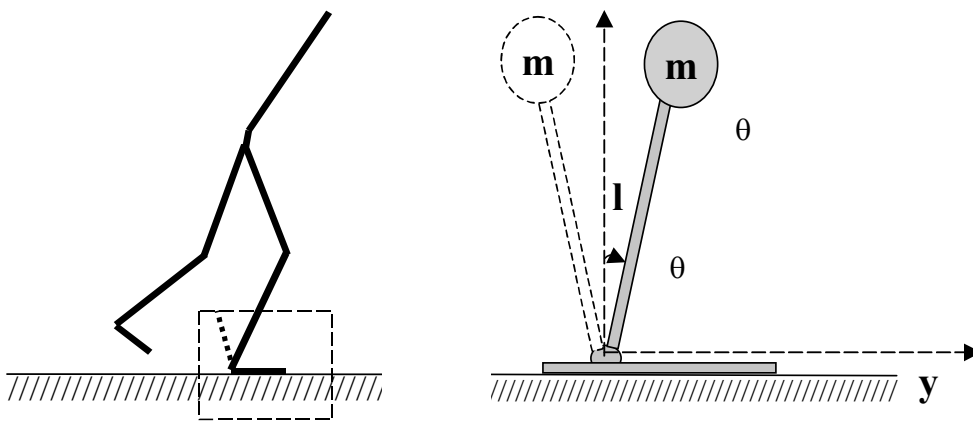


Figura 1. Modelo del péndulo invertido.

Como la trayectoria del movimiento es

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega t) \text{ entonces:}$$

$$\dot{\theta} = -\theta_0 \omega \sin(\omega t)$$

$$\dot{\theta}^2 = \theta_0^2 \omega^2 - \omega^2 \theta^2$$

$$\ddot{\theta} = -\omega^2 \theta$$

Además, el par de carga sobre la articulación del péndulo está dado por:

$$T_L = mgl \sin(\theta) + ml^2 \ddot{\theta}$$

Si θ es lo suficientemente pequeño, (21) puede aproximarse por:

$$T_L \approx [mgl - \omega^2 ml^2] \theta \quad (22)$$

Diseño Clásico: (19)

1) Selección de la transmisión: Aplicando (5), la razón de transmisión debe calcularse como:

$$r = \frac{\omega_{\max}}{\theta_0 \omega} \quad (21)$$

2) Selección del motor: Una vez seleccionada la transmisión se selecciona

un motor que sea capaz de soportar los pares límite $\|\tau\|_{\lim_2}$ y $\|\tau\|_{\lim_\infty}$:

$$\tau_{\lim_2} \geq \|\tau(t)\|_2 = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{\theta_0 w}{\omega_{\max}} T_L(t) \right|^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\|\tau_{\text{cla}}\|_2 = \left(\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\theta_0^2 w^2}{\omega_m^2} \right] [mgl - w^2 ml^2]^2 \theta^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\|\tau_{\text{cla}}\|_2 = \frac{|\theta_0 w|}{\omega_m} [mgl - w^2 ml^2] \left(\frac{w}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\|\tau_{\text{cla}}\|_2 = \frac{|\theta_0^2 w|}{\sqrt{2}\omega_m} [mgl - w^2 ml^2]$$

$$\tau_{\lim_\infty} \geq \|\tau(t)\|_\infty = \left| \frac{\theta_0 w}{\omega_{\max}} T_L(t) \right|_{\max}$$

$$\|\tau_{\text{cla}}\|_\infty = \frac{|\theta_0^2 w|}{\omega_m} [mgl - w^2 ml^2]$$

Diseño SMART:

1) Selección de la transmisión: Aplicando (14) y (15), los parámetros quedan como:

$$x_0 = \theta_0$$

$$k = \frac{\theta_0 w}{\omega_{\max}}$$

2) Selección del motor: Una vez seleccionada la transmisión se selecciona un motor que sea capaz de soportar los pares límite $\|\tau\|_{\lim_2}$ y $\|\tau\|_{\lim_\infty}$:

$$\tau_{\lim_2} \geq \|\tau(t)\|_2 = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{\theta_0 w}{\omega_{\max}} \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} T_L(t) \right|^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\|\tau_{\text{SMART}}\|_2 = \left(\frac{w}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\theta_0^2 w^2}{\omega_m^2} \right] [mgl - w^2 ml^2]^2 \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_0^2} \right) \theta^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\|\tau_{\text{SMART}}\|_2 = \frac{|\theta_0 w|}{\omega_m} [mgl - w^2 ml^2] \left(\frac{w}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_0^2} \right) \theta^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\|\tau_{\text{SMART}}\|_2 = \frac{|\theta_0^2 w|}{2\sqrt{2}\omega_m} [mgl - w^2 ml^2]$$

$$\|\tau_{\text{SMART}}\|_\infty = \frac{|\theta_0^2 \omega|}{2\omega_m} [mgl - \omega^2 ml^2]$$

$$\tau_{\text{lim}_\infty} \geq \|\tau(t)\|_\infty = \left| \frac{\theta_0 w}{\omega_{\text{max}}} T_L(t) \right|_{\text{max}}$$

Puede comprobarse que el par límite al que se ve sometido el motor, si utiliza una transmisión SMART es la mitad del par límite correspondiente a utilizar una transmisión clásica con razón de reducción constante, tanto para la norma 2 como para la norma ∞ . Esto se debe a que la transmisión SMART puede aprovechar el hecho de que durante el ciclo de locomoción los pares máximos y las velocidades máximas ocurren a posiciones de θ distintas, mientras que en la transmisión mecánica clásica esto no puede suceder.

Si se considera el consumo energético se puede demostrar que la potencia promedio perdida por efecto Joule está dada por:

$$\overline{P_{\text{per}}} = k \|\tau\|_2^2 \quad (23)$$

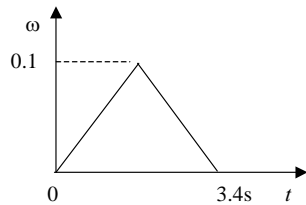


Figura 2. Perfil de velocidad triangular.

Ahora se procede a simular esto para un péndulo invertido con los siguientes parámetros: $m=1$, $l=1$, $g=-9.8$, $\theta_0=0.17$, $\omega_m = 100$. El plano de fase del perfil triangular de velocidad a la salida y

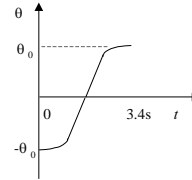
De manera que si se comparan las pérdidas promedio en ambos casos se tiene:

$$\frac{\overline{P_{\text{per_SMART}}}}{\overline{P_{\text{per_clas}}}} = \frac{k \|\tau_{\text{SMART}}\|_2^2}{k \|\tau_{\text{clas}}\|_2^2} = \frac{1}{4} \quad (24)$$

Esto significa que las pérdidas por efecto Joule en los accionamientos SMART pueden llegar a ser de hasta un 75% menos que las presentes en una transmisión mecánica con relación de transmisión constante. Este resultado comprueba la hipótesis inicial.

OTRAS COMPARACIONES

Es necesario contrastar los resultados con otro tipo de perfil. En este caso se comparan los resultados para un péndulo invertido, con el perfil de velocidad triangular, que es uno de los más utilizados en la generación de trayectorias.



entrada de las transmisiones puede verse en la figura 3, para el caso de una transmisión SMART y una transmisión clásica.

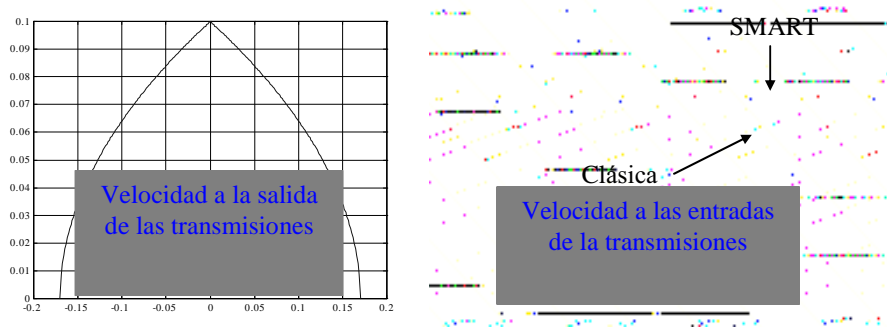


Figura 3. Perfil triangular de velocidad en el plano de fase a la entrada y salida de las transmisiones SMART y clásicas.

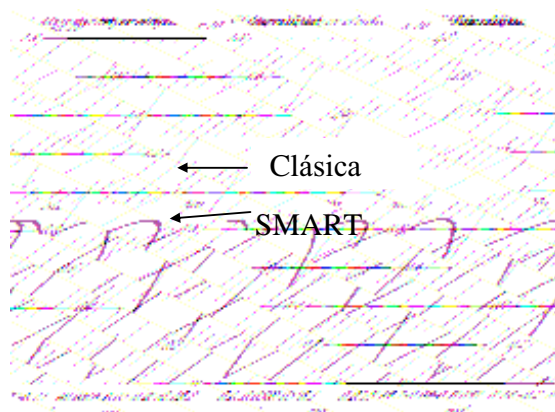


Figura 4. Par reflejado en el motor para transmisiones SMART y clásicas.

Como puede apreciarse el motor con transmisión SMART tiene la posibilidad de moverse a mayor velocidad que el motor con transmisión clásica. En la figura 4 es posible comparar resultados sobre los pares a la entrada de las transmisiones, es decir, sobre el eje del motor, y se puede apreciar que el par máximo de carga que debe soportar el motor es de casi un 50% menos para la transmisión SMART.

SIMULACIÓN DE LA TRANSMISIÓN MECÁNICA DE SMART UTILIZANDO ADAMS®

Las simulaciones anteriores han sido realizadas considerando que las

transmisiones no tienen pérdidas, además de utilizar un modelo aproximado (13) para SMART. Así que resulta muy apropiado hacer una simulación que utilice un modelo más exacto considerando efectos de fricción y pérdidas, y para tal fin se hace uso del software de simulación para sistemas dinámicos ADAMS®. Para la simulación con ADAMS® se considera otra vez un péndulo invertido con ciertos parámetros de carga, los efectos de fricción, y un mecanismo de barras que aproxime la transmisión SMART.

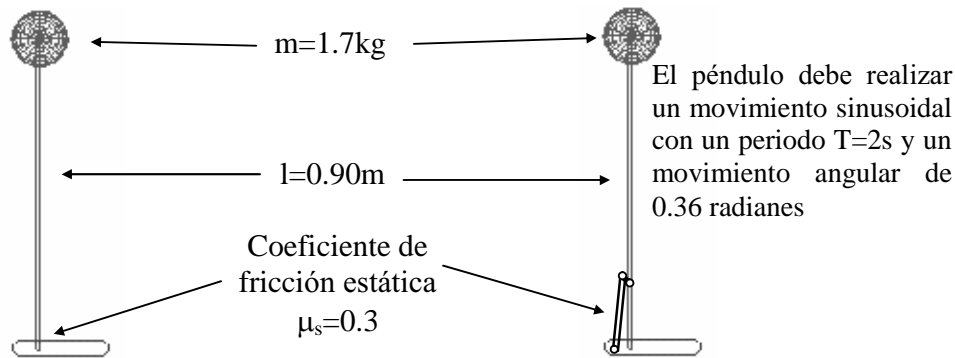


Figura 5. Parámetros de simulación en ADAMS® para dos péndulos excitados por una transmisión clásica y una transmisión SMART.

Los resultados de esta simulación en ADAMS® se presentan en la figura 6. En esta simulación se distinguen claramente las diferencias que existen a las entradas de ambas transmisiones. Los resultados correspondientes a la transmisión clásica son muy parecidos a los simulados anteriormente, con la diferencia de que ahora el par mínimo no es igual a cero por el efecto de la fricción estática. Pero los resultados correspondientes a la transmisión SMART también son bastante parecidos a los esperados. Se esperaba que la transmisión SMART necesitara un perfil de velocidad constante para generar

una onda sinusoidal, lo que se traduce en un rectángulo en el plano de fase, pero la realidad muestra que para el mecanismo propuesto se genera un cuadrilátero ligeramente asimétrico con las esquinas suavizadas. No obstante, esta aproximación demuestra ser muy buena, pues las ventajas de esta transmisión sobre la transmisión clásica son evidentes. Los pares reflejados a la entrada de la transmisión son mucho menores y el par máximo reflejado para la transmisión SMART es al menos un 40% menor que en el caso clásico.

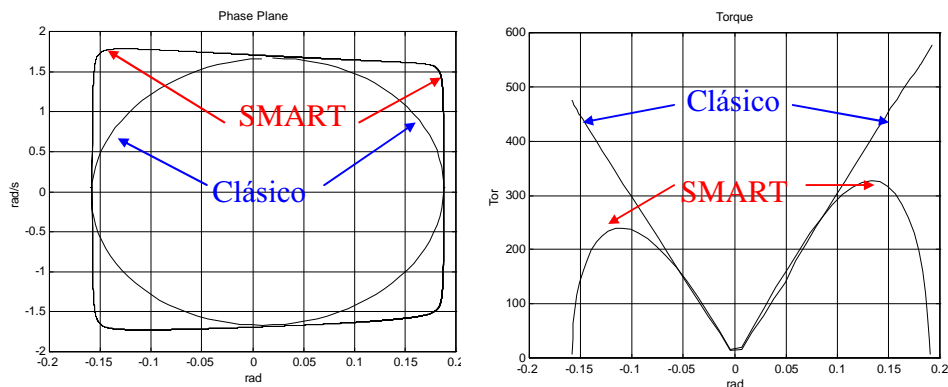


Figura 6. Resultados de la simulación en ADAMS® para las velocidades y los pares a la entrada de una transmisión clásica y una transmisión SMART.

CONCLUSIONES

Los accionamientos con relación de transmisión no lineal son una alternativa a considerar en el diseño de piernas robóticas. Además, cabe destacar que la no linealidad inherente a estos accionamientos no constituye un problema demasiado importante en el diseño del sistema de control, ya que este problema se resuelve satisfactoriamente con ayuda de sensores de posición tanto en el eje del motor como a la salida de la articulación. Así, a pesar de la aparente complejidad del diseño mecatrónico, los resultados experimentales demuestran que estos accionamientos llevan a diseños eficientes y robustos.

REFERENCIAS

- [1] **[Akinfiev, Armada., 1998]** T. Akinfiev, M. Armada. Resonance and quasi-resonance drive for start-stop regime. Proceedings of the 6th International Conference MECHATRONICS'98. Skovde, Sweden. Pergamon, pp. 91-96, 1998
- [2] **[Akinfiev et al., 1999]** T. Akinfiev, M. Armada, Caballero. Prototype of universal control for quasi-resonance drive. Proceedings of the Second International Conference on Climbing and Walking Robots. Porstmouth UK, Professional Engineering Publishing, ISBN 1 86058 207 9 , pp. 103-109, 1999-
- [3] **[Akinfiev et al., 2000]** T. Akinfiev, M. Armada, R. Caballero. Actuador para las piernas de un robot caminante. Spanish Patent Application P200002423
- [4] **[Alexander, 1994]** R. M. Alexander. *How Animals Move*. Tree Ferns © Paul Franklin/Oxford Scientific films. Maris Multimedia 1994.
- [5] **[Furushu, Masubushi, 1987]** J. Furushu, M. Masubushi. *A Theoretically Motivated Reduced Order Model for the Control of Dynamic Biped Locomotion*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. June 1987 Vol. 109. pp. 155-163.
- [6] **[Hiroshi et al.]** G. Hiroshi, K. Tomharu, H. Masato, N. Masao. Articulated structure for legged walking robot. Patent Number EP0433096
- [7] **[McMahon, 1984]** T. McMahon. *Muscles, Reflexes, and Locomotion*. Princeton University Press.1984
- [8] **[Peshkin et al., 1999]** C. Moore, M. Peshkin, J. Colgate. Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions. International Conference of Robotic and Automation 1999. Detroit 1999 pp. 3249-3254
- [9] **[Van De Straete, De Schutter, 1999]** Van De Straete H., Schutter J. Optimal time varying transmission for servo motor drives. Proceedings on the Tenth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms. IFToMM, Oulu University Press, ISBN 951-42-5287-X, Vol 5, 1999, pp. 2055-2062

RED NACIONAL DE MOVIMIENTOS FUERTES (RNMF) UTP: ACELERÓGRAFOS DENTRO DE EDIFICIOS Y A CAMPO ABIERTO EN PANAMÁ.

Lic. Jaime Toral Boutet, MSc (Investigador Especial)
Ing. Carlos A. Ho (Ingeniero investigador)

RESUMEN

La instrumentación sísmica en edificios es una técnica cuantitativa de vanguardia experimental utilizada en ciertas ciudades y muchos países del mundo. El Reglamento Estructural Panameño (REP) estableció obligatoriamente la "Norma de Instrumentación Sísmica". Desde 1999 la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) realiza la instalación y análisis de los acelerógrafos de todos los edificios que requieren instrumentación. La historia del desarrollo indica que el primero fue el edificio #1 sede Víctor Levy Sasso, UTP.

Evaluamos la contribución de información de los 36 edificios con acelerógrafos activos y monitoreando eventos sísmicos actualmente, resultado de la extracción de datos in situ. Debido a la dependencia de grandes proyectos solo en la ciudad de Panamá y que era requerido complementar los estudios dentro de los edificios, mezcla de respuestas del suelo y de las estructuras, al paso ondulatorio externo, se ha extendido el monitoreo a otras partes del país, conformando una Red Nacional de Movimientos Fuertes (RNMF). Con este tipo de parámetros básicos presentamos los primeros mapas de isosistas e iso-aceleraciones instrumentales en Panamá, el evento más fuerte hasta ahora en campo libre en David con 0.11g, y 0.13 g dentro de estructuras en Ciudad de Panamá. También, presentamos estimaciones de las frecuencias fundamentales y la amplificación sísmica del subsuelo bajo edificios en sitios instrumentados en Azuero.

Además, se están evaluando los niveles de aceleración entre el sótano y azotea, la duración de la aceleración efectiva a cierto nivel, y los desplazamientos orbitales en la cima de edificios según el historial e incremento del evento. También se transforman los acelerogramas temporales a modelos de respuesta espectrales (al 5 %) y se compararan con curvas de diseño para las zonas correspondientes. Se indica la forma de extraer el periodo fundamental de los edificios mediante la amplitud de Fourier (uni-axial) para los componentes transversales y longitudinales de las estructuras instrumentadas con registros de buena relación señal-ruido. También, el de los suelos con el radio espectral (Nakamura), ejes horizontales respecto al vertical.

Palabras Claves: Acelerógrafo, Acelerograma, Movimiento Fuerte, Microtremor, Espectro, Respuesta y Amortiguamiento.

ABSTRAC

The seismic instrumentation in buildings is a quantitative technique of experimental vanguard used in certain cities and many countries of the world. The Panamanian Structural Regulation (REP) obligatorily established the "Norm of Seismic Instrumentation". From 1999 the Technological University of Panama (UTP) makes the installation and analysis of the accelerograph of all the buildings that require instrumentation. The history of the development indicates that first #1 building was the head office Víctor Levy Sasso, UTP.

We at the moment evaluated the contribution of information of the 36 buildings with active accelerograph and monitoring seismic events, product of the extraction of data in situ. Due to the dependency of great projects only in the city of Panama and that was required to complement the studies within the buildings, combination of the ground response and the structures, to the external ondulatory behavior, the monitor to other parts of the country has extended, conforming a National Network of Strong Motion (RNMF). With this type of basic parameters, we presented the first maps of instrumental iso-accelerations in Panama, with the event more strongest free field until now is in David, Chiriqui with 0.11g, and 0,13g inside building in Panama City. In addition, we displayed estimations of the fundamentals frequencies and the seismic amplification of the subsoil below building in instrumented sites in Azuero.

In addition, the levels of acceleration between the basement and roof are being evaluated, the orbital duration of the effective acceleration, and displacements in the top of buildings according to the time history of the event. Also, the

accelerograms in the time domain are change to models of spectral response (to 5 %) and they were compared with curves of design for the corresponding zones. It is discussed, the form to extract the fundamental period of the buildings by means of the amplitude of Fourier for the transversal and longitudinal components of the instrumented structures with good signal to noise record, and the spectral radius (Nakamura) for the soils, horizontal respect the vertical.

Keywords: Accelerograph, Accelerograms, Strong Motion, Microtremor, Spectrum, Response and Damping.

1 INTRODUCCIÓN

La Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) a través del Centro Experimental de Ingeniería (CEI) es el ente responsable a nivel nacional de la administración de la Norma de Instrumentación Sísmica de Edificios, según lo establece obligatoriamente el Artículo 1.8.4 del Reglamento Estructural Panameño, REP 94. En este contexto, la función de la UTP consiste en certificar la ubicación y cantidad de acelerógrafos en un edificio según el diseño arquitectónico, el de aceptar la compra del instrumental por la empresa constructora, instalarlos y dar mantenimiento vitalicio. Paulatinamente recuperar y procesar acelerogramas, así como analizar la respuesta dinámica de los edificios instrumentados de contar con registros útiles. La realización de las tareas para aprobar tanto el permiso de construcción como el de ocupación ha sido principalmente con el Municipio de Panamá. En los últimos años, desde que entró en vigencia la Norma, en agosto de 1999, se ha logrado coleccionar una cantidad importante de registros entre los 37 edificios instrumentados en Ciudad de Panamá y 2 en David, a mediados del 2005.

Esta Norma de Instrumentación surge como inquietud de parte del Comité del Reglamento Estructural, elevada a la Junta Técnica (JTIA) de la SPIA, debido a la falta de información sobre el desempeño sísmico de los edificios altos, con losas postensadas y que son muy utilizadas en las edificaciones panameñas desde finales de la década de los 80. Existía incertidumbre entre los parámetros y materiales de los edificios rígidos de Panamá, considerando entre los objetivos el de conocer el desenvolvimiento dinámico de tales sistemas estructurales, y la manera en que las paredes arquitectónicas

interactúan con la estructura durante un fuerte sismo. Otro objetivo de gran relevancia es el de establecer y verificar los coeficientes sísmicos dados en el REP.

Dentro del desarrollo de proyectos de mega-edificios en todo el país, los más importantes se llevan a cabo en la Ciudad de Panamá. Debido a este crecimiento particularmente localizado, la normativa actual ha conducido a una alta densidad de instrumentación en estas áreas, y excluido prácticamente el resto del país.

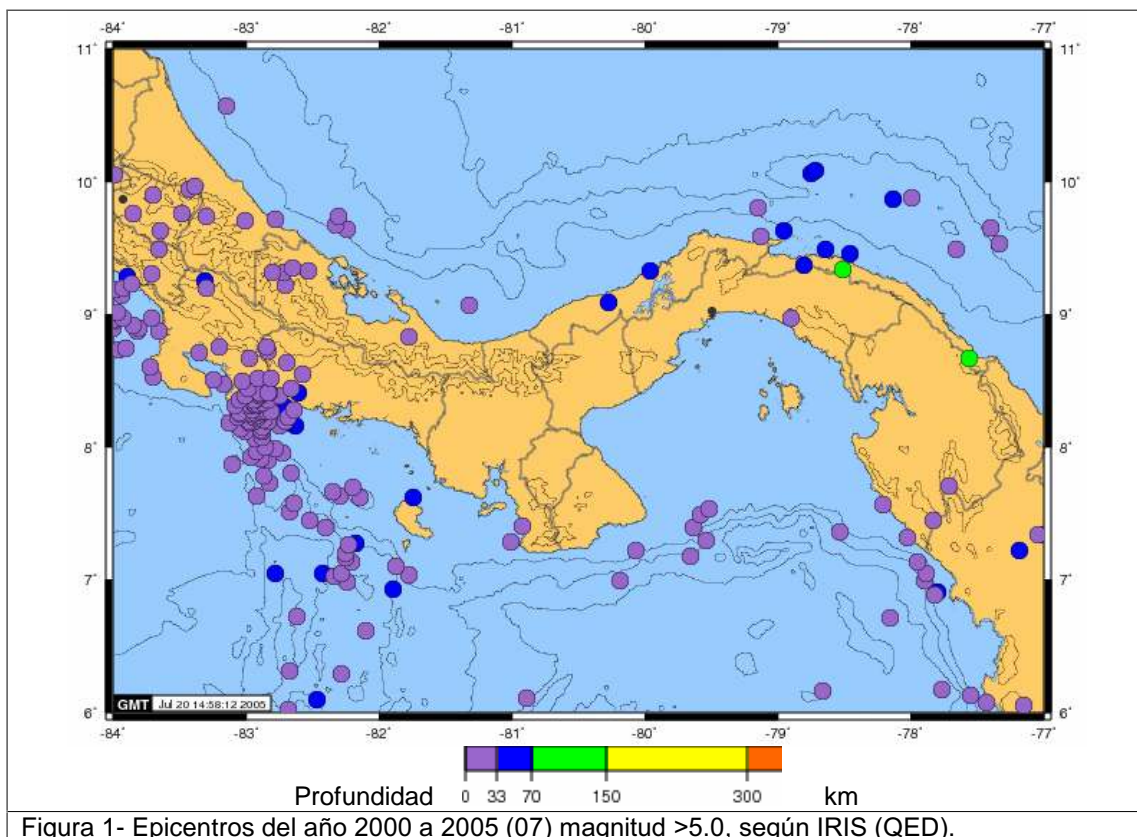
Por esto último y a que falta conocer en la propia Ciudad de Panamá la aceleración a más de 20 m entre edificios altos, el contenido de frecuencias y la variación en amplitud con la trayectoria, se requiere de una Red en Campo Abierto. Esta es necesaria ya que complementa el análisis de los edificios y permite a la vez coleccionar información sobre el tipo de fuente sísmica, propiedades particulares de su generación, más la dirección de los esfuerzos transitorios de sitio. Se contempla la necesidad del Campo Libre para abarcar una distribución espacial por áreas críticas de la energía esperada, estimar la absorción de aceleración por la corteza, y la duración significativa de los eventos, como factores tan importantes como el conocimiento de la respuesta de diseño.

Actualmente la Norma, con base legal, regula desde 1999 toda nueva construcción. Establece que debe colocarse 1 acelerógrafo en línea vertical según el número de plantas (≥ 15 a 20 niveles) o en función del área cerrada de construcción ($> 1/2$ Ha), y 2 acelerógrafos máximo en los extremos de un edificio ≥ 21 pisos, entre la base (sótano) y la última planta (azotea). Con esta Norma implementada por la FIC, y vigente con el CEI se ha logrado instalar a la fecha, 39 sitios entre centros comerciales

y edificios residenciales y de oficina. En total se operan 64 unidades instaladas, en un 50 % con un solo acelerógrafo, y el resto con dos. Todos los aparatos están activos y monitoreando permanentemente eventos sísmicos no usualmente percibidos ni sentidos por la población. Se le da mantenimiento con visitas rutinarias para extraer datos in situ. Adicional a esto, se han colocado instrumentos en 5 extensiones y centros regionales de la UTP, 3 con acceso en tiempo real vía Internet.

2 PREÁMBULO SISMO TECTÓNICO

El Istmo de Panamá dentro de un Bloque Tectónico rígido e independiente, se caracteriza por generar sismos ocasionales fuertes en ambos bordes oceánicos, Caribe y Pacífico, hasta un máximo probable de magnitud 7,8. La sismicidad del país de magnitud mayor de 5 en los últimos 5 años se aprecia en la Figura 1. En donde por la profundidad detectada (~ 80 km) y estilo de ciertos eventos se manifiesta incomprensión a sacudidas de diferente carácter y duración energética, mecanismos de ruptura, el ancho de pulsos de corto y largo periodo, y los efectos potenciales a ejecutarse para deteriorar las edificaciones nacionales actuales.



La mayor amenaza histórica de Panamá Central obedece a dos terremotos con daños dispersos en mayo de 1621 y septiembre de 1882, así como por otros que han impactado fuertemente en promedio cada 30 años, sumado a una reactivación

anual reciente de fallas circundantes. Por ello, se requiere coleccionar más datos de sismos grandes y significativos para lograr resultados según los objetivos por lo cual se implementó esta Norma. Sin embargo, la poca frecuencia de sismos fuertes que

repercuten en la Ciudad de Panamá, donde se concentra más del 95% de estos instrumentos conlleva la espera en años para contar con variedad de acelerógramas representativos, cercanos y con fuerza, mas buena calidad señal-ruido para análisis dinámicos concluyentes. También, otro inconveniente por el número limitado de instrumentos máximos por altura (dos), es poder conocer los desplazamientos, modos y variación entre los pisos intermedios. Indudablemente entre la cantidad de registros recuperados hasta ahora, se muestra a la región occidental del país, en David Chiriquí, como una zona de alta y frecuente sismicidad.

3 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS EN PANAMÁ.

Desde que se implemento la Norma de Instrumentación se han equipado 39 edificios, de los cuales 37 están en sectores muy específicos dentro de la Ciudad de Panamá y 2 en las afueras de David. El edificio No.1 de la UTP en su sede central Víctor Levy Sasso, denominado Se1, fue el primero instrumentado en todo el país, aún cuando no lo requería. El de mayor altura es de 52 pisos en la Avenida Balboa. La Tabla 1 resume estos según código de control, fecha de instalación, marca, arreglo y número de pisos. Sin embargo, se cuenta con un potencial de datos (Fig. 2) para: analizar y evaluar cualitativamente el comportamiento de los edificios en Ciudad

de Panamá frente a las acciones sísmicas, enfatizando su aspecto resistente. Además, diagnosticar las patologías arquitectónicas y estructurales de las edificaciones; proponer sistemas y tipologías de edificaciones que conjuguen aspectos constructivos, arquitectónicos y estructurales que definan un buen desempeño sismo-resistente, acorde con el avance tecnológico y económico en Panamá. Así como modificar criterios de diseño estructural con la ayuda de la instrumentación.

En el edificio Se-1, de 4 plantas, se logró registrar y analizar con dos acelerógrafos digitales de 12 bits, el fuerte sismo del precarnaval de febrero 26 de 2000, originado a 120 km de la ciudad Capital. A la fecha, más de 300 registros digitales de acelerogramas triaxiales y unos 50 eventos, muchos débiles y/o distantes, el mayor con magnitud Mw 6.5 en territorio nacional, han sido recopilados y procesados en parte. El evento más fuerte detectado hasta ahora en campo abierto ha sido en David, con un 11 % de aceleración horizontal, equivalente a una intensidad Mercalli de VI, a raíz del sismo de febrero 4 del 2004, Mw 6,1, originado cerca de Puerto Armuelles. Actualmente, el record máximo de aceleración registrada en un edificio es en la Ciudad de Panamá, cuando alcanzó 127 cm/s^2 (0,13 g) por un sismo de magnitud Mw 5,4 en agosto del 2003, en la costa Caribe a 60 km de distancia epicentral.



Figura 2- Distribución de Edificios instrumentados en Ciudad de Panamá, en 2005.

Los acelerógrafos UTP están en capacidad de registrar parámetros del historial de las aceleraciones por un sismo dentro de una estructura ingenieril. Revelar el periodo fundamental de las edificaciones, la función del incremento en la duración según la altura, y los desplazamientos orbitales en la cima. Su transformación al dominio espectral ofrece información adicional sobre los espectros de respuesta y poder comparar con las curvas de diseño para distintas partes del país. Así, se pueden extrapolar criterios sobre un buen o mal

diseño estructural, pudiéndose recomendar los correctivos para mejorar la seguridad.

Los sistemas constructivos más utilizados en Panamá no están claramente tipificados o son híbridos, pues constan de losas planas o delgadas postensadas y con Muros Cortantes. Ahora se cuenta por primera vez con datos para comparar cuantitativamente la demanda y la capacidad de los complejos edificios altos. También, para ciertas estructuras disponibles, es evaluar la aceleración y los espectros de respuesta de entrada en la base [1].

Tabla 1- Sitios instrumentados por fecha, tipo de acelerógrafos, interconexión y terreno.

CÓD	FECHA	# Plantas	MARCA	Cant.	ARREGLO	Eventos	TERRENO
Se- 2	2001-09	30	KMI Etna	2	Sótano y azotea	38	Suelo firme y roca
Se- 3	2002-03	17	KMI Etna	1	Azotea	39	---
Se- 4	2002-05	28	KMI Etna	2	Sótano y azotea	14	Suelo blando
Se- 5	2002-05	34	KMI Etna	2	Sótano y azotea	38	---
Se- 6	2002-06	4	KMI Etna	1	Medio	32	Roca
Se- 7	2002-06	2	Syscom MR2002	1	Azotea	15	---
Se- 8	2002-08	28	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	19	Roca
Se- 9	2003-01	25	KMI Etna	1	Azotea	32	Roca
Se-10	2003-01	17	KMI Etna	1	Azotea	1	Firme
Se-11	2003-04	24	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	10	---
Se-13	2003-03	20	KMI Etna	2	Sótano y azotea	26	Roca
Se-14	2003-06	42	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	4	Roca
Se-15	2003-08	46	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	6	Roca
Se-16	2003-08	36	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	5	---
Se-17	2003-09	17	Syscom MR2002	1	Azotea	11	---
Se-18	2003-09	24	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	4	Roca
Se-19	2003-10	52	KMI Etna	2	Sótano y azotea	8	---
Se-20	2004-01	29	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	2	---

Se-21	2004-01	14	Syscom MR2002	1	Azotea	5	---
Se-22	2004-03	17	Syscom MR2002	1	Sótano	3	---
Se-23	2004-05	10	Syscom MR2002	1	Sótano	1	---
Se-24	2004-05	20	Syscom MR2002	1	Sótano y azotea	2	Firme
Se-25	2004-08	22	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	5	---
Se-26	2004-08	30	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	2	Relleno
Se-27	2004-11	21	KMI Etna	1	Sótano	0	---
Se-28	2005-01	36	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	0	---
Se-29	2005-01	16	Syscom MR2002	1	Sótano	0	Roca
Se-30	2005-02	11	KMI Etna	1	Sótano	3	Roca
Se-31	2005-03	33	KMI Etna	2	Sótano y azotea	0	---
Se-32	2005-04	24	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	0	Roca
Se-33	2005-04	18	Syscom MR2002	1	Sótano	0	Roca
Se-34	2005-04	16	KMI Etna	1	Sótano	0	Roca
Se-35	2005-07	28	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	0	---
Se-36	2005-07	12	Syscom MR2002	1	Sótano	0	---
Se-37	2005-07	16	Syscom MR2002	1	Sótano	0	---
Se-38	2005-07	14	KMI Etna	1	Sótano	0	---
Se-39	2005-07	22	Syscom MR2002	2	Sótano y azotea	0	---
TOTAL	---	---	---	56	---	---	---
L							

Se tiene una propuesta de modificación a la Norma actual en la CAPAC, de manera que se considere un número finito de edificios. Habría en el interior del país ciertos edificios-modelos, escogidos según centros

urbanos representativos, el sistema estructural y arquitectónico, las alturas y fundaciones sobre geología o terreno de contrastes.

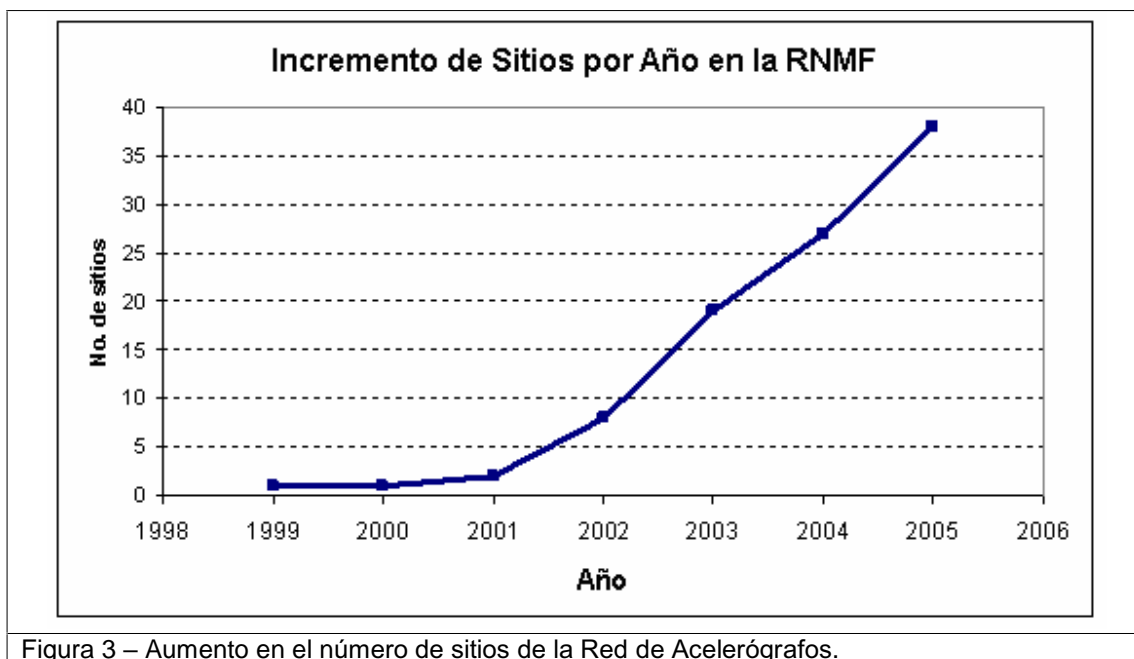


Figura 3 – Aumento en el número de sitios de la Red de Acelerógrafos.

La fase actual de la Normativa se visualiza y prevé en pleno desarrollo y en evolución (Fig. 3). Se adapta el incremento según la economía nacional, la cual es aleatoria para edificar y por tanto adquirir instrumentos para la UTP. Se distingue una configuración de activación automática, duración del registro entre el sótano y el nivel superior, y poder contar con más eventos de análisis si se dispone el arranque maestro por las señales desde las azoteas, donde se percibe mayor movimiento. Actualmente se ingresan datos básicos de la instrumentación en nuevas construcciones, mediante la localización por coordenadas geográficas, espaciamiento de red (Fig. 4), la fecha de instalación, orientación, con mejoras en la resolución y ajuste del tiempo. Además, la clasificación de señales y su adecuado agrupamiento en formatos de formas de ondas multiuso, comparación y preparación de listados, mas la búsqueda técnica de parámetros sismológicos y estructurales.

4 RED NACIONAL DE MOVIMIENTOS FUERTES RNMF- CAMPO ABIERTO

El término “fuerte” refiere a vibración sísmica del terreno, que sacude o mueve los cimientos de las estructuras, objetos y las personas de una forma violenta poco usual. Por “movimiento” entendemos traslación temporal, con desplazamientos, velocidad, aceleración y duración desarrollada por un sismo. Una Red Nacional de Movimientos Fuertes (RNMF) esta basada en el empleo de acelerógrafos distribuidos por todo el país. Medir aceleración pretende detectar y evaluar los cambios bruscos de la velocidad, y que potencialmente ponen en riesgo a las estructuras creadas por el hombre.

Las mediciones y estimaciones pretenden conocer la posibilidad de un temblor que se exceda en fuerza, y exista desconocimiento de la distancia a las fuentes sismo-generadoras, los valores de absorción con sub-estimación en la resistencia de los diseños arquitectónicos e ingenieriles. En Panamá se adolece que nunca se ha

dispuesto de datos instrumentales para desarrollar funciones entre la aceleración, distancia y magnitud local. Esto no prevé una buena estimación del decaimiento

espacial de la energía liberada por un terremoto, pues hasta ahora, las relaciones han sido importadas de regiones con geología diferente a la nuestra.

Tabla 2- Instrumentos a de la RNMF en Campo Abierto o dentro de edificios bajos.

CÓD.	FECHA	LUGAR	Cant.	MARCA	Eventos	ARREGLO	TERRENO
Se- 1	1999-09	Panamá	2	Terra GSR	15	Sótano y abierto	Suelo blando
Se-12	2003-06	David	1	KMI Etna	60	Abierto	Suelo
Sa- 1	2001-03	Tocumen	1	KMI Etna	22	Campo libre	Suelo
Sa- 2	2001-04	Los Santos	1	KMI Etna	95	Planta baja	Suelo
Sa- 3	2003-04	Santiago	1	Syscom MR2002	19	Campo libre	Suelo
Sa- 4	2005-05	Penonomé	1	Syscom MR2002	1	Campo libre	Suelo
Sa- 5	2005-06	La Chorrera	1	Terra GSR	0	Campo libre	Suelo
TOTAL	---	---	7	---	---	---	---

Los mayores esfuerzos para ampliar la cobertura y conocimiento de las aceleraciones del terreno, mediante una Red Nacional dan inicio en 2004. Esto se requeriría para complementar los estudios de las señales captadas dentro de los edificios, lo cual es una mezcla de dos respuestas, suelo y estructuras. Estos lugares (Tabla 2) se han ido adicionando en los centros regionales UTP de: Santiago de Veraguas, La Villa de Los Santos en Azuero, Penonomé en Coclé, La Chorrera en Panamá Oeste, y en la Extensión de Tocumen, en las periferias de la ciudad de Panamá, en donde esta la sede del CEI. Así, a inicios de 2005 se logra interconectar por primera vez vía Internet a 3 centros regionales UTP y extraer cómodamente los archivos de datos hacia las oficinas del Laboratorio. Los relojes son revisados constantemente con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Con esto en marcha, es viable evaluar el acecho peligroso de haber constantes réplicas

luego de un terremoto, que condiciona una crisis sísmica.

Los criterios de selección de los sitios incluyen la distribución geográfica de las principales ciudades respecto a las fuentes sísmicas. La colección de datos de la RNMF, se da en conjunto o de manera coordinada con los equipos disponibles en los edificios. Actualmente, se enumeran características de toda la información sísmica recolectada desde 1999 en reportes individuales denominados Sa (sitio en campo abierto) y Se (sitio en edificio). Como ventaja es el hecho que solo se cuenta con 3 marcas o fabricantes, lo que facilita el software de operación, manejo de formatos de salida, intercambio y conversión de datos a otras formas de evaluación. Tal catálogo de señales detectadas se convierte en más representativa o bastante completa desde el año 2002 al presente, el cual contiene detalles del suelo, rangos de disparo, y su asignación del registro a eventos reales.

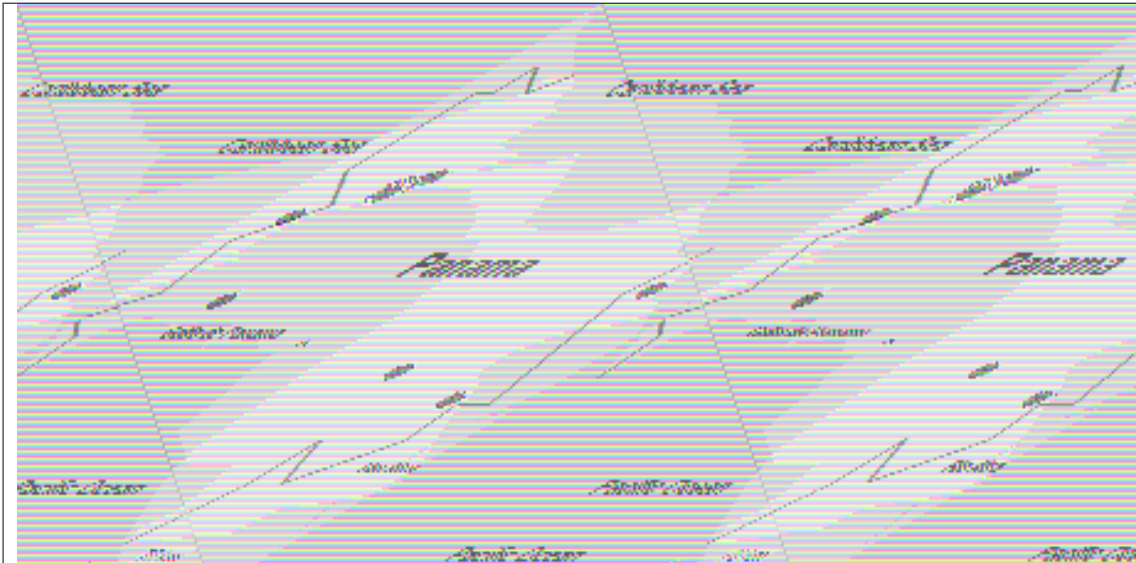


Figura 4 – Estaciones acelerográficas de la RNMF a nivel nacional.

Se hacen grandes esfuerzos por contar con una Red Nacional óptima, y definir parámetros de movimientos fuertes y otros datos necesarios para mejorar el conocimiento de la amenaza sísmica a nivel nacional. Se ha proyectado la ubicación de las estaciones acelerográficas en el territorio nacional, de forma tal que se cuente con un sistema eficiente y calibrado para: clasificar eventos sísmicos según la amplitud (aceleración pico o máxima PGA); ayudar a mejorar el entendimiento de las características de las fuentes sísmicas; aportar datos para elaborar funciones de atenuación o decaimiento de la aceleración con la distancia epicentral; y dar a conocer la amplificación sísmica y ciertas propiedades de los suelos de centros urbanos.

5 INVESTIGACIÓN Y EVALUACIÓN CON ACELEROGRAMAS

Los registros captados por acelerógrafos suelen aportar conocimientos sobre la atenuación o amplificación de las ondas sísmicas, internas y superficiales, la capacidad y efectividad de hacer daño, la forma de extensión del campo

macrosísmico, o designar ponderadamente una Intensidad Mercalli (MM) instrumental, dejando de ser subjetiva comparado a los sensores humanos tradicionales. Puede además indicar la directividad de radiación de la energía del plano de falla respecto a las estructuras sismo-tectónicas y efectos no previstos. Entre los resultados buscados más importantes están los espectros de respuesta estructural (al 5%), y de otros movimientos inducidos de traslación y rotación durante sismos en ejecución. Se enfocan esfuerzos por disponer de una red que posea capacidad de observación mediante configuración espacio-geométrica versátil. Esta actualmente posee forma de captación como una letra V.

Además, mediciones en las azoteas muestran efectos de pulsación y modulación de señales (Fig. 5), muy cercanas a la resonancia. Otros aportes de la instrumentación en edificios está la de rescatar males previos a un evento sísmico fuerte, y hacer correcciones antes que pueda exceder la capacidad de absorción de diseño vigente. Esta utilidad puede ser con sismos moderados y pequeños, así como con vibraciones débiles o microtemores que inducen a mover las estructuras. Además, se pueden descubrir aproximaciones básicas e interacciones con

comportamientos estructurales lineales. Se conserva la incertidumbre de un

comportamiento no-lineal, tanto de suelos y estructuras, durante terremotos intensos.

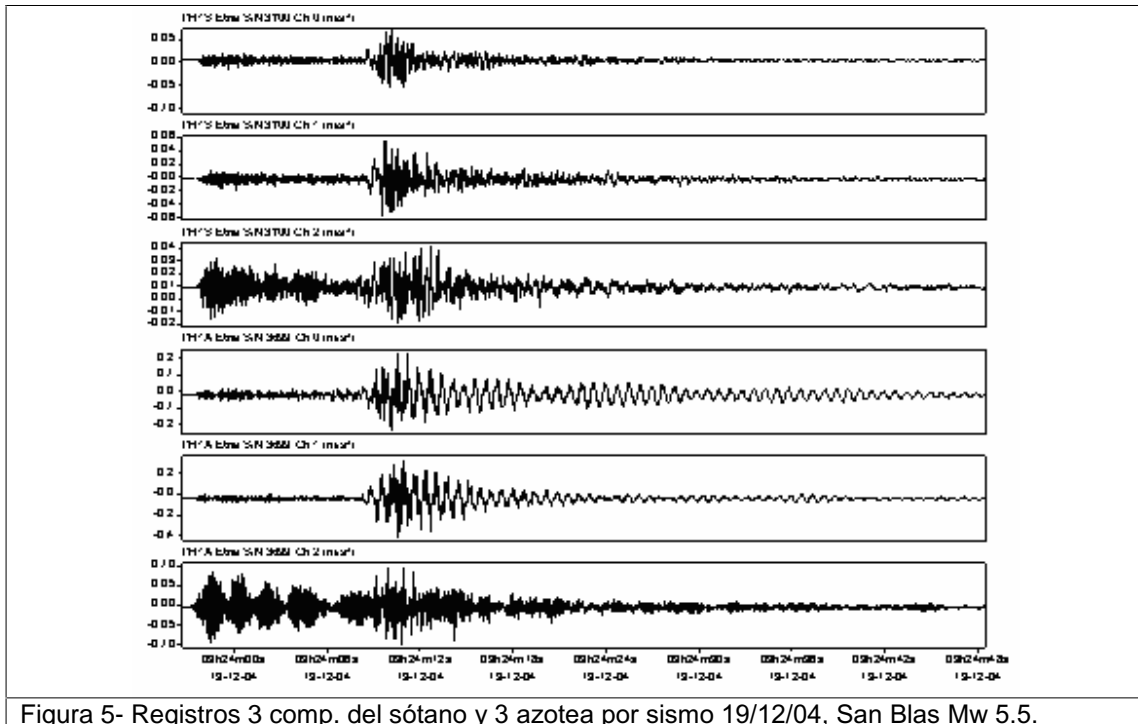


Figura 5- Registros 3 comp. del sótano y 3 azotea por sismo 19/12/04, San Blas Mw 5.5.

Por otra parte, muchos de edificios instrumentados logran registros de aceleración solo en la base o al último nivel (o ambos). Los superiores permiten conocer los desplazamientos totales de los edificios típicamente altos, logrando visualizar el comportamiento real al cambio de fases y trenes de ondas en las estructuras. Se ha iniciado evaluar la forma de orbitación y duración entre la base y la azotea (vea Fig. 6).

El aporte de estos acelerógrafos pioneros con datos en el interior de estructuras contribuye con investigación de vanguardia. Por ejemplo, el empleo selectivo con la transformación del registro al dominio de las frecuencias, con solo el ruido, ondas P, S, L y coda, o con de señal completa, es todo un compromiso de investigación.

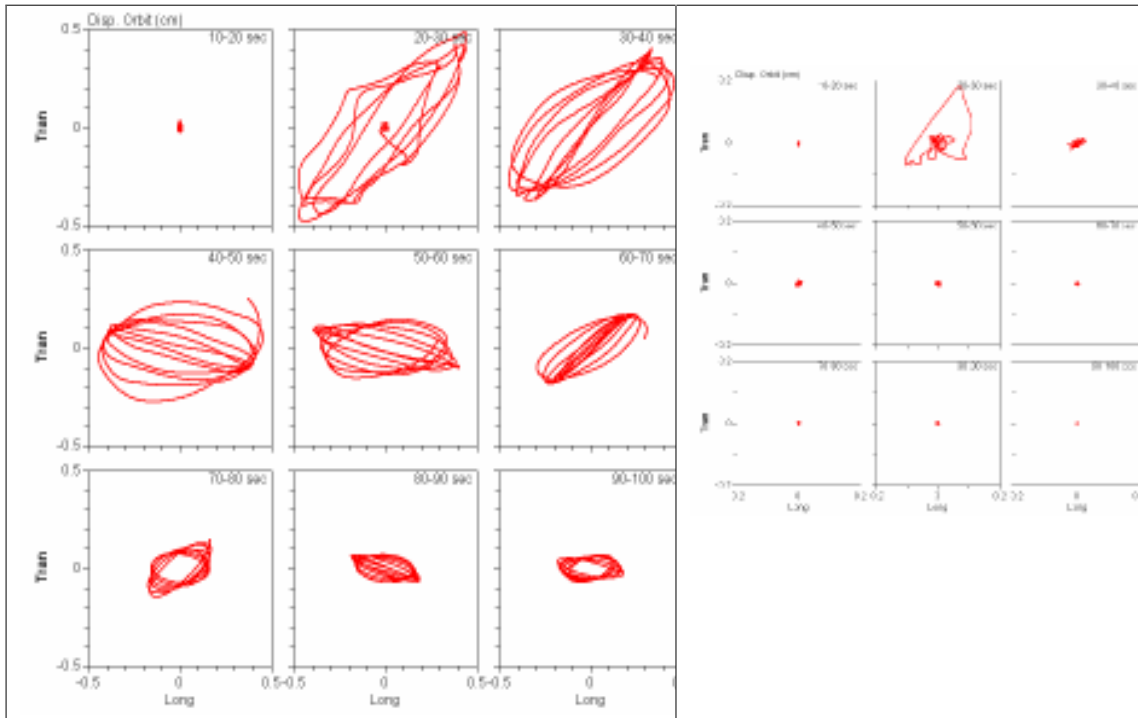


Figura 6 – Orbitación al desplazamientos en azotea (100s) y sótano (10s) de edificio alto

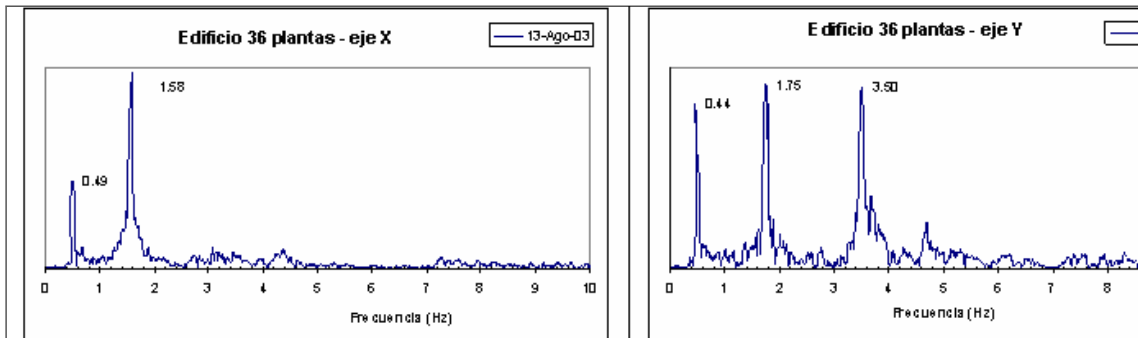


Figura 7- Amplitudes de Fourier por sismo detectado en la cima de edificio 36 Pisos.

También, los máximos de aceleración correlacionados con cuestionarios humanos aportados al USGS y con intensidad Mercalli Modificada (MM) ya asignada, no ha encontrando discrepancias. Un mapa de isosistas mezclando ambos tipos de

intensidades por un fuerte sismo reciente, Mw 6,0 (en junio pasado), al Occidente de Chiriquí [2] se aprecia en la Figura 8. La percepción en Panamá y Coronado (II MM) justifica amplificación de edificios altos.



Figura 8- Ubicación epicentral, mecanismo focal e isosistas de junio 30-05, VI a I MM

Otro resultado en David es que los periodos bajos no se aprecian entre dos instrumentos localizados en un intervalo de 800 m. No aparecen entre un edificio masivo (11 plantas) y otro punto cercano sobre suelo. Debe influenciar la remoción

de las capas someras además del peso de la estructura, que actúa como un filtro de las altas frecuencias. La amplitud entre 0,2-0,8 s se conserva similar, evidenciando el contenido de energía que arribó a la urbe.

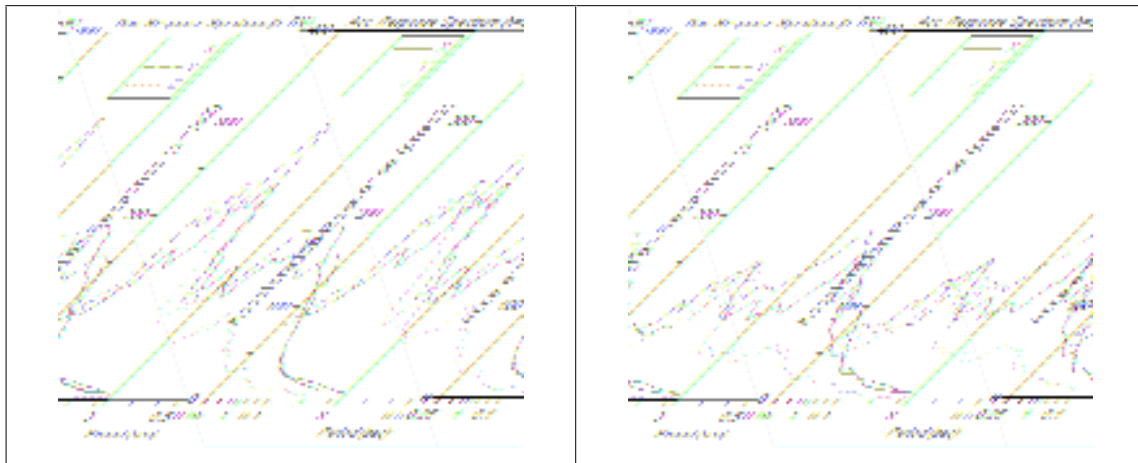


Figura 9- Espectros de Respuesta cercanos en a) suelo libre, y b) sótano bajo 11 plantas

Se han confeccionado mapas de iso-aceleración (vea Fig. 10) aunque no de forma ideal, por estar muchos sitios sobre

suelos, utilizaron lecturas de aceleración en cm/s^2 del canal horizontal, ubicados en los sótanos de los edificios y otros a una

planta. Esto manifiesta la necesidad de ampliar la cobertura instrumental preferiblemente en roca, para hacer análisis del régimen sísmico, trayectoria de

propagación, atenuación de la fuerza e inhomogeneidades de suelos en la Ciudad de Panamá, así como dimensiones internas de la corteza istmeña.

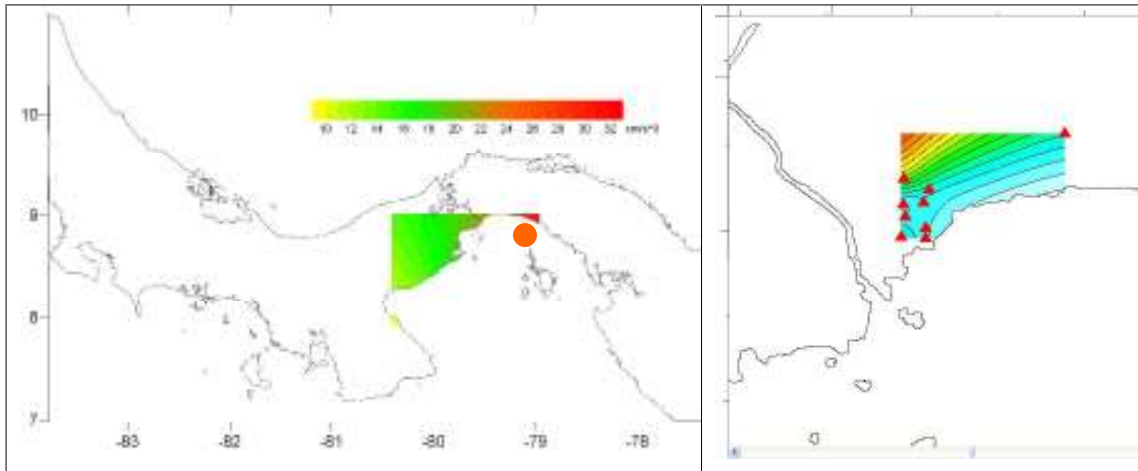


Figura 10- Mapas de isoaceleración por sismos de 19/12/04 (M 5.5), y 16/03/02 (M5.1).

Ensayos en la evaluación de los radios espectrales H/Z en donde esta emplazado el instrumento indica aspectos oscilatorios del subsuelo y elasticidad, mostrando los

periodos fundamentales según el material (y espesor), la amplificación sísmica (vea ejemplo Fig. 11).

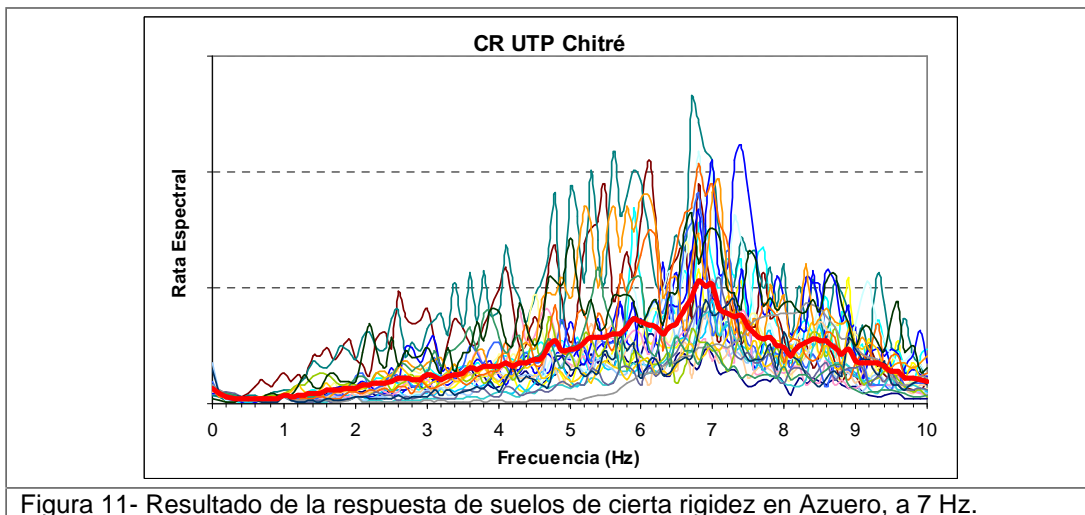


Figura 11- Resultado de la respuesta de suelos de cierta rigidez en Azuero, a 7 Hz.

7. CONCLUSIONES

La instrumentación en edificios (37) y a campo libre (7) permite identificar

propiedades dinámicas y la respuesta global de los distintos sistemas estructurales utilizados en Panamá, y confirmar coeficientes del Reglamento Estructural Panameño vigente. Así, la instrumentación actual permanecerá por algunos años con sus respectivos compromisos de sitio, en espera de resultados concluyentes, dada la baja tasa de actividad sísmica en Panamá.

La RNMF inicia contorneando áreas de Intensidad Mercalli Modificada instrumental y el potencial de daño a nivel nacional. Se propone evaluar post-terremoto según los acelerogramas y de manera inmediata, vía Internet, ciertos edificios de atención de emergencias y el estado de daño alcanzado. Además, con los sitios presentes en la geografía, aunque en suelo, y por la distribución en acimut y distancia entre ellos, se busca encontrar funciones de atenuación local (causas y particularidades).

El aporte de información de la instrumentación se conduce para: a) suministrar datos reales en el análisis de los edificios nacionales (p.e isoperiodos); b) conservar en memoria el historial evolutivo de la vida de cada edificio instrumentado; c) comprobar la capacidad destructiva según el subsuelo y por el tipo de fuente sísmica (p.e. acelerograma de entrada en simulaciones); e) modificar el código de diseño del REP; y g) verificar y obtener propiedades dinámicas de los suelos (p.e. radio y frecuencia de Nakamura).

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oscar M. Ramírez; José m. Gallardo & Carlos Ho, 2003. Reporte del Sismo registrado el 13 de agosto de 2003. Informe No. CEI-07-002-2003, Centro Experimental de Ingeniería (CEI), Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), 16 pp.
- [2] Red Nacional de Movimientos Fuertes - CEI-UTP. Informe No. 1-05. Evento Sísmico Perceptible de junio 30 de 2005, 1 p.

CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO (Normas, pruebas y cartas de Control)

Ing. Oscar Patiño- Jefe Lab. Ensayo de Materiales
Ing. Rosalín Méndez – Ayudante de Investigación III

Laboratorio de Ensayo de Materiales
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá

RESUMEN

En las aplicaciones de ingeniería se utilizan herramientas y procedimientos científicos para evaluar la calidad de un producto. Como herramientas podemos señalar los equipos de producción y los instrumentos de laboratorio; como procedimientos, los planes de calidad y las normas. Una mezcla de concreto puede prepararse utilizando diversos mecanismos de mezclado, sin embargo, los requisitos de calidad pueden ser alcanzados si se cumplen rigurosamente con cada etapa del proceso, desde la selección de los componentes individuales hasta su instalación en obra, incluyendo el curado y las pruebas de laboratorio.

Con frecuencia se observa la evaluación de núcleos de concreto o pruebas no destructivas de importantes elementos estructurales, debido a dudas razonables sobre su resistencia. Este trabajo intenta una reflexión sobre las normas para la adecuada producción de un concreto, que cumpla con la calidad solicitada en un proyecto. Al final se presenta un ejemplo de un proyecto real, donde el concreto suministrado puede considerarse fuera de control desde el punto de vista de la resistencia especificada.

Palabras claves: calidad, estadísticos, normas, resistencia.

ABSTRACT

In Engineering applications there are tools and scientific procedures to evaluate the quality of any product. Examples of Tools are production and laboratory equipments. Examples of procedures are Quality plans and standards. Concrete can be mixed using different methods, but requirements can be only reach when each step along the process is successful, since the selection of individual components until its placement, including cured and testing.

It is common to use coring and nondestructive test for important structural elements, due a dudes about its strength. Therefore in this work, standards about concrete production are reviewed, to sure the quality expected. Finally an example of a real project is showed. Here the concrete can be considered out of control, in respect the specified strength.

Key word: Quality, statistical, standards, strength

1. Introducción

Las dudas sobre la resistencia de un concreto conllevan a consecuencias poco deseadas, ya que las investigaciones que se tienen que realizar introducen demoras y en ocasiones reparaciones, cuyos costos finalmente deben ser asumidos por una de las partes interesadas.

Para asegurar que el concreto suministrado en un proyecto cumpla con los parámetros

especificados, debe conducirse un programa de calidad fundamentado en normas y procedimientos estadísticos.

A través este trabajo se hará énfasis en el cumplimiento de las normas para alcanzar la calidad deseada en el concreto, tales como ACI-318, ACI-214 y ASTM, adoptadas directa o indirectamente por el Reglamento Estructural Panameño (REP-04).

Con este trabajo se proporciona una guía sobre el estado del arte para el control de calidad del concreto. Los planteamientos están acompañados fórmulas y parámetros de control estadístico.

Inicialmente se plantea el concepto de calidad, seguido de los criterios para el diseño de una mezcla de concreto y los factores que producen variabilidad en la mezcla. Se enfoca la calidad desde el punto de vista de la durabilidad y resistencia. Posteriormente, se plantean los parámetros estadísticos que se utilizan en el diseño y control de calidad del concreto. Finalmente se plantean los límites permitidos, según las normas, para determinar el grado de calidad del concreto, incluyendo ejemplos de situaciones reales.

2. Concepto básico de Calidad

Calidad es un proceso para alcanzar una característica que satisface el requerimiento deseado. Esta característica puede ser cualitativa o cuantitativa. En tiempos actuales, donde las relaciones humanas han perfeccionado los criterios para la oferta de productos y servicios, el concepto de calidad también ha sido perfeccionado.

En la década de los 80's se planteó como paradigma que la calidad consistía en brindar al cliente un nivel de satisfacción más allá de lo que pide; más recientemente, desde los 90's, se considera calidad como la búsqueda permanente de la excelencia. En la actualidad podría considerarse calidad como sinónimo de excelencia.

En el caso del concreto se puede alcanzar los requisitos de calidad, siempre que se cumpla rigurosamente con la calidad requerida en una de las etapas; es decir: (a) Componentes individuales, (b) Procedimientos de diseño, (c) Técnicas de producción, (d) Transporte, colocación y proceso de curado y (e) Muestreo y pruebas de laboratorio.

La calidad esta estrechamente relacionada con los costos, mediante el criterio costo beneficio. Esto puede ser evaluado de la siguiente manera: (1) A igualdad de precios,

el de mejor calidad será el que presente mejores características con respecto a las especificaciones solicitadas; (2) A iguales características, el producto de mejor calidad será el de menor precio.

3. Normas y especificaciones

El Comité ACI-318 establece claramente los procedimientos que deben tomarse en cuenta para la selección de los materiales, dosificación de la mezcla de concreto, producción, manejo, instalación y curado. Este comité también considera las investigaciones recopiladas y publicadas por otros comités del ACI.

Para el diseño del concreto, se utilizan las recomendaciones de dosificación dadas por el comité ACI 211. En cuanto a análisis estadísticos, se utilizan las recomendaciones del comité ACI-214. Para la confección de las muestras y las pruebas de laboratorio, se hace referencia a las normas ASTM.

Las normas mencionadas han sido adoptadas directa o indirectamente por Reglamento Estructural Panameño (REP-04). Por lo tanto deben ser la guía obligatoria para asegurar un concreto con las características especificadas.

4. Diseño

Existen métodos y practicas estándares para la dosificación de un concreto deseado, entre los cuales se pueden mencionar el ACI 211 .1 para concreto normal, pesado y masivo, ACI 211 .2 para concreto ligero; ACI 211.3 para concreto sin asentamiento, y ACI 211.4 para concreto de alta resistencia con cenizas volantes. En principio todas los métodos se fundamentan en la relación agua/cemento, considerando cemento todos los materiales cementicios.

Aunque los diseñadores y proveedores siguen los estándares del Instituto Americano del Concreto (ACI); en Panamá los materiales y el medio ambiente difieren. Es necesario descubrir la relación entre los componentes naturales locales y la real

resistencia para producir factores de ajuste a las cantidades recomendadas por el ACI, aparte de los aspectos de durabilidad.

Los procedimientos de diseño requieren que la mezcla de concreto sea ensayada antes de usarse para determinar los parámetros estadísticos básicos, tales como la media y la desviación estándar; para esto un claro procedimiento está presentado en el ACI-214 y ACI-318; así como comprobar los índices de alcalinidad y cloruros entre otros.

5. Principales fuentes de variabilidad

En la etapa de producción del concreto se introducen variaciones, que pueden influir en la resistencia u otro requerimiento. Una fuente es la *Variación en las propiedades*, tales como el cambio en la relación A/C, requerimientos de agua, características de los ingredientes, transporte y colocación, temperatura y curado. La otra es la *Variación en los métodos de prueba*, entre los cuales se puede señalar el procedimiento incorrecto de muestreo, la técnica de fabricación de cilindros, moldes de calidad deficiente, cambios durante curado (T, %H) y el procedimiento de pruebas (cabeceo, ensayos). La variabilidad del concreto, debe ser considerada en un programa para el control de calidad, ya que por tratarse de un material estructural tiene fuerte impacto en la seguridad pública

6. Indicadores estadísticos

De aquí en adelante se define como una prueba, el promedio de la resistencia de 2 cilindros, hechos de la misma mezcla de concreto a la edad especificada.

Para un análisis estadístico es recomendable utilizar al menos 30 pruebas, sin embargo existe la posibilidad de utilizar menos de 30 datos, siempre que se considere un factor corrección en la desviación estándar, dada por la tabla 5.3.1.2 del Código ACI-318.

Para los efectos del análisis estadístico, debe definirse las siguientes variables de control, que se utilizan.

f_{cr} = resistencia promedio requerida, para asegurarse de que sólo aquella porción permisible de pruebas caerá por debajo de la resistencia especificada.

f'_c = Resistencia especificada.

s = Desviación estándar.

t = Multiplicador constante para la desviación estándar, que depende del número de pruebas que se espera caigan por debajo de f'_c .

V = Coeficiente de variación.

Resistencia promedio

Para cada resistencia especificada f'_c , se debe establecer la resistencia promedio requerida, f_{cr} , para asegurarse de que sólo aquella porción permisible de pruebas caerá por debajo de esta resistencia.

Al inicio de un proyecto cuando se cuenta con datos estadísticos previos, de acuerdo ACI-318 se puede para establecer la resistencia promedio requerida, utilizando la tabla 5.3.2.1, de la siguiente manera:

Resistencia especificada f'_c , kg/cm ² (psi)	Resistencia promedio requerida, f_{cr} , kg/cm ² (psi)
Menos de 350 (5000)	Escoger el mayor valor obtenido de las siguientes ecuaciones: $f_{cr} = f'_c + 1.34s$ Ec. (5.1) $f_{cr} = f'_c + 2.33s - 35$ ($f'_c + 2.33s - 500$) Ec. (5.2)
Mayor de 350 (5000)	Escoger el mayor valor obtenido de las siguientes ecuaciones: $f_{cr} = f'_c + 1.34s$ Ec. (5.1) $f_{cr} = 0.90f'_c + 2.33s$ Ec. (5.3)

Cuando no existe data de desviación estándar disponible, el ACI-318 recomienda utilizar la resistencia requerida dada por la tabla 5.3.2.2.

7. Control de calidad

De acuerdo a la sección 5.6.3.3 del ACI-318R, el nivel de resistencia de una clase individual de concreto será considerado satisfactorio si cumple con los siguientes requerimientos:

- 1) El promedio aritmético de cualquiera de tres pruebas consecutivas es igual o

superior a la resistencia especificada f'_c .

- 2) Ningún resultado individual de la prueba de resistencia (promedio de dos cilindros) será menor que f'_c por más de 35 kg/cm^2 , si f'_c es menor o igual a 350 kg/cm^2 o por más de $0.10 f'_c$, si es mayor de 350 kg/cm^2

Por otra parte, de acuerdo a los criterios del Comité ACI 214R, las variaciones en la resistencia pueden ser evaluadas mediante

un análisis estadístico, tomando en cuenta la desviación estándar y el coeficiente de variación, los cuales se pueden asociar el grado de control del concreto en el proyecto.

En este caso, la desviación estándar y coeficiente de variación para una resistencia especificada $f'_c < \text{de } 34.5 \text{ Mpa}$ (5000 psi), para control de concreto en campo, son los siguientes:

Desviación Estándar, s para la población total			Coeficiente de variación, V dentro de la prueba	Estándar de control de calidad
kg/cm ²	Mpa	psi	%	
Hasta 28	Hasta 2.8	Hasta 400	<3.0	Excelente
28 a 35	2.8 a 3.4	400 a 500	3.0 a 4.0	Muy bueno
35 a 42	3.4 a 4.1	500 a 600	4.0 a 5.0	Bueno
42 a 49	4.1 a 4.8	600 a 700	5.0 a 6.0	Aceptable
> 49	> 4.8	> 700	>6	Deficiente

De manera similar existen desviaciones y coeficientes de variación recomendados para $f'_c > \text{de } 34.5 \text{ Mpa}$.

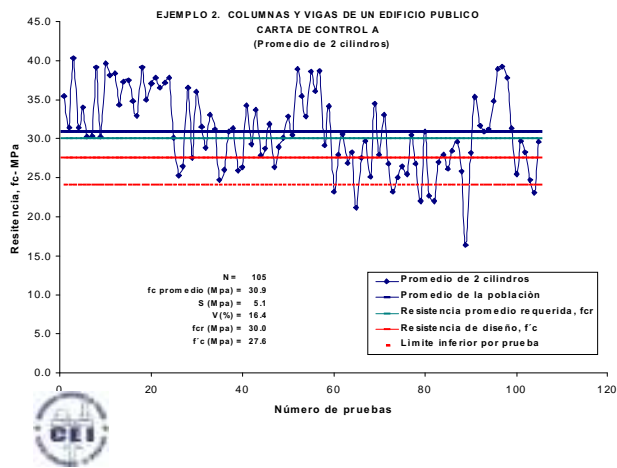
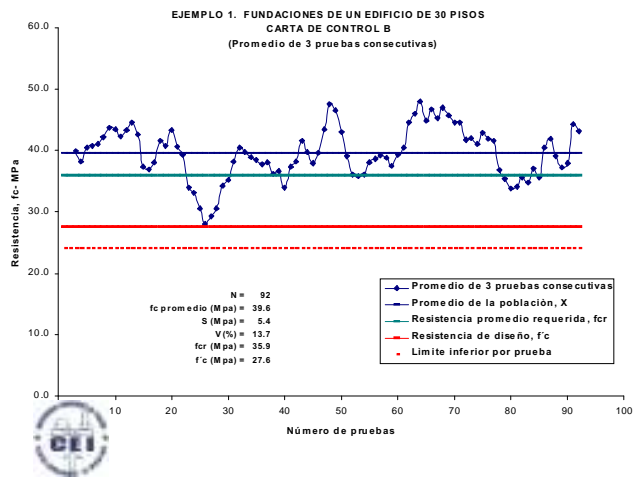
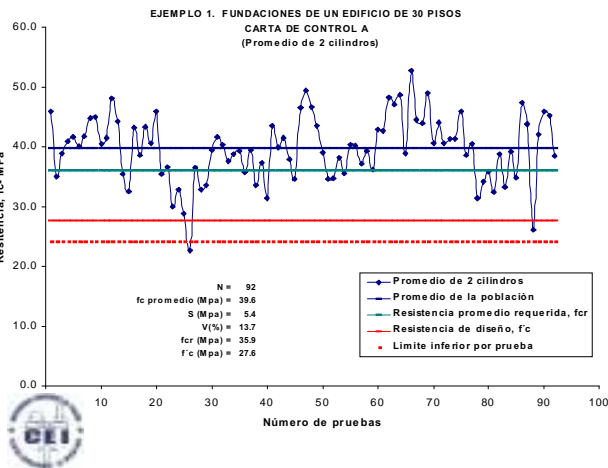
Los resultados se evalúan usando cartas de control. Estos resultados serán comparados con los indicadores estadísticos recomendados.

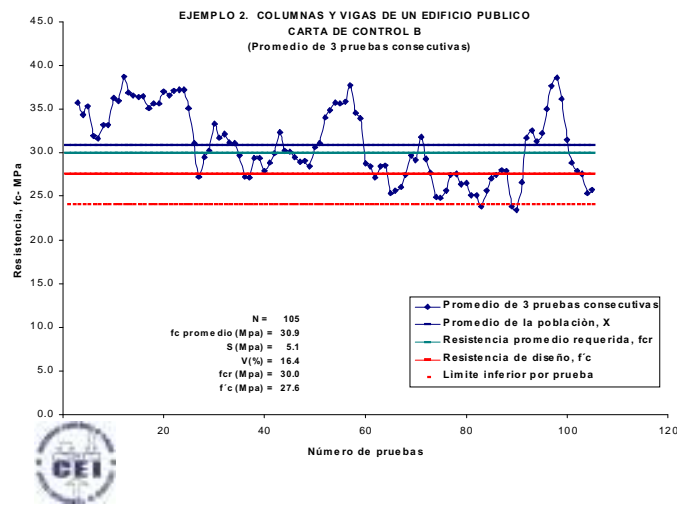
En el Ejemplo 1 se presenta la evaluación estadística de 92 pruebas de concreto de un edificio privado, donde el concreto puede considerarse aceptable; sin embargo la desviación estándar y el coeficiente de variación indican posibles fuentes de variaciones en la producción.

En el Ejemplo 2, se presenta la evaluación estadística de 105 pruebas de concreto de un edificio público. En este caso las cartas de control indican que el concreto suministrado estuvo fuera de control en 40% final de las muestras, desde el punto de vista de la resistencia especificada.

8. Conclusiones

- Existen normas para el diseño, manejo e instalación del concreto. También existen normas para el control estadístico de la calidad del concreto.
- De acuerdo con los estándares, cada proveedor debe examinar su data estadística, pero esta información pocas veces es pública. He aquí la importancia que cada inspector y/o constructor procese la data asociada con su proyecto.
- La calidad del concreto debe garantizarse a través de un programa de aseguramientos de la calidad, que incluya control y evaluación de todos los factores.
- Considerando el concreto un material estructural, su calidad es sinónimo de seguridad contra accidentes estructurales y por ende seguridad de los asociados.





9. Referencias:

- [1] Comité Panameño de Normas Industriales y Técnicas, COPANIT
- [2] Reglamento Estructural Panameño – REP-04
- [3] Cogido ACI 318-02, “Reglamento de las construcciones de Concreto reforzado”, American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [4] Comité ACI –211, “Práctica estándar para la selección de las proporciones de concreto”, American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [5] Comité ACI-214: Prácticas recomendadas para la evaluación de resultados de ensayos de concretos
- [6] Normas ASTM C-31, “Confeción de especímenes de prueba en campo”, American Society for Testing and Materials, Easton, 1998.
- [7] Normas ASTM C-33, “Agregados para el concreto”, American Society for Testing and Materials, Easton, 1998.
- [8] Normas ASTM C-39, “Método de ensayo estándar para compresión de especímenes de cilindro de concreto”, American Society for Testing and Materials, Easton, 1998.
- [9] Normas ASTM C-143, “Método estándar para asentamiento del concreto con cemento hidráulico”, American Society for Testing and Materials, Easton, 1998.
- [10] Normas ASTM C-193, “Confeción y curado de especímenes de concreto en el laboratorio”, American Society for Testing and Materials, Easton, 1998.

MODELO DE TRANSFERENCIA DE FASE DE BASES ORGÁNICAS EN SISTEMAS SUELO-AGUA

Dr. José R. Fábrega D.
Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad de Tecnológica de Panamá

RESUMEN

Este artículo es un resumen de uno de los capítulos de la disertación doctoral del autor. El mismo busca brindar una introducción a un Modelo de Parámetros Distribuidos (MDP) para evaluar la transferencia de fase de bases orgánicas en sistemas suelo-agua. Una función de parámetros distribuidos (FDP) que describe la asociación de un catión orgánico con sitios de intercambio de cationes en el suelo es presentado dentro de un modelo general de especiación para describir el equilibrio resultante de la transferencia de masa de bases orgánicas e inorgánicas entre suelos saturados y agua. La FDP es una distribución estadística de tipo gaussiana (normal) de los logaritmos de la constantes de asociación ($\log K_L^{BH}$) con una moda igual a $\log \mu$, y una desviación estándar igual a σ . Las reacciones consideradas en el modelo general son: a) La disociación del ácido de la base orgánica protonada, b) la absorción de las especies orgánicas neutrales al carbón orgánico del suelo con un coeficiente de partición, K_{oc} , y c) el intercambio iónico en el suelo entre la base orgánica protonada (BH^+) y los cationes inorgánicos divalentes (D^{2+}). Matemáticamente, la última reacción fue expresada como reacciones de asociación separadas para cada tipo de catión a los sitios no ocupados. Las ecuaciones de balance de materiales consideradas fueron aquellas de la base orgánica, de los sitios de intercambio catiónico, y de la suma de los cationes inorgánicos Mg^{2+} y Ca^{2+} . Los valores de K_{oc} , μ y σ fueron calculados para la Anilina y el α -naftilamina, a través de la minimización de residuos entre las concentraciones experimentales y calculadas de estos compuestos en agua. Los valores de K_{oc} , $\log \mu$, y σ , que mejor se ajustaban a los resultados experimentales fueron 16.5 L/kg, 23.7 y 1.66; y 100 L/kg, 25.1 y 2.04 para anilina y α -naftilamina, respectivamente.

ABSTRACT

This article is a summary of a chapter from the author's doctoral dissertation. It tries to give an introduction on a distributed parameter model that evaluates soil-water phase transfer processes of organic bases. A distributed parameter function describing the association of an organic cation to soil cation exchange sites is invoked within a larger speciation model to describe mass transfer of organic and inorganic bases between saturated soil and the aqueous phase at equilibrium. The distributed parameter function is a Gaussian distribution of logarithmic association constants ($\log K_L^{BH}$) with mode = $\log \mu$, and standard deviation = σ . Reactions considered in the overall model are: a) Acid dissociation of the protonated organic base, b) sorption of the neutral organic species to soil organic carbon with partition coefficient K_{oc} , and c) ion-exchange on the soil between the protonated organic base (BH^+) and inorganic divalent cations (D^{2+}). Mathematically, the last reaction was expressed as separate association reactions for each type of cation to unoccupied sites. The material balance equations considered were those on the organic base, the cation-exchange sites, and the sum of Mg^{2+} and Ca^{2+} . Values for K_{oc} , μ and σ were calculated for aniline and α -naphthylamine by minimizing residuals between experimental and calculated aqueous phase base concentrations. The best fit values for K_{oc} , $\log \mu$, and σ were 16.5 L/kg, 23.7 and 1.66; and 100 L/kg, 25.1 and 2.04 for aniline and α -naphthylamine, respectively.

INTRODUCCIÓN

Las bases orgánicas tales como la anilina y la α -naftilamina son importantes contaminantes orgánicos debido a su potencial toxicidad, a que son potenciales

cancerígenos, y a las grandes cantidades producidas de los mismos cada año.

El transporte y destino de estos químicos esta parcialmente determinado por procesos de transferencia de masa entre el suelo y el agua. Bajo condiciones de pH

alto, muchas bases orgánicas existen predominantemente en forma neutra, y la transferencia de masa ocurre a través de interacciones hidrofóbicas. Una mayor sorción (absorción y adsorción) de las bases orgánicas a los suelos es generalmente observada a pH bajos, con el intercambio de cationes siendo el mecanismo dominante bajo estas condiciones. La gran variedad de ligantes en el suelo, hace que las afinidades del suelo para protones y otros cationes (aminas orgánicas) sea mejor representado por un rango de valores, que por valores puntuales. (Perdue et al., 1984)

$$K_a = \frac{[B][H^+]}{[BH^+]} \quad (1)$$

$$K_d = f_{oc} K_{oc} = \frac{[B_{org}]}{[B]} \quad (2)$$

$$K_G = \frac{[BHS][D^{2+}]^{0.5}}{[BH^+][D_{0.5}S]} \quad (3)$$

Distribuciones de frecuencia discretas y continuas han sido empleadas para representar la frecuencia de sitios que poseen constantes específicas de unión.

En esta investigación, este principio se utilizó dentro de un modelo de especiación general para una distribución de frecuencia continua (por ejemplo: parámetros distribuidos) para describir la transferencia de cationes orgánicos monovalentes a suelos saturados, y se compararon los resultados calculados con aquellos de un modelo de especiación simple.

DESARROLLO DEL MODELO.

En esta investigación, dos modelos fueron desarrollados y comparados con datos experimentales. Estos modelos son: (i) un modelo "Dos Sitios (TS)", el cual no considera la heterogeneidad de sitios de intercambio catiónico, y ii) un modelo de parámetros distribuidos (DP), el cual asume un rango de afinidades de los sitios de intercambio de cationes por BH^+ .

Modelo de Dos Sitios (MTS).

El MTS considera los siguientes procesos de transferencia de masa,

en donde K_a es la constante de disociación del ácido conjugado (mol / L), B es la forma neutra de la base orgánica en el agua (mol /L), K_{oc} es el coeficiente de partición del carbón orgánico del suelo (L / Kg.), f_{oc} es la fracción de carbón orgánico, B_{org} es la concentración de B asociada con el suelo (mol/kg), K_G es el coeficiente de selectividad ($M^{-0.5}$) (Gapon, 1933), D^{2+} es la suma de los cationes inorgánicos divalentes $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (mol /L), BHS y $D_{0.5}S$ son los cationes orgánicos e inorgánicos, respectivamente, que están unidos a los sitios de intercambio catiónico en el suelo (S). Las ecuaciones de balance de material correspondiente son:

$$S_T = BHS + D_{0.5}S \quad (4)$$

$$D_T = D^{2+} + 0.5 \frac{m}{v} D_{0.5}S \quad (5)$$

$$B_T = B + BH^+ + \frac{m}{v} (B_{org} + BHS) \quad (6)$$

donde S_T (mol / kg) es la concentración total de los sitios de intercambio catiónico cargados negativamente que es igual a la capacidad de intercambio catiónico (CEC) del suelo a un pH específico, D_T (mol / L) es la concentración total de cationes inorgánicos divalentes, y B_T (mol / L) es la masa total de base orgánica normalizada a un volumen de fase acuática. Este modelo fue resuelto introduciendo las ecuaciones 1-3 en las ecuaciones 4-6, y evaluando los valores de BH^+ , D^{2+} y $D_{0.5}S$ utilizando iteraciones del tipo Newton-Raphson con valores estimados de K_{oc} y K_G .

$$K_D = \frac{[D_{0.5}S]}{[S^-][D^{2+}]^{0.5}}$$

Una función de distribución normal de probabilidades de $\log K_{BH,i}$ es empleada para modelar la frecuencia de sitios,

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(X-\mu)^2} \right) \quad (9)$$

Modelo de Parámetros Distribuidos (MDP).

En este modelo, S^- reemplaza $D_{0.5}S$ como un componente del sistema, modelando el intercambio catiónico como dos reacciones independientes (Griffioen, 1993) que envuelven sitios vacantes (S^-),

$$K_{BH} = \frac{[BHS]}{[BH^+][S^-]}$$

donde μ y σ representan la moda y la desviación estándar, respectivamente; $X = \log K_{BH,i}$, donde el subíndice i denota el sitio específico o el grupo de sitio que tienen un coeficiente de afinidad específico; y $f(X)$ es la frecuencia de los sitios. Esta función es representada con un número discreto de sitios, que agrupan sitios que poseen el mismo valor (7) de $K_{BH,i}$. Expresiones discretas para BHS y $D_{0.5}S$ se obtienen cuando cada grupo tiene el mismo número de sitios ($S_{T,i}$),,

$$BHS = \sum_{i=1}^{i=n} BHS_i = [BH^+] \sum_{i=1}^{i=n} K_{BH,i} [S^-]_i \quad (10)$$

$$D_{0.5}S = \sum_{i=1}^{i=n} D_{0.5}S_i = K_D [D^{2+}]^{0.5} \sum_{i=1}^{i=n} [S^-]_i \quad (11)$$

donde el número total de sitios en cada compartimiento es definido por,

$$S_{T,i} = [S^-]_i + K_{BH,i}[BH^+][S^-]_i + K_D[D^{2+}]^{0.5}[S^-]_i = \frac{CEC}{n} \quad (12)$$

En las ecuaciones 10-12, $[S^-]_i$ es la concentración de los sitios libres en el compartimiento i , y $K_{BH,i}$ es la constante asociada de intercambio catiónico correspondiente a ese grupo específico. La suma de todos los grupos de $[S^-]_i$ da como resultado,

$$[S^-] = \sum_{i=1}^{i=n} [S^-]_i = \frac{CEC}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\{1 + K_{BH,i}[BH^+] + K_D[D^{2+}]^{0.5}\}} \quad (13)$$

Con la introducción de las ecuaciones 1, 2, 7, 8, y 13 en las ecuaciones de balance de masa para B_T y D_T (ecuaciones 5 y 6), se obtiene el siguiente sistema (*i.e.*, par) de ecuaciones no lineales con dos incógnitas (BH^+ y D^{2+}),

$$B_T = [BH^+] \left(1 + \frac{K_a}{H^+} + \frac{m K_{oc} f_{oc} K_a}{v H^+} \right) + [BH^+] \frac{CEC}{n} \frac{m}{v} \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{K_{BH,i}}{1 + K_{BH,i}[BH^+] + K_D[D^{2+}]^{0.5}} \right) \quad (14)$$

$$D_T = [D^{2+}] + 0.5 K_D [D^{2+}]^{0.5} \frac{CEC}{n} \frac{m}{v} \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{1}{1 + K_{BH,i}[BH^+] + K_D[D^{2+}]^{0.5}} \right) \quad (15)$$

Debido a que solamente las afinidades relativas de D^{2+} y BH^+ por los sitios son identificables experimentalmente, es razonable hacer K_D constante para todos los sitios. Las ecuaciones 14 y 15 son referidas como el MDP y son fácilmente resueltas por el método iterativo de Newton-Raphson.

Estimación de Parámetros.

Valores únicos para K_{oc} y K_G (MTS) ó K_{oc} , μ , y σ (MDP) fueron calculados ajustando estos valores hasta que el mínimo global para la siguiente función objetiva fuera encontrado,

$$SSR = \sum_{j=1}^{j=n} (C_{e_{exp}} - C_{e_{pred}})^2 \quad (16)$$

C_e es la concentración total de base orgánica en la fase acuática, los subíndices *exp* y *pred* denotan valores experimentales y calculados, respectivamente, SSR es la suma de los residuos al cuadrado entre los valores experimentales y las predicciones del modelo, y n es el número de datos. Los parámetros de ajuste óptimos ocurren en el mínimo de esta función.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ambos modelos fueron evaluados empleando datos experimentales para anilina y α -naftilamina obtenidos de Lee *et al.* (1997) en tres suelos diferentes, a 3 valores de pH, a tres concentraciones de electrólitos. Los parámetros de ajuste obtenidos para ambos modelos son mostrados en la Tabla 1.

con anilina e isothermas de los modelos TS y DP, calculadas con los parámetros de ajuste óptimo para cada modelo. Los experimentos con el suelo Chalmers-4 (i.e., $\text{pH} \cong 4.5$) resultaron en un menor recobro de anilina en la fase acuática que en los experimentos con suelos de pH neutrales (suelo Chalmers-6). Esto se explica dada la importancia del intercambio iónico a pH bajos. El modelo TS capturó la magnitud, al igual que

Resultados del Modelo de Dos Sitios.

La figura 1 muestra resultados experimentales típicos de los experimentos

Modelo TS	Anilina ^a	α -Naftilamina ^b
Log K_G	0.76	1.94
K_{oc} (L / kg)	30.0	245.0
Modelo DP		
Log μ	23.66	25.14
σ	1.66	2.04
K_{oc} (L / kg)	16.50	100.00

^{a,b} Valores de K_{oc} calculados mediante la ecuación presentada por Sabljic *et al.* (1995), son 25.7 y 174 L/kg para la anilina y la α -naftilamina respectivamente.

TABLA 1. Mejores Parámetros de Ajuste para los Modelos TS y DP (con $\log K_D = 25.00$)

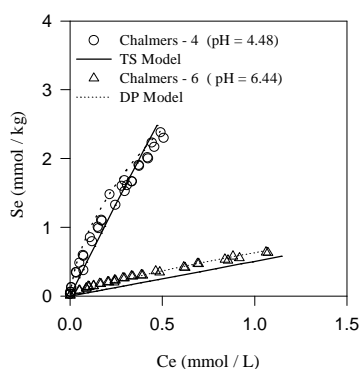


FIGURA 1. Absorción/Adsorción de la anilina a los suelos Chalmers-4 y Chalmers-6 en una solución de 5 mM de CaCl_2 .

la dirección , de esta tendencia. La linealidad de las isothermas sugiere que las afinidades relativas de los sitios de intercambio catiónico para D^{2+} (Ca^{2+} o Mg^{2+}) divididas por las afinidades de la forma protonada de la anilina es casi constante. En el caso de la α -naftilamina las isothermas presentan una mayor falta de linealidad. El MDP predijo mejor esta tendencia. (Figura no mostrada)

Resultados del Modelo de Parámetros Distribuidos.

Las figura 1 también muestra los resultados obtenidos para el MDP. Nuevamente, los valores óptimos de K_{oc} , $\log \mu$, y σ , son aquellos empleados para construir las isothermas del modelo, tal como se muestra en la Tabla 1. Recuerde que la magnitud del $\log \mu$ es relativo al valor asignado para $\log K_D$, y puede ser comparado con $\log K_G$ dividiendo $\log \mu$ por $\log K_D$. Para todas las isothermas, incluyendo aquellas mostradas en la Figura 1, el MDP arroja resultados similares o mejores a aquellos obtenidos con el modelo TS, basados en los valores de SSR. El parámetro σ es mayor para la α -naftilamina que para la anilina tal y como se esperaba, siendo este parámetro un indicador de la no linealidad de la isoterma. Finalmente, los valores de σ para α -naftilamina resultan en una distribución más amplia de los valores de K_{BH} . (figuras no mostradas)

REFERENCIAS

- [1] Gapon, E. N. 1933. "On the theory of exchange adsorption in soils." Zh. Olschei. Khim., 3: 144-152.
- [2] Griffioen, J. 1993. "Multicomponent cation exchange including alkalization/acidification following flow through sandy sediment." Water Resour. Res. 29(9): 3005-3019.
- [3] Lee, L. S., A. V. Nyman, H. Li, M. C. Nyman, and C. T. Jafvert . 1997. "Initial Sorption of Aromatic Amines

- to Surface Soils." Environ. Toxicol. Chem. 16(8): 1575-1582.
- [4] Perdue, E. M., J. H. Reuter, and R. S. Parrish. 1984. "A statistical model of proton binding by humus." Geochim. Cosmochim. Acta. 48: 1257 - 1263.
- [5] Sabljic, A., H. Gusten, H. Verhaar, and J. Humens. 1995. "QSAR Modeling of Soil Sorption. Improvement and Systematics of $\log K_{oc}$ vs $\log K_{ow}$ Correlations." Chemosphere. 31: 4489-4514.

RESPUESTA DE DINÁMICA DE MOTORES PIEZOELÉCTRICOS DE ONDA VIAJERA FABRICADOS CON MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS

Carlos Plazaola, Humberto Rodríguez
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá,

RESUMEN

Los motores piezoeléctricos son objeto de interés para aquellas aplicaciones en donde se requiere una alta densidad de torque y una operación silenciosa. Uno de los tipos de motores piezoeléctricos más prometedores, el de onda viajera, utiliza excitación piezoeléctrica para la generación de una onda que se propaga a través de un estator metálico. En estos motores, la forma y amplitud de la deformación del estator bajo régimen resonante determinan la potencia máxima y la eficiencia de la transmisión de la energía del estator al rotor.

En este trabajo presentamos un análisis de la posibilidad de utilizar arreglos de láminas de material fibroso, con diferentes orientaciones, para obtener mayores amplitudes de vibración en el estator de los motores piezoeléctricos de onda viajera (MPOV). Se presentan los resultados, obtenidos mediante simulación numérica.

Palabras claves: Motores Piezoeléctricos, materiales compuestos laminados, onda viajera.

ABSTRACT

Piezoelectric motors are very attractive for applications where high density of torque and quiet operation is needed. One of the most promising piezoelectric motors, the traveling wave ultrasonic motor (TWUM), uses piezoelectric excitation to generate a wave, which propagates along a metallic stator. In these motors, when working at resonance, the shape and amplitude of the stator deformations determines the maximum power and efficiency of the energy transmission from stator to rotor.

In this work, the possibility of obtaining higher amplitudes of vibration by using a composite laminated stator is addressed. Numerical simulation results for the stator of the TWUM are presented.

Keywords: Piezoelectric motor, composite laminated materials, traveling wave.

1. Introducción

Los motores piezoeléctricos de onda viajera (MPOV) se investigan en la actualidad como una alternativa para aplicaciones que requieren actuadores con alta densidad de par y/o cuyo funcionamiento sea silencioso. De allí que los MPOV resulten muy atractivos para aplicaciones en robótica y en prótesis [1]. A los motores piezoeléctricos de onda Viajera también se les conoce como Motores Ultrasónicos ya que, la frecuencia de la vibración utilizada para generar el movimiento es mayor a los 20kHz, por lo que es inaudible.

El estator de los MPOV puede tener forma de anillo o de disco y está compuesto de dos elementos, uno fabricado de un material piezoeléctrico y el otro metálico, como se muestra en la figura 1a. Para

este último se prefieren materiales como el acero inoxidable y el invar, cuyas propiedades mecánicas son muy estables ante cambios térmicos. Además, el módulo de Young de estos materiales tiene un valor tal que, conduce a coeficiente de acoplamiento electromecánico del motor (CAEM) altos, cuando se utilizan materiales piezoeléctricos fabricados a partir de óxidos de circonio, titanio y plomo (PZT). Por el contrario, módulos relativamente bajos, como el de los materiales plásticos reducen el CAEM [2].

La cerámica piezoeléctrica es del tipo PZT "dura", las cuales además se dopan para obtener factores de calidad mecánica altos. Vale la pena mencionar que el factor de calidad es más importante inclusive que el coeficiente piezoeléctrico de la cerámica, cuando el actuador opera en resonancia.

De allí que se prefieran las cerámicas duras, a pesar de que las suaves posean coeficientes piezoeléctricos mayores.

La onda viajera se genera en el estator mediante la superposición de dos ondas estacionarias desfasadas 90° en tiempo y espacio. Cada una de estas ondas se excita en una de las mitades del anillo piezoeléctrico. Así, el desfase espacial se

consigue desfasando la polarización de los segmentos de una mitad con respecto a los de la otra un cuarto de la longitud de onda, $\frac{1}{4} \lambda$. Mientras que, el desfase en tiempo se consigue aplicando funciones senoidales temporales

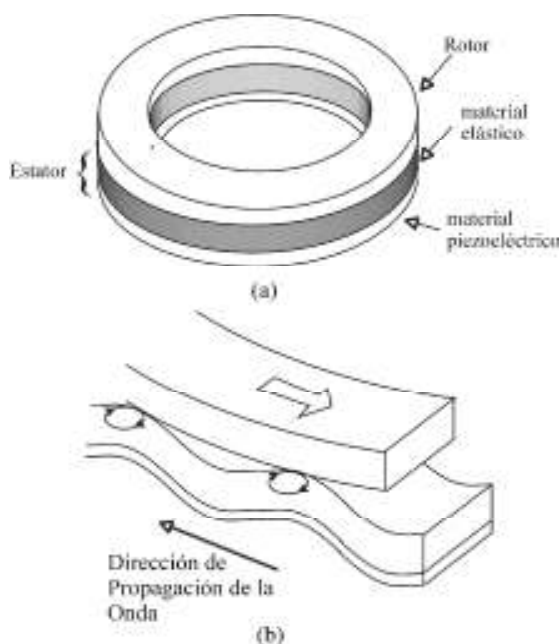


Figura 1: Componentes de un motor piezoeléctrico de onda viajera y funcionamiento.

en cuadratura, como se muestra en la figura 2b. Además, se suelen ranurar dientes en la parte superior de la capa metálica para amplificar el movimiento de elíptico que describen los puntos en la superficie del estator. Finalmente, el rotor va presionado contra el estator por medio de un resorte (no mostrado), de manera que el movimiento del estator se transfiere por contacto directo al rotor.

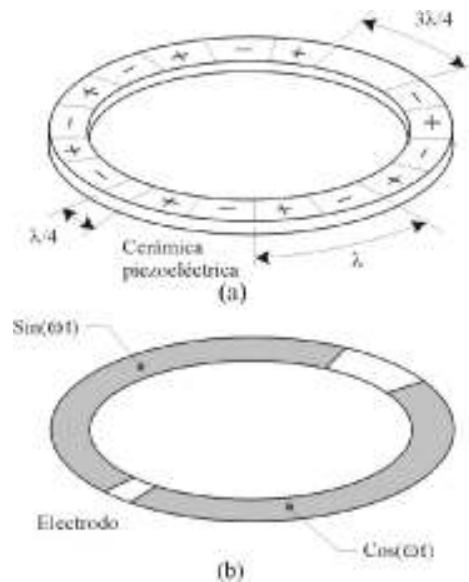


Figura 2: Polarización y excitación de la cerámica.

En el desarrollo de MPOV se hace necesario el dotar de características estructurales anisotrópicas a elementos como el estator, con la finalidad de producir mayores amplitudes en las deflexiones del mismo, de forma tal que se logren los niveles de torque deseados, ya que este último depende de las amplitudes resultantes [3]. Esta condición se obtiene con la presencia de los dientes ubicados en la periferia del estator, dando como

resultado propiedades de rigidez diferentes en las direcciones radiales y circunferenciales, es decir que aunque se construya de un material isotrópico, la presencia de las discontinuidades introducidas por la ubicación de los dientes genera características direccionales (ortotrópicas) en la estructura.

Una forma alterna de dotar a la estructura del estator de propiedades elásticas direccionales, es el fabricarlo de materiales compuestos reforzados con fibras. El uso de estos materiales ofrece la ventaja de poder orientar las fibras de refuerzo de forma tal que se obtengan las propiedades estructurales óptimas para la aplicación

específica. En el caso de una estructura de placa delgada en forma de disco circular las fibras de refuerzo podrían orientarse de manera radial y/o circunferencial para producir un material ortotrópico. Para aplicaciones en MPOV una alternativa que se explora en este trabajo consiste en colocar fibras de refuerzo en forma sesgada con respecto a la dirección radial, tal como se muestra en la figura 3b. Esta configuración para el refuerzo da como resultado un material con características anisotrópicas, de manera específica un material que es, localmente, transversalmente isotrópico.

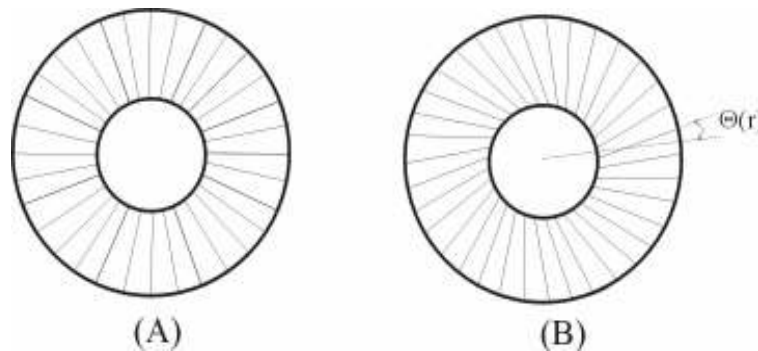


Figura 3: Comparación de un estator en forma de disco anular con fibras de refuerzo radiales (A) y otro con fibras sesgadas (B).

Aún cuando en la literatura se han propuesto un número significativo de variantes al diseño básico de los motores de onda viajera [4], no se ha propuesto todavía la conformación modal y del acoplamiento electromecánico, que se proponen en este trabajo, mediante materiales compuestos laminados. Menos aún se ha considerado la posibilidad de utilizar fibras de refuerzo sesgadas.

2. Modelado del Estator

Se utilizará en este trabajo la formulación de elementos finitos anulares y su solución mediante el método variacional de Ritz, desarrollados por H. Rodríguez *et al.* [5]. En dicha formulación se aplica la teoría de placas laminadas con deformación al cortante e inercias rotatorias a elementos anulares de tres tipos diferentes, en los cuales se divide el estator de MPOV, tal como aparece en la figura 4. Los anillos del tipo I están formados por una única capa de material metálico, los del tipo II por una capa de material piezoeléctrico de espesor uniforme y una capa de material metálico de espesor, el cual varía linealmente con el

radio. Por último los elementos del tipo III están compuestos de tres capas, las dos primeras similares a las del tipo II y una tercera de un material ortotrópico ficticio

(capa dentada) que toma en consideración la anisotropía provocada por los dientes.

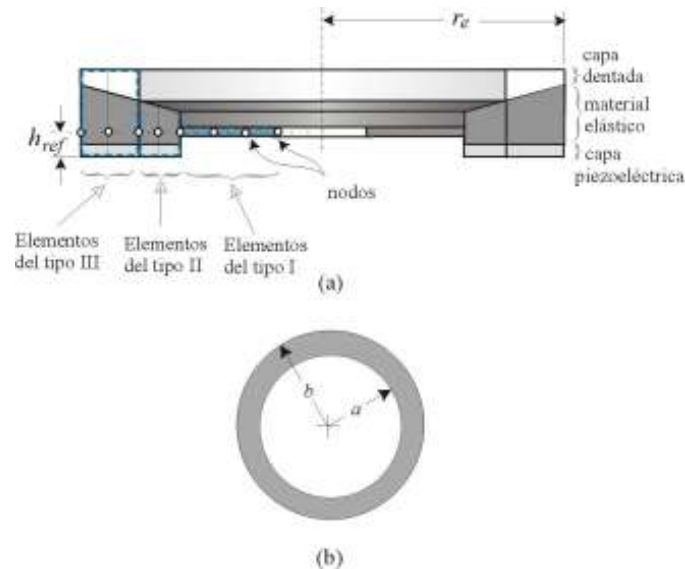


Figura 4: a) Sección transversal que muestra la descomposición del estator en elementos anulares de tres tipos diferentes, b) elemento anular típico.

No se presentan aquí los detalles de esta formulación, por lo que se refiere al lector al trabajo de H. Rodríguez *et al.*, [5] mencionado con anterioridad. La solución numérica se obtuvo utilizando MATLAB para la programación del método.

3. Formulación para el estator de Material Compuesto

Para utilizar las ecuaciones de teoría de placas circulares, es necesario realizar la transformación de las constantes elásticas referidas al sistema principal de coordenadas materiales, para referirlas al sistema de coordenadas estructurales (polares en este caso). Llevando a cabo la transformación se obtienen las ecuaciones que muestran acoplamiento entre las cargas de flexión (momentos) y las deformaciones de la superficie media de la placa, así como también entre las cargas en

el plano (resultantes de esfuerzos) y las curvaturas de las deformaciones. Esto debe contribuir a incrementar las amplitudes de las deflexiones.

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas en la transformación, [6], [7].

Se inicia con la ecuación constitutiva referida al sistema de coordenadas materiales, donde una coordenada es definida a lo largo de las fibras y las otras perpendiculares a ésta. Así,

$$\{\sigma\}_m = [Q]_m \{\varepsilon\}_m,$$

En donde la matriz Q representa la matriz de constantes elásticas referidas al sistema de coordenadas materiales y el subíndice m se refiere a "materiales". Se realiza ahora una transformación de las componentes de esfuerzo y deformación, refiriéndolas al

sistema de coordenadas estructurales, es decir el sistema de coordenadas polares:

$$\begin{aligned}\{\sigma\}_m &= [T]\{\sigma\}_e \\ \{\varepsilon\}_m &= [T]\{\varepsilon\}_e,\end{aligned}$$

En donde la matriz T es la matriz de transformación,

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -mn & mn & 0 & 0 & 0 & (m^2 - n^2) \end{bmatrix}$$

En esta matriz, $m = \cos \theta$ y $n = \operatorname{sen} \theta$. Si se reemplazan las expresiones de transformación para las componentes de esfuerzo y deformación se obtiene,

$$\begin{aligned}[T]\{\sigma\}_e &= [Q]_m [T]\{\varepsilon\}_e \\ \{\sigma\}_e &= [T]^{-1} [Q]_m [T]\{\varepsilon\}_e\end{aligned}$$

Por lo tanto la matriz de constantes elásticas referida al sistema de coordenadas estructurales es:

$[Q]_e = [T]^{-1} [Q]_m [T]$, cuyos elementos son:

$$\begin{aligned}Q_{e11} &= Q_{m11}m^4 + 2(Q_{m12} + 2Q_{m66})m^2n^2 + Q_{m22}n^4 \\ Q_{e12} &= (Q_{m11} + Q_{m22} - 4Q_{m66})m^2n^2 + Q_{m12}(m^4 + n^4) \\ Q_{e13} &= Q_{m13}m^2 + Q_{m23}n^2 \\ Q_{e16} &= -mn^3Q_{m22} + m^3nQ_{m11} - mn(m^2 - n^2)(Q_{m12} + 2Q_{m66}) \\ Q_{e22} &= Q_{m11}n^4 + 2(Q_{m12} + 2Q_{m66})m^2n^2 + Q_{m22}m^4 \\ Q_{e23} &= n^2Q_{m13} + m^2Q_{m23} \\ Q_{e33} &= Q_{m33} \\ Q_{e26} &= -m^3nQ_{m22} + mn^3Q_{m11} + mn(m^2 - n^2)(Q_{m12} + 2Q_{m66}) \\ Q_{e36} &= (Q_{m13} - Q_{m23})mn \\ Q_{e44} &= Q_{m44}m^2 + Q_{m55}n^2 \\ Q_{e45} &= (Q_{m55} - Q_{m44})mn \\ Q_{e55} &= Q_{m55}m^2 + Q_{m44}n^2 \\ Q_{m66} &= (Q_{m11} + Q_{m22} - 2Q_{m12})m^2n^2 + Q_{m66}(m^2 - n^2)^2\end{aligned}$$

Así, las ecuaciones constitutivas resultan como sigue:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{e11} & Q_{e12} & Q_{e13} & 0 & 0 & 2Q_{e16} \\ Q_{e12} & Q_{e22} & Q_{e23} & 0 & 0 & 2Q_{e26} \\ Q_{e13} & Q_{e23} & Q_{e33} & 0 & 0 & 2Q_{e36} \\ 0 & 0 & 0 & 2Q_{e44} & 2Q_{e45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2Q_{e45} & 2Q_{e55} & 0 \\ Q_{e16} & Q_{e26} & Q_{e36} & 0 & 0 & 2Q_{e66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{\theta z} \\ \varepsilon_{rz} \\ \varepsilon_{r\theta} \end{Bmatrix}.$$

Estas ecuaciones en conjunto con las ecuaciones constitutivas del material piezoeléctrico se utilizan para obtener los resultantes de esfuerzos, los cuales una vez expresados en término de los desplazamientos y rotaciones, se reemplazan en el principio de Hamilton. Luego, con el método de Ritz se aproximan los desplazamientos y rotaciones de cada elemento expresándolos en términos de componentes y funciones de coordenadas (admisibles). Finalmente, estos componentes se obtienen al hacerlos satisfacer el principio variacional de Hamilton [5].

1. Discusión de Resultados

Para determinar si la utilización de las fibras sesgadas tiene el efecto esperado, de aumentar la amplitud de vibración del estator, se modificaron las ecuaciones constitutivas como se presentó en la sección anterior para un estator de dimensiones típicas y se compararon sus respuestas modales y forzadas con aquellas de un estator, de dimensiones y materiales iguales, pero con las fibras dispuestas radialmente. Un aspecto que hubo de ser considerado para la simulación

del estator con fibras sesgadas, es que el ángulo del sesgo es función del radio, $\Theta(r)$, como se muestra en la figura 5, por lo que, la matriz constitutiva Q_e varía radialmente. Así, como primera aproximación se promedió el valor de $\Theta(r)$ para cada elemento y se obtuvo una sola matriz para cada elemento anular.

En la figura 6 se muestran las formas modales de los dos estatores reforzados con fibras de carbono, uno de fibra radial y el otro de fibras sesgadas. Como se aprecia en esta figura la respuesta correspondiente al estator con fibras sesgadas tiene mayor amplitud para ambos modos de vibración.

Además de estos resultados, también se obtuvo la respuesta forzada, bajo la acción de voltajes de excitación senoidal, encontrándose igualmente que la amplitud de la respuesta del estator con fibras sesgadas es mayor, como aparece en la figura 7. En todas estas gráficas se muestra sólo la forma radial de la onda, ya que en el sentido circunferencial el modo está fijo, en 5 y 7 para estos ejemplos.

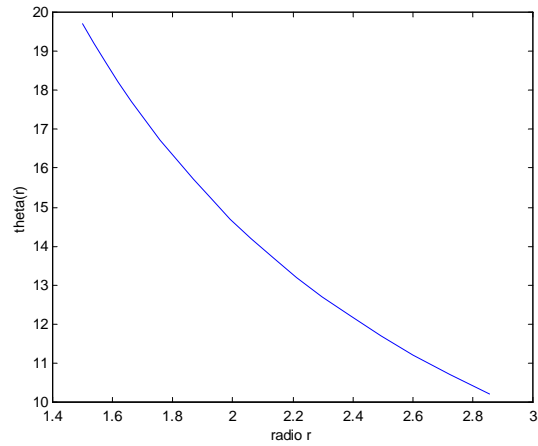


Figura 5: Variación del ángulo del sesgo con la posición radial

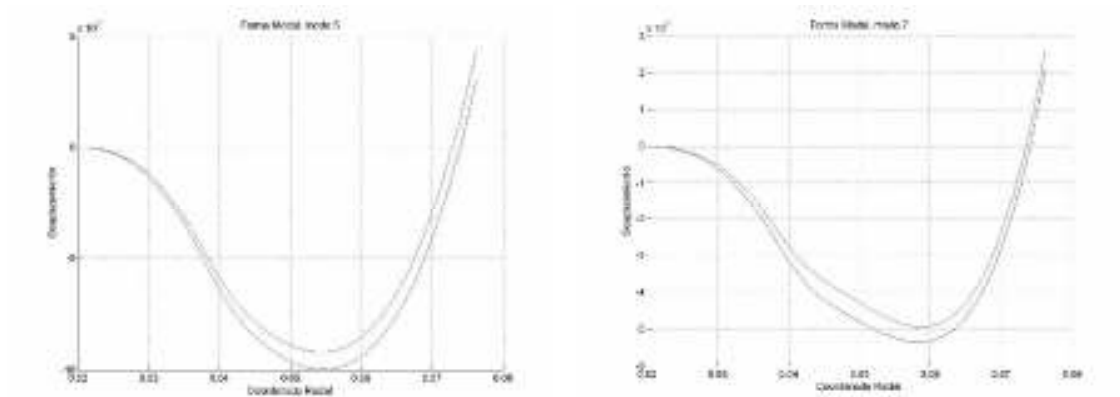


Figura 6: Formas modales del 5º y 7º modo de flexión para los dos estatores. En rojo el desplazamiento del estator con fibras sesgadas y en azul el del estator con fibras radiales.

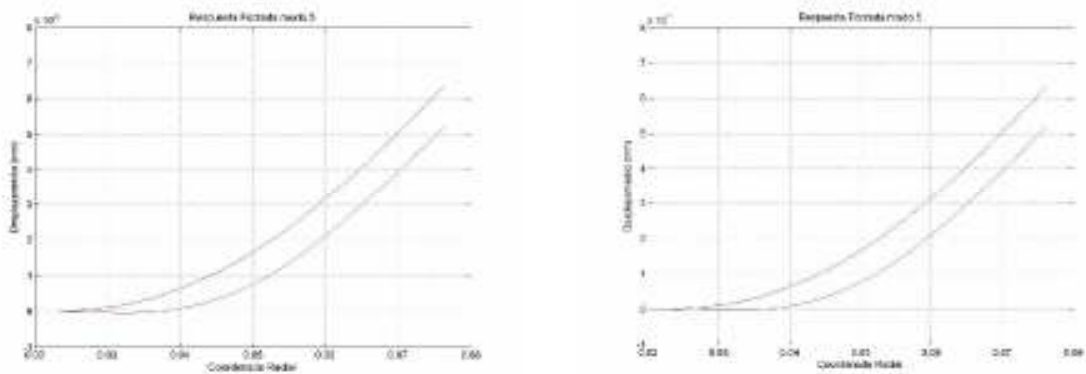


Figura 7: Amplitud de la vibración forzada en función del radio para los dos estatores, para dos modos de vibración de flexión diferentes (5º y 7º). En rojo el desplazamiento del estator con fibras radiales y en azul el estator con fibras sesgadas.

2. Conclusión y Trabajos Futuros

Se ha demostrado, utilizando un modelo previamente validado, que el uso de materiales compuestos reforzados con fibra permite configurar el material para lograr mayores amplitudes en los desplazamientos transversales del estator. Esto se logró orientando las fibras con respecto a la dirección radial, provocando así acoplamiento mecánico entre las deformaciones radiales y las transversales. Al obtener mayores amplitudes se pueden conseguir torques de salida mayores para el MPOV.

Por supuesto, existen un gran número de posibles configuraciones de las capas del estator que necesitan ser investigadas. Se pueden combinar varias capas con orientaciones diferentes entre ellas para conseguir mayor acoplamiento aún. Uno de los problemas que sería interesante abordar es el de optimización del ángulo óptimo de las fibras de las diferentes capas, de cara a maximizar la potencia máxima y/o eficiencia del motor. Para ello habría que incorporar en el modelo la interacción con el rotor.

Otro aspecto que sería importante investigar, es el porcentaje óptimo de los materiales con que se fabrican la matriz y las fibras de las láminas y de sus propiedades mecánicas. También, el tema de la resistencia mecánica para diferentes tipos de fallas del estator laminado, una vez se consigan las amplitudes deseadas, resulta de sumo interés.

Por último, la comprobación experimental de estos resultados es una etapa fundamental para evaluar el desempeño real del estator y del motor piezoeléctrico como un todo.

6. Bibliografía

- [1] J.L. Pons, H. Rodríguez, I. Luyckx, D. Reynaerts, R. Ceres, H. Van Brussel. *High torque ultrasonic motors for hand prosthetics: Current status and trends*, Technology and Health Care, 10(2):121-133, 2002.
- [2] J.L. Pons, H. Rodríguez, J.F. Fernández, M. Villegas, F. Seco. *Parametrical optimisation of ultrasonic motors*, Sensors and Actuators, A 107 (2003) 169–182.
- [3] T. Sashida y T. Kenjo, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Claredon Press, Oxford, 1993.
- [4] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa y N. Nakamura, *Ultrasonic Motors: Theory and applications*. Claredon Press, Oxford, 1993.
- [5] H. Rodríguez, J.L. Pons, R. Ceres. *Novel Modeling Technique for the Stator of Traveling Wave Ultrasonic Motors*: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 50, No. 11, Noviembre, 2003.
- [6] C. R. Plazaola, *Effects of Blast Loads on laminated Composite Material Circular Cylindrical Shells, Including Transverse Shear Deformation*, Tesis de Maestría en Ing. Mecánica. University of Delaware, 1991.
- [7] J. R. Vinson y RL Sierakowski, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Martinus Nijhoff Publishers (now Kluwer Academic Publishers) Dordrecht, The Netherlands, 1986.

ESTABILIDAD DE UN ROBOT CUADRÚPEDO DURANTE UN MODO DE CAMINAR CUASI-ESTÁTICO MEDIANTE REALIMENTACIÓN DEL ZMP

Héctor Montes Franceschi
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá

RESUMEN

En este artículo se explica un método para lograr la estabilidad de un robot caminante de cuatro patas durante una locomoción cuasi-estática. Esta locomoción se conoce con el nombre de modo de caminar discontinuo de dos fases [1]. El método incluye las mediciones de las fuerzas en cada una de las patas del robot en el eje de las 'z', para ello, se implementan galgas extensiométricas sobre el eje de cada pie del robot [2]. El robot utilizado como plataforma experimental es un robot cuadrúpedo caminante y escalador de grandes dimensiones, accionado hidráulicamente, llamado ROBOCLIMBER [3]. Con la medición de las fuerzas en cada una de las patas del robot se realiza el cálculo, en tiempo real, del punto de momento cero, ampliamente conocida en el mundo de la robótica con el acrónimo de ZMP [4] (del inglés *Zero-Moment point*). El método de estabilidad propuesto compara el ZMP con centro de gravedad (cdg) del robot en cada instante durante el modo de caminar. El error que existe de la diferencia de estas variables, se convierte a través del sistema de control, en las fuerzas deseadas que deben tener cada una de las patas de la máquina para que el ZMP del robot esté dentro de los márgenes de estabilidad (polígono de soporte).

Palabras claves: Robot cuadrúpedo, medición de fuerza, punto de momento cero (ZMP), centro de gravedad, margen de estabilidad.

ABSTRACT

In this article, an approach to obtain the stability of a four leg walking robot during quasi-static locomotion is described. This robot locomotion is known like two-phase discontinuous gait [1]. In this approach, the force measurements in each one of the 'z' axes of the robot legs are required. For this reason, strain gauges have been implemented on each robot foot axis [2]. The experimental platform employed is a quadruped walking and climbing robot of great dimensions driven hydraulically called ROBOCLIMBER [3]. By means of the forces measurement in each one of the robot legs the calculation (in real time) of the point where the summation of moments is zero, is carried out. This value is widely known in the robotics world with the acronym ZMP (Zero-Moment point) [4]. The proposed method of stability compares the ZMP with center of gravity (cog) of the robot at each moment during the locomotion. The control system converts the error between the ZMP and the cog in desired forces in each robot legs. Thus, the ZMP produced by the robot legs contact forces are inside of the stability margins (support polygon).

Keywords: quadruped robot, force measurement, zero-moment point (ZMP), center of gravity (cog), stability margin.

1 Introducción

Entre las diversas clases de robots que existen hoy en día, los robots caminantes [5] poseen características específicas (debido al hecho de emplear patas) diferenciadas de las que exhiben los robots que emplean ruedas para su desplazamiento, por lo tanto, poseen ventajas y desventajas. Entre las ventajas que ofrecen las máquinas caminantes con respecto a las conducidas por ruedas [6], se pueden señalar las siguientes: (a) pueden desplazarse sobre terrenos no estructurados y discontinuos, lo que le facilita realizar diversas tareas; (b) dependiendo del tamaño del robot pueden

presentar menos problemas de atascamiento sobre terreno blando; producen menos daños al entorno por donde se desplazan; (c) poseen una omnidireccionalidad inherente en el modo de caminar; (d) pueden sortear diferentes obstáculos, así como rebasar zanjas; etc.

Sin embargo, los robots caminantes presentan algunas desventajas en relación a los robots con ruedas, señalando como las más significativas: (a) que poseen una velocidad muy inferior si se trasladan dentro de un terreno continuo y sin obstáculos; (b) la complejidad en el diseño mecánico, electrónico y de control, ya que se debe

coordinar un gran número de actuadores que propulsan la estructura del robot [6].

Por otro lado, la estabilidad de los robots caminantes, durante la realización del ciclo de locomoción, es un reto al que los investigadores dedican un gran esfuerzo [7-10]. Por lo tanto, la consideración de una determinada medida de estabilidad durante la locomoción influye de manera directa en la seguridad de la máquina. En [10] se encuentra un estudio comparativo de las medidas y de los principales márgenes de estabilidad para robots caminantes. Este estudio se centra en la estabilidad de robots de cuatro o más patas.

Así pues, se puede decir que la situación respecto a la estabilidad es particularmente complicada en robots de menos de cuatro patas. Por ejemplo, en un robot bípedo, el criterio de estabilidad más utilizado por los investigadores es el de generación de trayectoria para el ZMP [4], lo que permite establecer la relación que existe entre las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares del robot con los márgenes de estabilidad de la máquina, durante las fases de locomoción.

En este artículo se presenta un método para mejorar la estabilidad de un robot cuadrúpedo que presenta las patas en configuración cilíndrica. Para ello se obtiene el ZMP por medio de la medición de las fuerzas de contacto de las patas con el

suelo. El ZMP se compara con el cdg del robot y el centro geométrico del cuerpo del robot, con la finalidad de reducir la diferencia que existe entre las variables y, por lo tanto, procurar una mayor estabilidad durante la marcha de la máquina. Así pues, se presentan los resultados de simulación de este método realizados en MatLab®.

2 Configuración general de ROBOCLIMBER

ROBOCLIMBER [3, 11] es un robot cuadrúpedo de grandes dimensiones que puede desplazarse por el suelo, y que puede, escalar las laderas de las montañas con ayuda de cables de sujeción.

Todo el concepto del robot se basa en una estructura mecánica con una masa aproximada de 2500 Kg. Las patas del robot tienen configuración cilíndrica [3] y éstas están alimentadas por medio de un sistema hidráulico y cuyo sistema de control está situado a bordo del robot [11]. Cada pata del robot tiene tres grados de libertad, donde una articulación es de rotación y las otras dos son prismáticas, y la masa total de cada una de las patas es de 170 Kg. El sistema está diseñado para sobrepasar obstáculos algo mayores de 500 mm., y además, el robot puede soportar, a bordo, el equipo necesario (unos 1500 Kg. adicionales) para realizar las tareas de consolidación y de monitorización de las laderas de montañas.

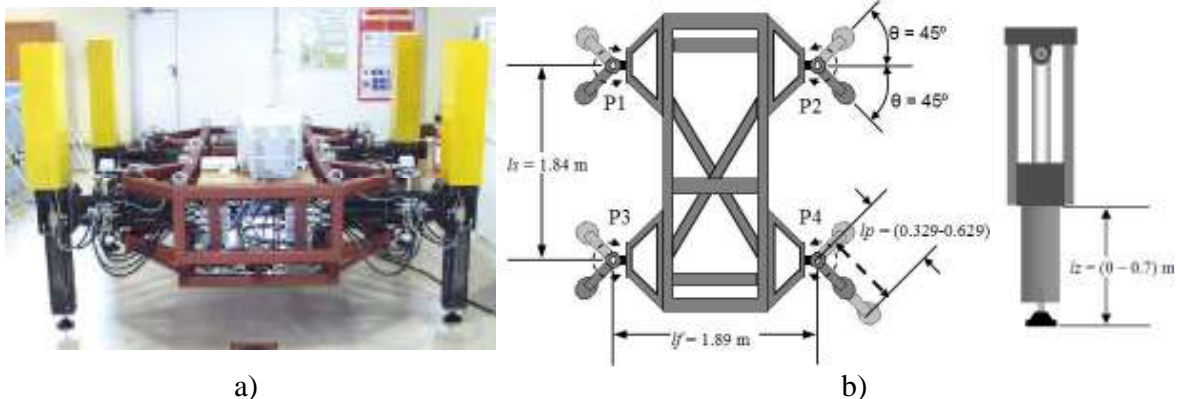


Figura 1. (a) ROBOCLIMBER en los laboratorios del IAI-CSIC; (b) Parámetros cinemáticos del robot (vista del plano lateral y vista lateral de la pata del robot).

La articulación de rotación y una articulación prismática de cada pata del robot están sobre el plano lateral de la máquina, mientras que el movimiento de la otra articulación prismática es ortogonal a dicho plano. En la Figura 1(a) se muestra ROBOCLIMBER en su primera configuración. La configuración mecánica del robot se muestra en la Figura 1(b). En dicha figura se muestra la vista superior del robot y la vista lateral de una de las patas.

En la configuración mecánica del robot se pueden apreciar las cuatro articulaciones rotacionales y las cuatro articulaciones radiales prismáticas del robot. Las articulaciones rotacionales tienen un recorrido de $\pm 45^\circ$, y las articulaciones radiales prismáticas tienen un desplazamiento de 300 mm. La tercera

articulación (véase la Figura 1(b)) tiene un desplazamiento prismático de 700 mm., en el eje 'z', cuando el robot está sobre una superficie horizontal.

2.1 Formulación matemática del ZMP

Para obtener el ZMP, además, de medir las fuerzas de contactos de las patas del robot, hay que tener en cuenta los parámetros cinemáticos del robot (véase la Figura 1(b)) y la postura durante el seguimiento de una trayectoria. Así pues, cuando el robot está dinámicamente equilibrado se puede obtener el ZMP en el plano sagital (plano de avance) y en el plano transversal (plano de la vista frontal) del robot [12].

Así, el ZMP sobre los planos sagital y transversal son, respectivamente

$$ZMP_s = \frac{d_1 \mathbf{a}(\mathbf{Kv} + \mathbf{b}) + \mathbf{cA}(\mathbf{Kv} + \mathbf{b})}{\mathbf{c}(\mathbf{Kv} + \mathbf{b})}; \quad ZMP_t = \frac{d_2 \mathbf{d}(\mathbf{Kv} + \mathbf{b}) + \mathbf{dB}(\mathbf{Kv} + \mathbf{b})}{\mathbf{c}(\mathbf{Kv} + \mathbf{b})} \quad (1)$$

donde,

$$d_1 = \frac{ls}{2}; \quad d_2 = \frac{lf}{2}; \quad \mathbf{a} = [1 \quad 1 \quad -1 \quad -1]; \quad \mathbf{c} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]; \quad \mathbf{d} = [-1 \quad 1 \quad -1 \quad 1]$$

$$\mathbf{A} = \text{diag.}[lp_1s_1 \quad lp_2s_2 \quad lp_3s_3 \quad lp_4s_4]; \quad \mathbf{B} = \text{diag.}[lp_1c_1 \quad lp_2c_2 \quad lp_3c_3 \quad lp_4c_4]$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 16.1 \\ 30.0 \\ -33.1 \\ 87.7 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v} = \frac{1}{v_s} \begin{bmatrix} v_{def1} - v_{do1} \\ v_{def2} - v_{do2} \\ v_{def3} - v_{do3} \\ v_{def4} - v_{do4} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K} = \text{diag.}[28651 \quad 20868 \quad 23978 \quad 20463] \quad (2)$$

Las funciones para el cálculo del ZMP (1) se pueden utilizar, indistintamente, si el robot tiene apoyadas tres o las cuatro patas. También, se incluye en cálculo cualquier tipo de desplazamiento de las articulaciones rotacionales o prismáticas radiales.

3 Estructura del controlador

Durante la generación de un modo de caminar de una máquina caminante es indispensable mantener al robot en equilibrio durante la transferencia de una pata o durante el movimiento del cuerpo.

Cuando el robot está en equilibrio, entonces, se dice que el robot está en un estado estable. Por otro lado, cuando el robot deja de estar en equilibrio, éste volcaría, estando en un estado inestable. Algunos autores han realizados estudios de estabilidad para robots caminantes proponiendo algunos criterios de estabilidad los cuales son medidos por los denominados márgenes de estabilidad [7-10].

Como un criterio de estabilidad, se propone una estrategia de control que incluye la

realimentación de fuerza. En este caso se desea que el ZMP siga al centro de gravedad del robot, cuando éste realiza un modo de caminar. Para ello, se calcula el ZMP, en tiempo real, evitando cualquier interferencia ocasionada por incertidumbres en las mediciones de las fuerzas, esto sucede cuando hay deslizamientos o en el

momento en que sobreviene algún fenómeno transitorio de la distribución de las fuerzas. En esta estrategia de control se modifica el desplazamiento de las patas en el eje vertical de tal modo que el ZMP se acerque al centro de gravedad del robot (ver Figura 2).

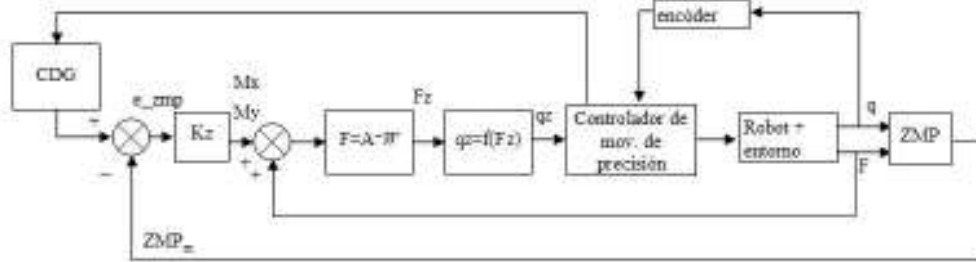


Figura 2. Estructura del sistema de control para la estabilización de ROBOCLIMBER durante un modo de caminar cuasi-estático.

Para ello se define como sistema de referencia del robot su centro geométrico en el plano lateral, esto es debido a que sólo

se miden las fuerzas que lo atraviesan. Por lo tanto, se pueden escribir las ecuaciones de equilibrio como $\mathbf{W} = \mathbf{AF}$,

$$\begin{bmatrix} -F_z \\ -M_x \\ -M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ p_{y1} & p_{y2} & p_{y3} & p_{y4} \\ -p_{x1} & -p_{x2} & -p_{x3} & -p_{x4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{z1} \\ f_{z2} \\ f_{z3} \\ f_{z4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde, F_z , es la sumatoria de fuerzas de reacción sobre el suelo; M_x , es el momento que existe sobre el eje 'x' del centro de gravedad; M_y , es el momento sobre el 'y' del centro de gravedad; p_{yi} , es la diferencia de la posición de las patas en el eje 'y' con el centro de gravedad sobre el plano sagital $p_{yi} = y_i - cdg_{sagital}$ y p_{xi} , es la diferencia de la posición de las patas en el 'x' con el centro de gravedad sobre el plano transversal $p_{xi} = x_i - cdg_{transversal}$.

Se está representando mediante la ecuación de equilibrio (3) la forma de

resolver la distribución de fuerzas en un robot cuadrúpedo empleando mediciones de fuerzas en el eje vertical. Como el robot realiza una trayectoria cuasi-estática, entonces, es posible representar el problema de la distribución de las fuerzas de manera separada del problema de la dinámica. El objetivo del problema de la distribución de fuerzas es calcular qué fuerzas de contacto que se deben tener con el entorno, para luego saber que disposición de las patas hay que efectuar para que sigan a las fuerzas de contacto, previamente calculadas.

ROBOCLIMBER es un robot estáticamente estable, que se puede sustentar con sólo tres patas de apoyo, si estas forman un polígono de soporte en donde el centro de gravedad o el ZMP, esté dentro de él. Como es necesario conocer las fuerzas de contacto que deben tener las patas, la ecuación (3) hay que despejarla para conocer cada una de las fuerzas. Si el apoyo es de solo tres de las patas es posible despejarla porque la matriz A, sería de 3x3, y encontrar la inversa de ella es una operación muy sencilla. Por el contrario, cuando se tienen las 4 patas en contacto con el suelo se tiene una matriz A (3x4), por lo que ya no será posible calcular su inversa. Existe un criterio sencillo y directo para encontrar la inversa de una matriz que no sea cuadrada, que es el empleo de la pseudoinversa de Moore-Penrose, que minimiza la suma de los cuadrados de las componentes de las fuerzas, y, así, la solución para F de la ecuación (4) queda como, $\mathbf{F} = -\mathbf{A}^+ \mathbf{W}$, donde, $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1}$ es la pseudoinversa de A.

Ahora, en la estructura de control propuesta (ver Figura 2) se plantea calcular los momentos M_x y M_y como el error que existe entre el ZMP y el centro de gravedad (cdg) multiplicados por una constante de ajuste

experimental. Lo que se pretende es minimizar el error que existe entre el ZMP y el cdg. Luego, estos momentos combinados con la sumatoria de fuerzas de contacto, son utilizados junto con la pseudoinversa de A (o inversa dependiendo del número de patas en contacto) para encontrar las nuevas fuerzas de contacto que debe tener el robot. Teniendo un modelo que relacione las fuerzas con la posición de cada pie en el eje de las 'z' en las condiciones de postura adecuada, entonces, es posible controlar en posición las articulaciones prismáticas de cada pata en el eje 'z'.

4 Resultados de la simulación

Antes de iniciar con la simulación del controlador propuesto, se obtuvieron los modelos de las posiciones en el eje 'z' en función de las fuerzas de contacto de cada una de las patas del robot. Para ello, se realizaron muchos ensayos experimentales registrando mediciones de posición y de fuerza de cada una de las patas del robot en las posturas de un modo de caminar discontinuo de dos fases. Con los resultados conseguidos se obtuvo el modelo $q_{zi}(F_i)$ de las patas del robot, representado por la siguiente ecuación matricial,

$$\begin{bmatrix} q_{z1} \\ q_{z2} \\ q_{z3} \\ q_{z4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.67 \times 10^{-7} & 7.94 \times 10^{-7} & -3.85 \times 10^{-8} & 3.57 \times 10^{-8} \\ 3.51 \times 10^{-4} & -6.2 \times 10^{-3} & 3.51 \times 10^{-4} & -5.89 \times 10^{-4} \\ -0.33 & 16.01 & -1.06 & 3.08 \\ 522 & -1309 & 1387 & -4715 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1^3 & F_2^3 & F_3^3 & F_4^3 \\ F_1^2 & F_2^2 & F_3^2 & F_4^2 \\ F_1 & F_2 & F_3 & F_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

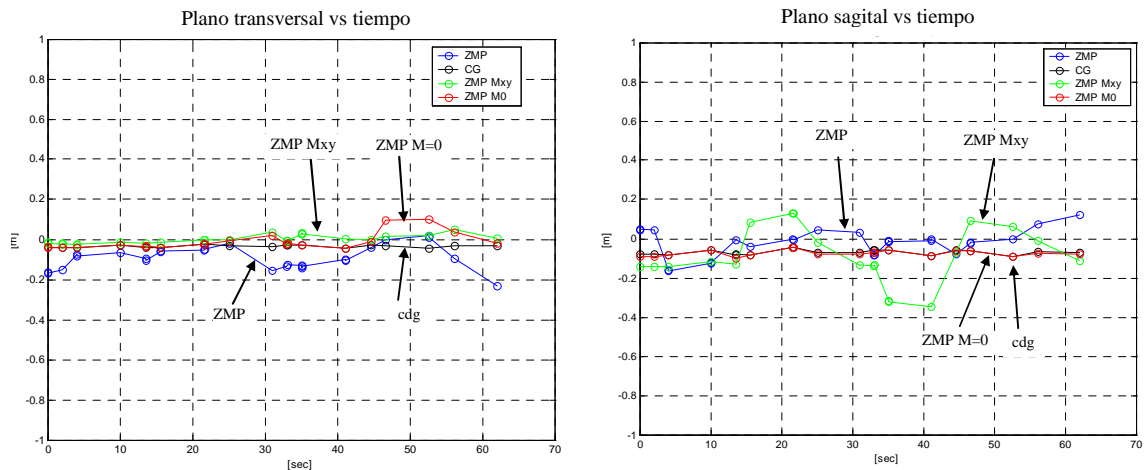


Figura 3. Comparación de los resultados del ZMP con el cdg para el plano transversal y sagital.

En una postura de contacto con tres patas, es posible solo mover la pata diagonalmente contraria a la pata que no está apoyada para desplazar el ZMP hacia el cdg. Según algunos criterios de control, es posible dar por válida una banda estrecha del error del ZMP respecto al cdg, para luego seguir con el modo de caminar. Otro criterio puede darse al establecer $M_x = M_y = 0$, es decir, que los momentos alrededor de los ejes que cruzan el centro de gravedad se anulen, en lugar de calcularlos utilizando el concepto anterior de $M_x = K(ZMP_sag - cdg_sag)$ y $M_y = K(ZMP_trans - cdg_trans)$.

En la Figura 3 se muestran los resultados de simulación realizados en MatLab® para la obtención del ZMP.

5 Conclusión

Después de comparar los resultados obtenidos del ZMP con la utilización de ambos criterios, el primero, el del cálculo de los momentos con la diferencia de ZMP y cdg y el segundo, estableciendo los momentos en 'x' y 'y' iguales a cero, se obtiene, aparentemente, mejor estabilidad con el segundo criterio, pero para tomar una decisión definitiva conviene implementarlo y evaluarlo experimentalmente.

En cualquier caso, se ha logrado obtener un error muy pequeño para el criterio de $M=0$ en el plano sagital, pero en el plano transversal, el criterio del cálculo de M_x y M_y , resulta algo menor que para el criterio de $M=0$. Generalmente, se puede dar como válido en esta simulación, que el criterio de establecer los momentos a cero proporciona una mejor estrategia para estabilizar el robot.

6 Agradecimientos

Quiero agradecer a mi Tutor Dr. D. Manuel Armada por haberme brindado la oportunidad de trabajar con ROBOCLIMBER, el cual, se ha realizado en el marco de un proyecto de la Comunidad Europea bajo el contrato G1ST-CT-2002-50160. Los participantes del proyecto han sido: ICOP S.p.a. (coordinador), Space Applications Services (SAS), Otto Natter Prazisionenmechanik GMBH, Comacchio SRL, Te.Ve. Sas di Zannini Roberto & Co., MACLYSA, D'Appolonia S.p.a., Universidad de Genova (DIMEC) y el Instituto de Automática Industrial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAI-CSIC).

7 Referencias Bibliográficas

- [1] P. González de Santos y M.A. Jiménez, "Generation of discontinuous gaits for quadruped walking vehicles", *Journal of Robotics*

- Systems, Vol. 12, No. 9, pp. 599-611, 1995.
- [2] H. Montes, S. Nabulsi, M. Armada y V. Sánchez, "Design and implementation of force sensor for ROBOCLIMBER", In *Proceedings of International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR'04*, September 22-24, Madrid, España, 2004.
- [3] P. Anthoine, M. Armada, S. Carosio, P. Comacchio, F. Cepolina, P. González, T. Klopff, F. Martin, R.C. Michelini, R.M. Molfino, S. Nabulsi, R. Razzoli, E. Rizzi, L. Steinicke, R. Zannini y M. Zoppi, "ROBOCLIMBER", In Proc. ASER03, 1st International Workshop on Advances in Service Robotics, Marzo 13-15, Bardolino, Italia, 2003.
- [4] M. Vukobratovic y D. Juricic, "Contribution to the síntesis of biped gait", *IEEE Trans. Bio-Medical Engineering*, Vol. 16, pp. 1-6, 1969.
- [5] K. Berns, *The walking machine catalogue*, disponible en <http://www.walking-machines.org/> [Consulta: 17 de agosto de 2005].
- [6] M. Armada y P. González de Santos, "Climbing, walking and interventions robots", *Industrial Robots: An International Journal*, Vol. 24, No. 2, MCB University Press, 1997.
- [7] D. E. Orin, *Interactive control of a six-legged vehicle with optimization of both stability and energy*, Ph. D. Thesis, The Ohio State University, 1976.
- [8] M. H. Raibert, *Legged robots that balance*, The MIT Press. Cambridge. Massachussets, 1986.
- [9] B.S. Lin y S.M. Song, "Dynamic modeling, stability, and energy efficient of a quadrupedal walking machine", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, Georgia, pp. 367-373, 1993.
- [10] E. García, *Optimización de la estabilidad y la velocidad de robots caminantes*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2002.
- [11] S. Nabulsi, H. Montes y M. Armada, "ROBOCLIMBER: control system architecture", In: *Proceedings of International Conference on Climbing and Walking Robots*, Septiembre 22-24, Madrid, España, 2004.
- [12] H. Montes, S. Nabulsi y M. Armada, "Detecting Zero-Moment Point in legged robot", In: *Proceedings of International Conference on Climbing and Walking Robots*, Septiembre 22-24, Madrid, España, 2004.