

127
20



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN
PARA UNA AERONAVE
DE BAJO PESO UTILIZANDO UNA RED.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(ÁREA MECÁNICA)**

PRESENTAN

LUIS EMILIO MONTEERRUBIO SALAZAR

FERNANDO IBARRA PÉREZ

**Director de Tesis: M. C. Margarita Navarrete Montesinos
Codirector de Tesis: M. I. Jorge Prado Molina**

U.N.A.M. México, D.F. 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE.

AGRADECIMIENTOS.	3
RESUMEN.	4
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO GLOBAL.	4
1. INTRODUCCIÓN.	5
1.1. Generalidades.	5
1.2. Aeronaves de control remoto.	6
1.3. Características de los ACR.	7
1.4. Aplicaciones de los ACR en el área civil.	8
1.5. Sistemas de percepción remota.	9
2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN.	10
2.1. Antecedentes.	10
2.2. Descripción de los S. R. más utilizados.	11
3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN.	17
3.1. Introducción.	17
3.2. Presentación de datos.	17
3.3. Análisis de comportamiento de los S. R.	22
4. SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN MÁS ADECUADA DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN (SR).	23
4.1. Introducción.	23
4.2. Presentación gráfica de las configuraciones de red opcionales para el SR.	24
5. MODELADO DINÁMICO.	28
5.1. Introducción.	28
5.2. Modelado del sistema de red direccionado con cables.	28
5.2.1. Comportamiento del ACR.	28
5.2.2. Descripción del Sistema de Recuperación.	30
5.2.3. Ecuaciones de movimiento.	31
5.2.4. Resultados de las ecuaciones para los casos críticos.	40
5.3. Modelado del sistema de captura con red horizontal-vertical.	48
5.3.1. Resultados de las ecuaciones para una velocidad de 22.22 m/s.	55
5.4. Conclusiones.	58
6. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN.	57
6.1. Introducción.	57
6.2. Diseño general del Sistema de Recuperación.	58
6.2.1. Selección de materiales y tecnología de construcción.	59
6.2.2. Dispositivos absorbedores de energía.	61

6.3.	Análisis estructural con elemento finito.	64
6.3.1.	Reacciones en los extremos de la red.	65
6.3.2.	Análisis de los esfuerzos y desplazamientos de los cables guía.	67
6.3.3.	Análisis de los postes verticales.	69
7.	DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE TRANSFERENCIA DE CARGA Y MOVIMIENTO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN.	72
7.1.	Introducción.	72
7.2.	Consideraciones para el diseño.	73
7.3.	Selección de los cables.	74
7.4.	Diseño de los reductores de desplazamiento y de la transmisión.	75
7.5.	Ejes de las poleas, reductor y transmisión.	76
7.6.	Baleros para los ejes.	79
7.7.	Cuñas de los ejes.	80
7.8.	Tomillos para ejes y chumaceras.	80
7.9.	Ensamble de los tambores.	82
7.10.	Conclusión.	82
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
	APÉNDICE A.	85
	APÉNDICE B.	92
	APÉNDICE C.	96
	APÉNDICE D. DIBUJOS DE DETALLE Y ENSAMBLE.	102
	BIBLIOGRAFÍA	125

TESIS

COMPLETA

AGRADECIMIENTOS:

Al Dr. Ricardo Peralta y Fabi, jefe del Laboratorio de Ingeniería Aeroespacial del Instituto de Ingeniería por las facilidades y el apoyo brindado para la elaboración de esta tesis.

A la M. C. Margarita Navarrete Montesinos, por su ayuda y orientación.

A nuestro compañero y amigo Omar Jiménez, por su cooperación en la búsqueda de información y apoyo en esta tesis.

Al M. I. Jorge Prado Molina, por sus valiosos comentarios y correcciones.

RESUMEN.

En las últimas décadas, los sistemas de adquisición de información remota, así como otras aplicaciones, se basan en aeronaves teledirigidas de bajo peso. Estas han tenido un impacto significativo al sustituir a los satélites artificiales en algunas aplicaciones.

Uno de los problemas más importantes a resolver en estos sistemas es la recuperación de la aeronave sin utilizar pistas de aterrizaje, para aumentar su versatilidad.

Este trabajo presenta el diseño preliminar de un Sistema de Recuperación para una aeronave de hasta 40 kg y velocidad de aterrizaje de 70 km/hr \pm 10 km/hr basándose en el concepto de captura mediante una red. El diseño se basa en: el modelado dinámico de la captura, las características de la aeronave, especificaciones funcionales, los recursos y la infraestructura con que se cuenta para este proyecto.

Además, tanto en el diseño conceptual como en el de detalle se consideran los procedimientos de manufactura y ensamble.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO GLOBAL.

La percepción remota realizada mediante aeronaves y satélites artificiales es una técnica muy utilizada para obtener imágenes de la superficie terrestre. Sin embargo, a pesar de existir imágenes multispectrales provenientes de satélites desde 1972, su costo tan elevado ha impedido su utilización amplia por grupos de investigación y de servicios de exploración en países de América Latina. Las imágenes pueden ser adquiridas por medio de aviones convencionales equipados con cámaras electro-ópticas, pero el costo de mantenimiento y de operación es también alto. Por ello, dada la importancia de las imágenes, y considerando la dependencia al contratar este servicio de compañías extranjeras, el Instituto de Ingeniería de la UNAM en colaboración con otras instituciones ha impulsado el desarrollo de un sistema de percepción remota propio.

La utilización de una aeronave de control remoto (ACR) para la adquisición de diferentes tipos de imágenes (fotográficas, digitales y video), es una opción para obtener la información necesaria para la planeación y fomento del desarrollo en diferentes áreas. En 1988 se inicia el desarrollo de aeronaves telecontroladas en el Laboratorio de Ingeniería Aeroespacial donde se diseñan tanto la aeronave como los sistemas de control, estructura, estación terrena de mando y sistemas de lanzamiento y recuperación.

El objetivo del ACR es obtener imágenes de video en color, multispectral, infrarrojas, fotográficas y de radar del territorio nacional que serán usadas para estudiar la población, el uso de suelo y el tráfico en las ciudades, el avance de erosión, desertificación y deforestación, clasificar suelos, detectar e identificar descargas contaminantes de industrias, buques y exploraciones petroleras, detectar bancos de peces, planear localización óptima de nuevas carreteras a través de imágenes y modelos digitales del terreno, estudiar, localizar y evaluar nuevos sitios arqueológicos con radar.

Para llevar a cabo estas operaciones difícilmente se contará con pistas cerca del lugar que se requiere monitorear, por tanto el despegue y aterrizaje de la aeronave, debe ser independiente de las pistas, para ello se necesitan desarrollar sistemas de lanzamiento y recuperación que sean versátiles y transportables.

En el presente trabajo se diseña el Sistema de Recuperación para una aeronave de bajo peso teledirigida, el sistema de rescate debe recuperar a la aeronave sin daño alguno, ser de fácil operación, mínimo mantenimiento y de bajo costo, tanto en la ejecución como en la manufactura.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN.

1.1 GENERALIDADES.

Una de las fuentes más importantes del impulso tecnológico en este siglo ha sido el desarrollo de la aeronáutica. La industria aeronáutica como tal se inicia cuando se quiere dar solución a dos problemas fundamentales:

- como medio de combate en los conflictos armados y
- como medio de transporte, ya sea de personas o de carga útil.

Paradójicamente, los mas de noventa años del aeroplano moderno serían hoy mucho menos en términos de evolución y madurez si no hubieran existido ejércitos, dos guerras mundiales y centenares de conflictos menores para alimentarlos. Los primeros aviones que participaron en los conflictos, eran solamente de reconocimiento y fueron introducidos en la Primera Guerra Mundial. Posteriormente se constituyeron unidades de aviación de bombardeo y de caza en la misma guerra. Con la llegada de la paz se inició una nueva fase en el desarrollo de la aeronáutica; otros estímulos alimentaron la necesidad de superación: la aviación civil, las competencias, el entusiasmo por las grandes travesías, pero su contribución no fue tan espectacular como la que dio el periodo bélico. El aeroplano no cambió mucho hasta el comienzo de la Segunda Guerra Mundial, que resultó un potente estímulo para su desarrollo y sentó las bases para la industria aeronáutica moderna.

El trastorno que la guerra impuso para el orden de los pueblos y naciones creó un nuevo equilibrio mundial en torno a dos potencias: EUA y la Unión Soviética, convirtiéndose el avión en centro de la capacidad bélica de cada país, incluyendo artefactos nucleares y generaciones de misiles aeroportados. En la actualidad la aviación se ha convertido en un instrumento de consumo y bienestar por una parte y llave de complejos equilibrios militares por otro. Además, todos los aviones que han señalado las etapas

más importantes y constituido la estructura de la moderna aviación civil han estado relacionados directa e indirectamente a la actividad de los ejércitos.

La ingeniería aeronáutica es sumamente compleja, pues raro es el ramo industrial que no participa de cerca o de lejos en la construcción de un avión moderno. Después de haber utilizado la madera y la tela en los primeros aparatos, fueron adoptadas las aleaciones livianas a base de aluminio. Hoy, el calor que se produce a velocidades supersónicas, obliga a adoptar otros materiales como aleaciones de titanio, materiales compuestos y cerámicos, que antes ni siquiera se fabricaban industrialmente. También se observó el avance en la aerodinámica que se logró en diferentes configuraciones de las aeronaves. Es de notar la importancia creciente de la electrónica en los servicios propios del avión y en todas las formas de radionavegación como el radar y los dispositivos radioelectrónicos; además ha contribuido de manera fundamental en las aplicaciones de los recursos de la teledetección aérea, donde se tiene un sistema emisor-receptor que controla a distancia el dispositivo.

Una de las aplicaciones de la teledetección donde se controla el vuelo de los aviones sin la necesidad de piloto, son las ACR (aeronaves de control remoto o aviones de control remoto).

1.2 AERONAVES DE CONTROL REMOTO.

Los ACR se distinguen por ser vehículos no tripulados que poseen autonomía de vuelo muy variable y que se desplazan en el aire dirigidos por un sistema de control automático. Dentro de esta clasificación no se incluyen los cohetes ni misiles militares; la diferencia entre éstos y los ACR radica en que los ACR se recuperan después de una misión.

Inicialmente fueron desarrollados con fines militares. El primer avión que voló sin piloto fue un hidroavión Curtiss de la Marina de los EUA, probado en 1913 [20]. Este avión de tamaño natural estaba dirigido por un estabilizador giroscópico que posteriormente sirvió de base al primer piloto automático. Los aviones sin piloto se empleaban entonces como blanco para entrenamiento de pilotos de aviones de caza y para probar armamento antiaéreo; tal era el caso del Queen Bee diseñado por los ingleses en 1939. Durante la Segunda Guerra Mundial los ACR se usaron como bombarderos, aunque muchos de ellos se perdían deliberadamente en la misión, como el caso de los aviones Mistel de la fuerza aérea Alemana.

A partir de 1960 en la guerra de Vietnam se utilizaron para inspección en campos de batalla almacenando información o transmitiéndola a una estación terrena. Entre 1965 y 1975 se registraron 3435 misiones de reconocimiento de los ACR en el sureste asiático [14]. Dada su aplicación los ACR se convirtieron en vehículos con un costo menor que los aviones normales debido a que se diseñaban aeronaves de tamaño pequeño en comparación con los de escala natural usados en los principios. Por ello los principales países avanzados en materia militar como Inglaterra, Francia, Bélgica, Alemania, Rusia, EUA, Australia e Israel entre otros, dedicaron parte de su industria aeronáutica al estudio de estas aeronaves. Uno de los proyectos más significativos en los EUA fue el proyecto del ACR Aquila que se ha extendido desde 1974 hasta nuestros días.

En 1981, durante la invasión a Líbano, los israelitas llevaron a cabo importantes misiones con dos ACR, el Mastiff y el Scout. Principalmente dedicaron su esfuerzo a localizar estaciones de misiles sirios. En la guerra del Golfo Pérsico en 1991 se puso especial interés en las misiones de los ACR. El Pioneer fue usado como avión de reconocimiento. Esta aeronave vió su primera aplicación efectiva después de siete años de iniciado el proyecto binacional entre Israel y los Estados Unidos [21].

Desde 1970, los países desarrollados vieron la posibilidad de usar los ACR para resolver problemas de índole civil, por lo que se implementaron programas a largo plazo donde se estudiaron sus posibles aportaciones. Actualmente, la percepción remota es una aplicación de los ACR y gran variedad de ellos se están utilizando con fines civiles, siendo un medio más económico comparado con el uso de aeronaves tripuladas o con el uso de satélites. La industria privada estima que para el año 2000, el 50%

de las compras de sistemas ACR serán utilizadas con fines militares y el otro 50% con fines civiles. Se estima también que para el año 2010 la aplicación civil llegará al 70% de los aviones fabricados [14].

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACR.

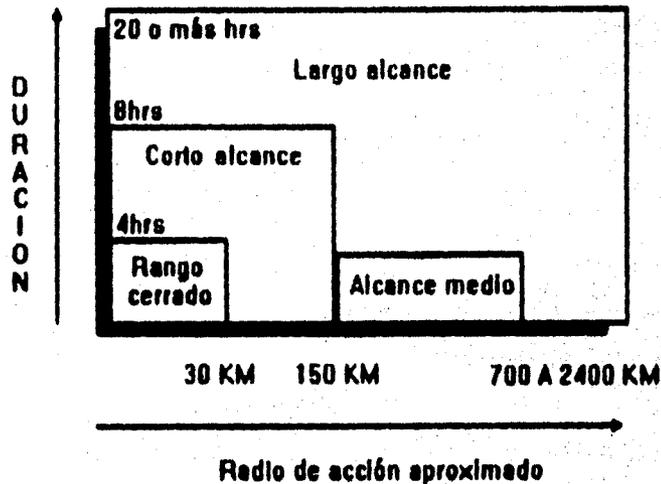
Según el diseño específico, los ACR pueden operar a diferentes alturas sobre la superficie dependiendo de la aplicación; pueden acortar o alargar su autonomía de vuelo desde pocos minutos hasta varias horas, pueden ser portátiles y utilizar consumibles de amplio acceso para su operación, mantenimiento y reparación en campo. Tienen la opción de instalar diversos instrumentos de observación y medición en su interior, como cámaras fotográficas, de video, infrarrojas, muestreadores atmosféricos y diversos tipos de sensores. Pueden sobrevolar un blanco automáticamente según programas predeterminados, enviar imágenes de objetivos en tiempo real o almacenarlos y controlar el apuntamiento de sensores desde una estación de control [8].

Los ACR se pueden clasificar dependiendo de:

1.- Su peso total: [21]

ACR pequeños	menos de 140 kg
ACR medianos	de 140 a 1400 kg
ACR grandes	mas de 1400 kg

2.- Su alcance: [14]

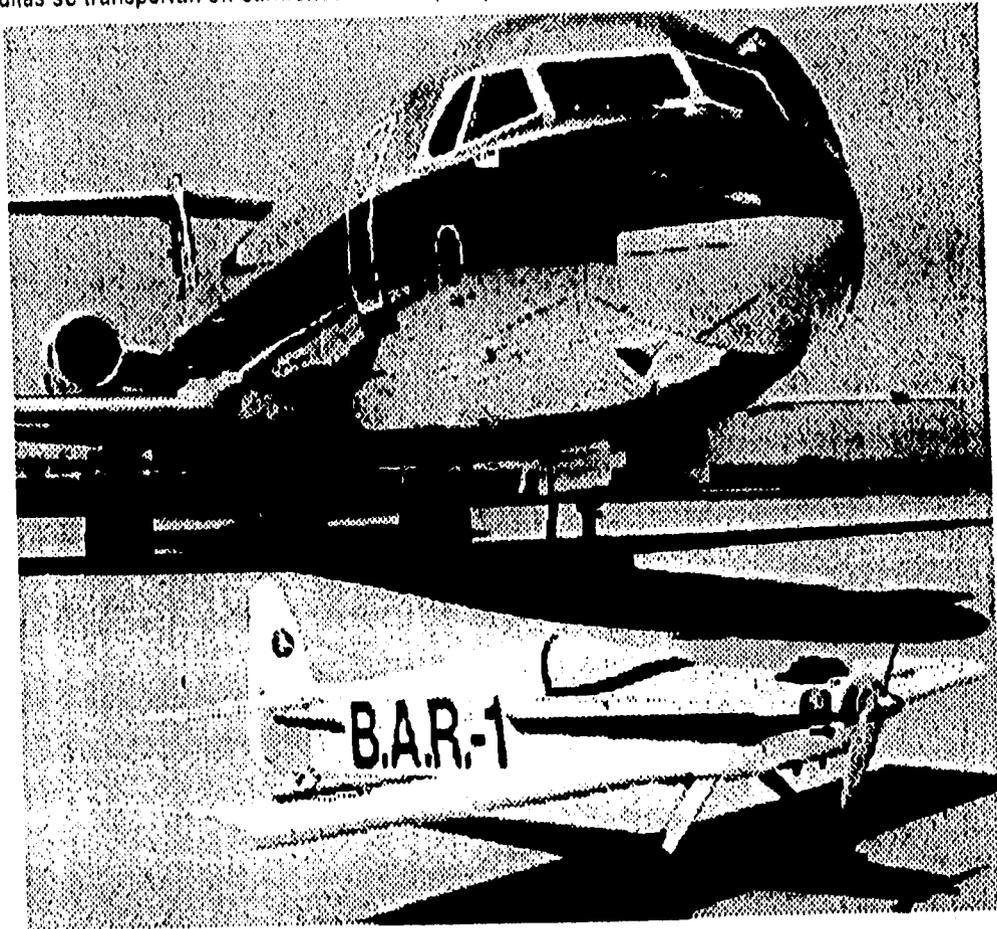


Los ACR de tamaño pequeño se utilizan para misiones de corto alcance que no requieren de instrumentación de gran peso. Los de peso menor, se lanzan a mano y se guían por medio de un control remoto comercial. Los de tamaño medio ya requieren de sistemas de navegación inercial, GPS (Global Positioning System) y control automático. A medida que la aplicación necesita de elementos mas pesados el ACR aumenta sus dimensiones siendo capaz de cargar mas peso y de alargar su autonomía. Existen aeronaves capaces de volar por más de 24 hrs. como el caso del Boeing Condor que vuela a alturas de alrededor de los 20,000 m. [1].

El hecho de que los ACR puedan ser recuperados permite utilizarlos en un tiempo relativamente corto, es decir, la operación de despegue-aterrizaje o de lanzamiento-recuperación de la aeronave se puede realizar sucesivamente.

Los ACR se lanzan desde diferentes tipos de catapultas (neumática, hidráulica, bungee o liga, etc.), desde otro avión en vuelo, con un sistema de propulsión a chorro o desde una pista de pasto, tierra o asfalto. Pueden aterrizar como un avión convencional con tren de aterrizaje o ser recibidos por una red vertical o una vertical-horizontal. Pueden descender por medio de un paracaldas y ser recuperados en el aire con un helicóptero o directamente en tierra con un sistema que absorba el impacto.

Los Sistemas de Lanzamiento (SL) y Recuperación (SR) deben manejarse con cierta facilidad para optimar el tiempo de operación. Las catapultas y redes se utilizan, por ejemplo, cuando no se tiene una pista de despegue; son muy útiles cuando se tienen que realizar operaciones desde terrenos abruptos o de difícil acceso. Lo mismo para los paracaldas, aunque estos van integrados en el ACR. Las redes y catapultas se transportan en camiones o remolques junto con la aeronave.



Fotografía de un ACR de pequeñas dimensiones

1.4 APLICACIONES DE LOS ACR EN EL ÁREA CIVIL.

Las aplicaciones mas generales que pueden tener los ACR son:

1. Desarrollo de la aeronáutica. Con los ACR se pueden hacer estudios de aerodinámica, estudios de sistemas de control electrónico, de sistemas de propulsión, de control remoto e innovaciones que además de resultar más económicos disminuyen el riesgo del piloto.

2. **Monitoreo y fotogrametría.** Con el fin de localizar incendios, vegetación y migraciones del mundo animal. Estudiar la población, el uso de suelo y el tráfico en las ciudades. Estudiar avance de erosión, desertificación y deforestación. Detectar e identificar descargas contaminantes de industrias, buques y exploraciones petroleras. Vigilar la zona económica exclusiva en las costas.
3. **Exploración.** Búsqueda de personas o vehículos, peces e insectos. Medir características geomagnéticas para exploración geofísica. Planear localización óptima de nuevas carreteras a través de imágenes y modelos digitales del terreno. Estudiar, localizar o evaluar nuevos sitios arqueológicos con radar de apertura sintética.
4. **Prevención.** Obstrucciones en las vías terrestres, plagas y sistemas de comunicación, así como alteraciones del entorno por diversos fenómenos geológicos. Evaluar y documentar áreas de desastre.
5. **Transporte.** Los ACR pueden transportar, por ejemplo, medicamentos u objetos que ayuden a la población civil en caso de desastres o emergencia en lugares poco comunicados. Pueden usarse como fumigadores o sembradores o para controlar incendios. También para correo.

1.5 SISTEMA DE PERCEPCIÓN REMOTA.

El sistema completo de percepción remota, ACR está compuesto por una aeronave instrumentada, una estación terrena móvil, el SL y el SR. La instrumentación del ACR incluye equipo de comunicaciones, para intercambiar datos con la estación terrena, una serie de sensores para la navegación automática (giróscopos, brújula y GPS), computadora a bordo (reprogramable), sensores para conocer la posición de las superficies de control de la nave y el estado de operación del motor (temperatura, nivel de combustible, etc.). La estación terrena móvil es el lugar donde se recibe toda la información proveniente del ACR, y donde se encuentra su piloto. Contiene los sistemas para recibir la telemetría, que son los datos de las variables más importantes que intervienen tanto en la navegación como en la operación misma del motor y todos los subsistemas del avión. Los comandos son instrucciones que envía el piloto para realizar alguna maniobra de cambio de trayectoria, elevación, posición, etc.

El SL es un sistema capaz de impulsar el avión en el despegue, y se pueda transportar en un remolque o en un camión al igual que el SR. El SR debe proteger los instrumentos en el interior del ACR durante la recuperación, debe ser un sistema de fácil armado y operación de manera que cualquier persona involucrada en el sistema ACR pueda manejarlo. El mantenimiento será mínimo para que la operación de recuperación se lleve a cabo tantas veces como se requiera sin la necesidad de cambiar partes o invertir tiempo que se pueda destinar a otras tareas.

CAPÍTULO 2.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN.

2.1 ANTECEDENTES

Desde el inicio del desarrollo de los ACR, se han diseñado diferentes SR para cada uno de ellos, dependiendo principalmente del peso, envergadura, misión y velocidad de aterrizaje.

Como ya se ha mencionado, uno de los primeros ACR fue un hidroavión Curtiss de la marina de los EUA, que en 1913 fue empleado principalmente como blanco para entrenamiento de pilotos de aviones de caza y para probar armamento antiaéreo. Si el avión no era derribado, entonces acuaticaba [20]. Durante la Segunda Guerra Mundial se utilizaban aeronaves llamadas Queenbee que despegaban por medio de una catapulta de los portaaviones ingleses y aterrizaban en la pista del mismo después de cumplir su misión. Eran utilizados también como blanco antiaéreo [21].

A mediados de los sesentas, durante la Guerra de Vietnam, los EUA lanzaban los ACR Firebee desde una catapulta o desde un avión y eran recuperados con un paracaídas que se desprendía del fuselaje; el ACR podía caer directamente a tierra evitando el golpe con un sistema de amortiguamiento, o bien, en el aire un helicóptero lanzaba un gancho para anclarlo en la parte superior del paracaídas y así trasladarlo a tierra [21].

El Lockheed Aquila de la armada de los EUA, durante la década de los setentas, se recuperaba cuando un gancho colgado de la parte trasera del avión se detenía en uno de varios cables colocados en serie a 60 grados de la horizontal. Posteriormente los EUA junto con la Dornier alemana diseñaron un sistema de red vertical, para su recuperación [2].

El sistema Scout israelí consiste en una red vertical montada en un camión y una red horizontal que se despliega a varios metros para recibir al ACR. La red vertical detiene al avión mientras que la horizontal lo recibe sin daño al caer [6].

Durante la Guerra del Golfo Pérsico (1991) se puso especial interés en las misiones de los ACR. El Pioneer fue usado como avión de reconocimiento. El avión se lanza desde una catapulta montada en un barco y después de la operación es recuperado por una red también montada en el mismo, que se arma rápidamente sobre la catapulta de lanzamiento al ser desarmada esta última. Por otra parte países como Canadá, Inglaterra, Francia, Bélgica, Alemania, CEI e Italia entre otros, han desarrollado diferentes SR de acuerdo a la misión a cumplir y a las características del ACR.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SR MÁS UTILIZADOS

A continuación se describen brevemente los sistemas de recuperación más empleados con las diferentes aeronaves:

Sistemas con tren de aterrizaje:

Es el más común; el tren de aterrizaje consiste en una estructura que soporta las llantas, y resiste el impacto de la aeronave al tocar tierra, esto se lleva a cabo en una pista de longitud adecuada. El tren permite controlar en tierra la dirección del ACR, lo que puede ayudar a frenar y/o aprovechar la máxima longitud de pista posible. En este caso sólo se necesita aproximar al ACR a la pista con una pendiente suave para un buen aterrizaje, es un sistema sencillo de operar.



Foto de un ACR con tren de aterrizaje [1] Oct 18/1993.

Sistema con esquis:

En este caso la estructura del ACR soporta un par de esquis que le permiten aterrizar deslizando sobre una superficie suave, por ejemplo, pasto o tierra. su operación es similar al sistema con tren de aterrizaje.

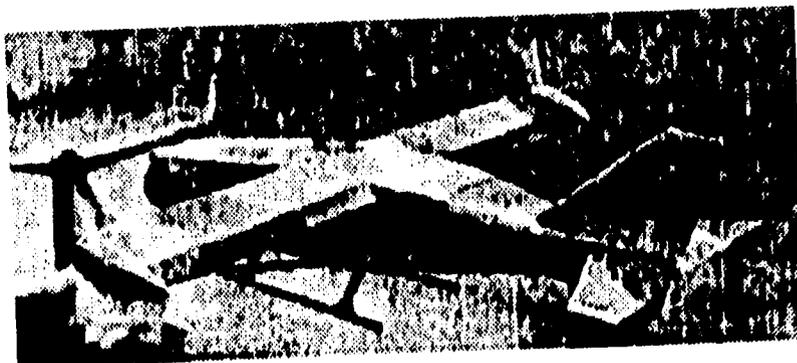


Foto de un ACR con esquis. [13] 10/1987.

Sistema con barra:

Este sistema consiste en una barra posicionada en la parte inferior del avión, que en el momento del aterrizaje se desgasta con el terreno, su operación es similar al sistema con tren de aterrizaje.

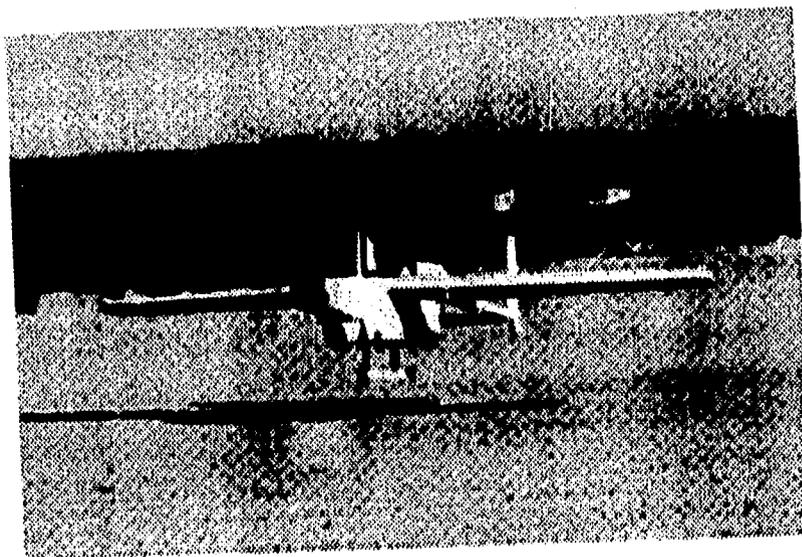


Foto de un ACR con sistema de barra para el aterrizaje. [14].

Sistema de descenso en paracaídas:

Los ACR llevan un equipo de paracaídas dentro del fuselaje o en una caja unida a este. El paracaídas se activa antes de que el ACR alcance su velocidad de desplome. Se puede dar el caso de un sólo paracaídas, o también un paracaídas ancla que desacelera al avión y otro principal que lo hace descender con lentitud hasta el suelo o mar donde es recuperado. Además se le añade al ACR un sistema que absorbe el impacto contra la superficie; puede ser una bolsa inflable de aire, un amortiguador en la nariz o un cable, con el cual será recuperado posteriormente por un helicóptero.



Foto del descenso de un ACR con la ayuda de un paracaídas. [1] Mayo 16/1994.

Sistema de gancho:

El ACR es guiado a baja altura y velocidad sin llegar al desplome. Un gancho unido a la estructura del avión por medio de un cable forza al ACR a aterrizar en una red horizontal, al pasar por un sistema de cables y engarzar en uno de ellos.

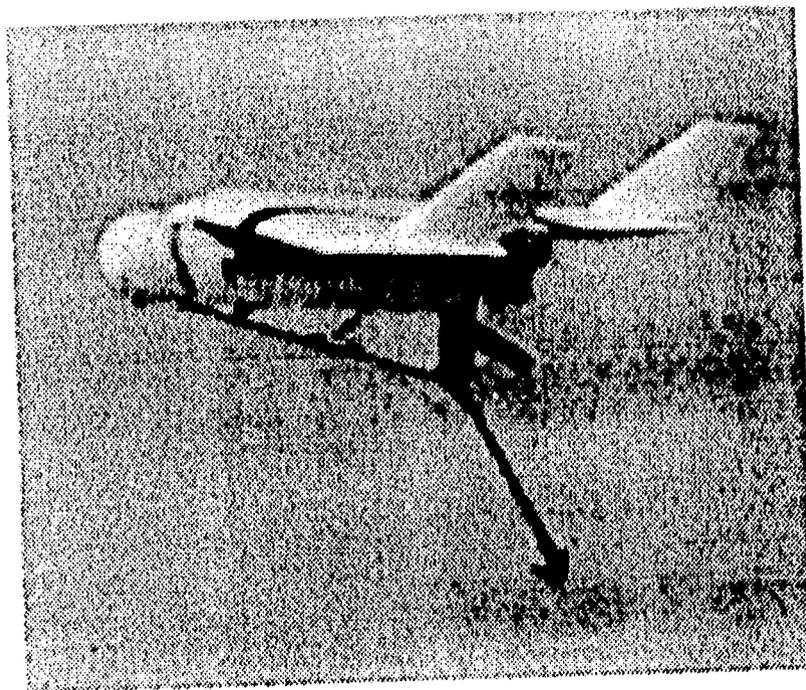


Foto del ACR con sistema de gancho listo para aterrizar. [1] Nov. 18/1974.

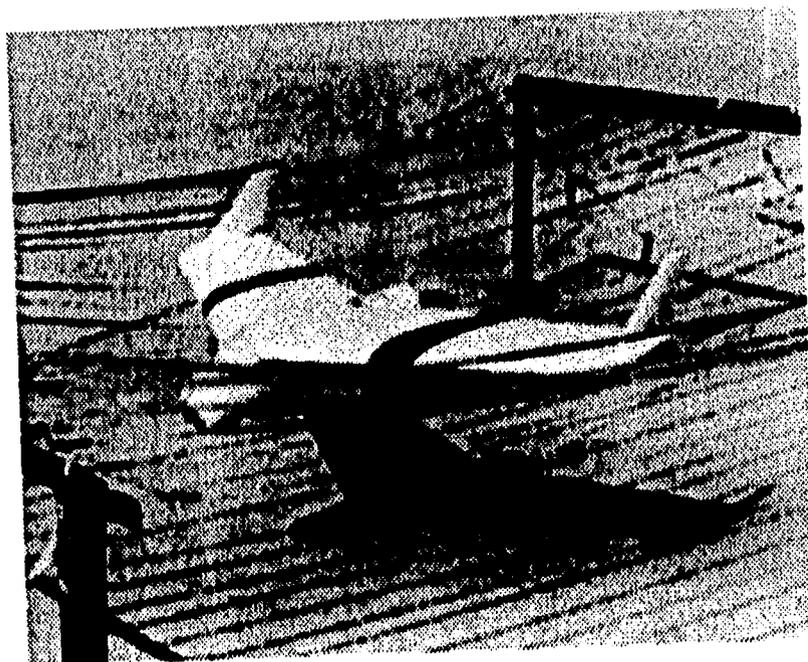


Foto del mismo ACR con sistema de gancho después del aterrizaje. [1] Nov. 18/1974.

Sistema de red vertical:

La red consiste de una malla que se levanta a cierta altura para que el ACR se envuelva en ella para detenerlo en forma amortiguada. Los sistemas desarrollados por compañías como la Lockheed pueden ser trasladados por un camión y se arman en minutos.

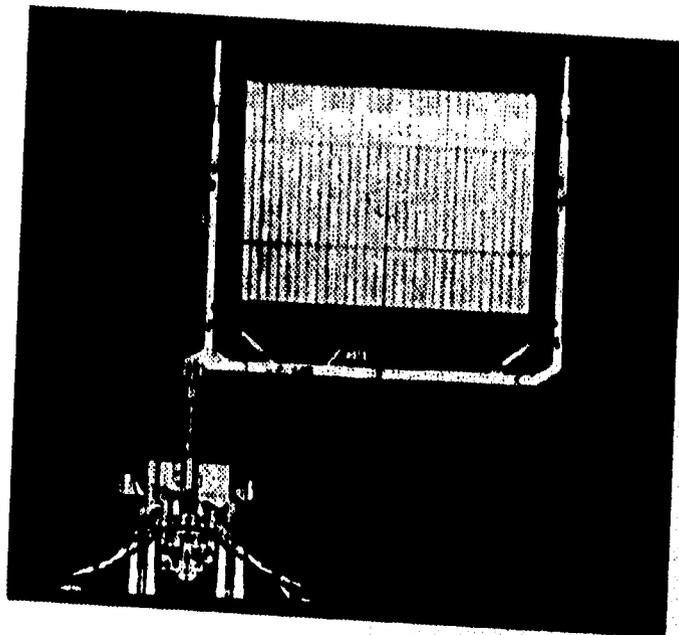
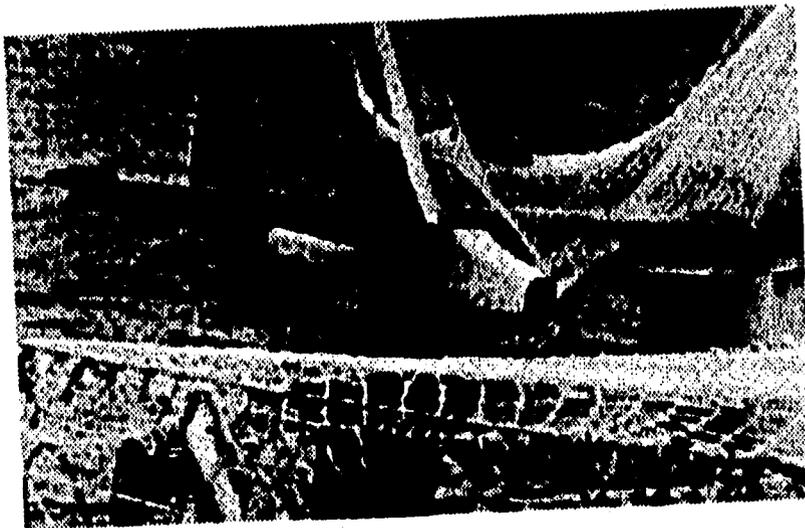


Foto de un sistema de red vertical. [2] 3/1981.

Red vertical-horizontal:

La red vertical sirve para envolver al ACR y guiarlo hacia la red horizontal, que se tiende sobre la superficie que cubre cualquier trayectoria posible del ACR, esta red evita que el ACR choque con el suelo y termina de absorber la energía cinética remanente del ACR.



Fotos de un sistema de red vertical-horizonal instalado en un barco. [1] Sep. 15/1975.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN.

3.1 INTRODUCCIÓN.

Para este análisis se recabó información de los sistemas de recuperación publicados en los últimos 10 años, con el fin de conocer los diferentes tipos y tener una referencia que sirva como antecedente en el diseño del sistema.

Para estos fines, se recopiló toda aquella información que mencionara datos de ACR's y sus sistemas de lanzamiento y/o recuperación. De la información se discriminaron los sistemas cuyas características no se encuentran en un intervalo cercano a los objetivos del proyecto general.

La discriminación se basa en las siguientes características:

- Peso total: menor de 150 Kg.
- Velocidad de crucero: mayor a 85 km/hr y menor a 240 km/hr.
- Tipo de propulsión: por hélice.
- Techo: 4000 m.s.n.m.

En los aparatos, en los cuales no se facilitaba el dato de peso total, pero sí el de carga, se tomó este último como 2/3 del peso total.

3.2 PRESENTACIÓN DE DATOS.

Los datos más relevantes de los diferentes sistemas encontrados en la bibliografía se presentan en las tablas y gráficas, que aparecen en las siguientes páginas.

SISTEMA	PAIS	AÑO	EMPRESA	TECHO	PESO C	PESO T	POT	VEL
				(m)	(Kg)	(Kg)	HP	(Km/hr)
ALTAIR	USA		LOCKHEED	1000	30	99	25	150
BA. STABILEYE	UK	1980	BRITISH AEROSPACE	3000	25	80	25	140
EYRIE	UK	1984	EYRIE ENTERPRISE		2,5	70,5		
FALCON	USA	1975	EGLLEN HOVER CRAFT			11	3	
FERRANTI	UK	1981	FERRANTI DEFENSE SYS		45	140		126
FR ASAT, RAVEN HORNET	UK	1983	FR GROUP PLC		4	15	25	126
LOCUST	USA	1981	AIR FORCE ROCKET PROP. LAB.			86		105
ML SPRITE	UK	1983	ML. AVIATION COMPANY	3000	6	30	7	111
OSCAR	USA	1991			91		10	
PARTNERSHIPS	USA		PARTNERSHIPS LIMITED INC.		3	22		165
PERSEUS	CANADA		AURORA FLIGHT SCIENCES CORP.	3650	50			
PHOENIX	UK		GEC AVIONICS			2,4		
SCOUT MASTIFF	ISRAEL		MAZLAT/IAI	4000	40		10	
SHADOW 200	USA	1993	USA/AAI	3000	23	110		100
TASUMA	UK	1980			10			95
TRACTEL	USA		TRACTEL CORPORATION		8	20,4		
TTL BANSHEE	UK	1983	TARGET TECHNOLOGY		10		26	
XRAE 1-2	UK	1983	ROYAL AIRCRAFT ESTABLISHMENT		17,5		2,5	

Tabla 3.1 Tabla de datos generales de sistemas ACR con características similares a las de este proyecto.

Donde:

SISTEMA: Nombre del sistema ACR.

PAIS: País de origen.

AÑO: Año en que se diseñó el sistema.

EMPRESA: Empresa que diseñó el sistema.

TECHO: Altura máxima de vuelo del ACR.

PESO C: Peso de la carga útil en kg.

PESO T: Peso total en kg.

POT: Potencia de los motores del ACR en HP.

VEL: Velocidad de crucero del ACR.

SISTEMA	SIST. LANZ.	SIST. REC.	PROPULSION	ENV.	LONG.	AUTONOM.	ALCANCE
				(m)	(m)	(hr)	(Km)
ALTAIR	CATAPULTA	RED	HELICE	3,9	2,1	11	250
BA. STABILEYE	CATAPULTA NEUMATICA	PARACAIDAS	HELICE	3,7	2,9	4	
EYRIE	CATAPULTA BUNGEE	PISTA	HELICE	2,3	0,7		18
FALCON		RED	HELICE	2,4	1,8		
FERRANTI	CATAPULTA NEUMATICA	PISTA/PARACAIDAS	HELICE	4,4	1,4	4	560
FR ASAT, RAVEN HORNET	PISTA/CATAPULTA	PARACAIDAS	HELICE	2,7	2,1	2	80
LOCUST	CATAPULTA NEUMATICA		HELICE	3	3		
ML SPRITE	V-TOL	V-TOL	HELICE			2,5	32
OSCAR	PISTA	PISTA	HELICE				
PARTNERSHIPS	PISTA	PISTA	HELICE	4,1	3,7		2
PERSEUS			HELICE				25
PHOENIX	CATAPULTA NEUMATICA	PARACAIDAS	HELICE				
SCOUT MASTIFF	CATAPULTA	RED	HELICE			0,5	5
SHADOW 200	CATAPULTA NEUMATICA	RED	HELICE	3,9		3	
TASUMA	CATAPULTA BUNGEE	RED VERTICAL	HELICE	3,2	1,9	1,3	
TRACTEL		PISTA O RED	HELICE	3	2,2	4	
TTL BANSHEE	CATAPULTA	PARACAIDAS	HELICE	2,5	2,8	1,3	12
XRAE 1-2	CATAPULTA BUNGEE	PISTA-ESQUIS	HELICE	2,7	2,1		

Tabla 3.2 Tabla de datos generales de los sistemas ACR con características similares a este proyecto.

Donde:

SISTEMA: Nombre del sistema ACR.

SIST. LANZ.: Sistema de lanzamiento.

SIST. REC.: Sistema de recuperación.

ENV.: Envergadura del ACR.

LONG.: Longitud del ACR.

AUTONOMIA: Tiempo máximo de cada vuelo del ACR.

ALCANCE: Distancia máxima capaz de ser recorrida por el ACR.

SISTEMA	USO	REFERENCIAS
ALTAIR		Kendebo, Stanley W., (1) Jul 20/87 pag. 63
BA. STABILEYE	FOTOGRAFIA AEREA	(3) pag. 828
EYRIE	MONITOREO	(3) pag 828-829
FALCON		(1) Sep 15/75 pag. 58
FERRANTI	MILITAR	(3) pag. 829-830
FR ASAT, RAVEN HORNET	FOTOGRAFIA	(3) pag. 830
LOCUST	MILITAR	Fulghum, David A., (1) Nov 2/92 pag. 48-49
ML SPRITE	RECONOCIMIENTO	(3) pag. 832
OSCAR	EXPERIMENTAL	Lowe, Don, (5) pag 40, 45 y 217
PARTNERSHIPS		(3) pag. 852
PERSEUS		Henderson, Breek W., (1) Feb 10/92 pag. 50
PHOENIX	MILITAR	(3) pag. 831
SCOUT MASTIFF	MONITOREO	(6).
SHADOW 200		(1) Sep 11/89 pag. 115
TASUMA	MILITAR	(3) pag. 834
TRACTEL	TELEDETECCION	(3) pag. 855
TTL BANSHEE		(3) pag. 836
XRAE 1-2	MILITAR	(3) pag. 832-833

Tabla 3.3 Tabla de datos generales de los sistemas ACR con características similares a este proyecto.

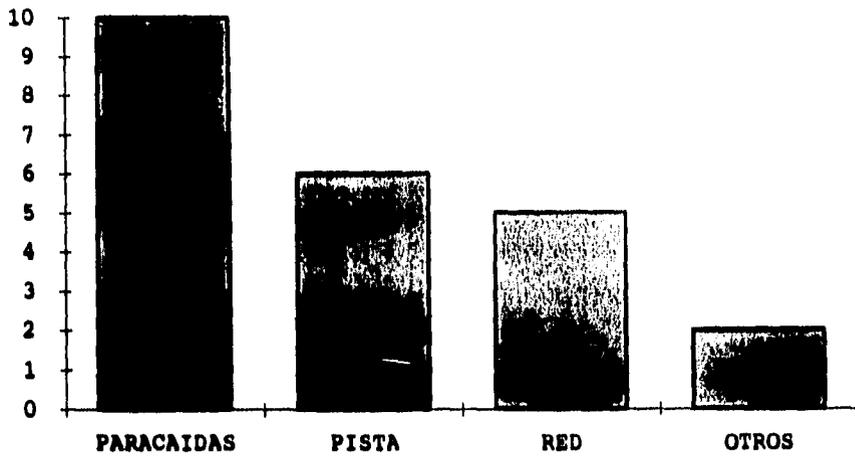
Donde:

SISTEMA: Nombre del sistema ACR.

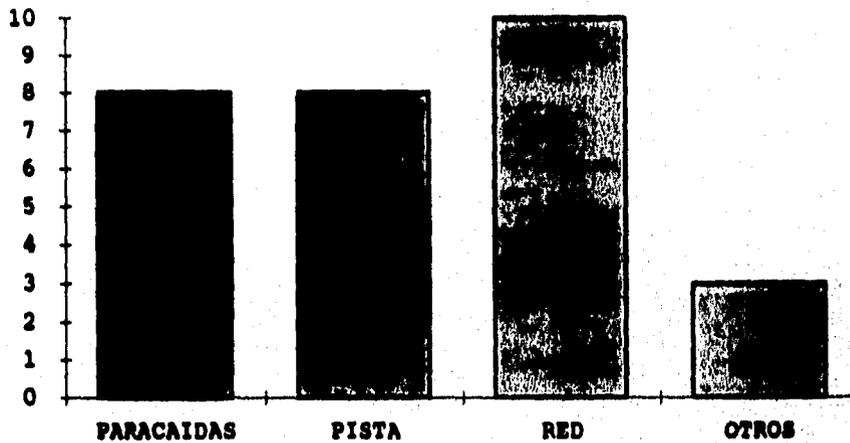
USO: Uso que se le ha dado al ACR.

REFERENCIA: Bibliografía, (los números en paréntesis indican un libro de la bibliografía de las páginas finales de este trabajo).

Gráfica de frecuencias de todos los sistemas ACR encontrados.



Gráficas de frecuencias de los sistemas ACR, después de la discriminación de los sistemas que están fuera del intervalo de operaciones del sistema.



3.3 ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE LOS S.R.

En la siguiente tabla se describen las principales ventajas y desventajas de los sistemas de recuperación.

SISTEMA	VENTAJAS.	DESVENTAJAS
Con tren de aterrizaje.	Es el más seguro, fácil operación, no necesita de mantenimiento correctivo.	Necesita una pista.
Esquí.	Seguro, puede aterrizar en pasto, agua, nieve o asfalto.	Presenta mayor arrastre aerodinámico y peso.
Barra.	Puede aterrizar en pasto, tierra o asfalto.	Destruyivo, presenta mayor arrastre aerodinámico y peso.
Paracaídas.	Se puede utilizar en cualquier terreno.	Necesita un dispositivo extra, o de un helicóptero.
Gancho.	Portátil, fácil armado.	Requiere una estructura reforzada, de un buen control de posición y velocidad, además que el dispositivo que da cuerda al gancho ocupa espacio en el compartimiento de carga.
Red vertical.	Portátil, seguro.	Requiere de un tiempo de ensamble, requiere de un buen control de velocidad y posición del ACR.
Red vertical / horizontal.	Portátil, seguro.	Requiere de un tiempo de ensamble y de un buen control de velocidad y posición del ACR.

Básicamente el sistema de recuperación debe cumplir los siguientes requisitos:

- sin utilizar pistas de aterrizaje,
- recuperar el ACR y su carga útil sin daño alguno,
- no sobrepasar $\pm 5g$ de aceleración,
- la menor área de recuperación posible,
- facilidad de operación,
- facilidad de transporte y
- costo accesible

El sistema de recuperación con tren de aterrizaje, con esquí y barra necesitan de una pista y de una extensión de terreno plano bastante grande, lo que es una restricción importante en este proyecto.

El sistema de recuperación por paracaídas sin helicóptero no cumple con la restricción de recuperar al ACR y su carga útil sin daño alguno. En el caso de recuperar al ACR con la ayuda de un helicóptero el costo de operación sube notablemente, por lo que no se cumple con la restricción de bajo costo.

El sistema de recuperación por gancho aumenta el costo debido a la precisión de los controles necesarios para su utilización, además el gancho baja el espacio dentro del ACR, aumenta su peso y requiere una estructura reforzada para soportar los esfuerzos durante la recuperación.

El sistema de recuperación que se adapta mejor a nuestras necesidades es el sistema de recuperación por red, por lo que ha sido electo para este proyecto.

CAPÍTULO 4.

SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN MÁS ADECUADA DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN (SR).

4.1 INTRODUCCIÓN.

En el capítulo anterior se analizaron las ventajas y desventajas de diversos sistemas de recuperación encontrados en la literatura y además se plantearon las restricciones que el sistema debe cumplir acorde con las necesidades del proyecto.

Los sistemas de recuperación que no cumplen con las especificaciones del proyecto son:

- a) los que necesitan una pista de aterrizaje,
- b) los sistemas con esquís y barra,
- c) los que se recobran mediante un paracaídas y
- d) los que se recuperan con gancho.

Los dispositivos que usan redes para la recuperación del ACR son los que cumplen con los requerimientos del proyecto, incluso pueden ser portátiles, emplean un área de recuperación pequeña, no necesitan de sensores externos para el control de posición del ACR cuando se acercan a la red, y son de bajo costo de producción; tomando en cuenta estas ventajas se determinó diseñar un dispositivo de recuperación por red.

Existen distintas configuraciones en los prototipos de recuperación por red. En este capítulo se muestran cuatro sistemas generales a saber:

- 1. red vertical,
- 2. red vertical y horizontal,
- 3. red vertical con vigas en cantiliver y
- 4. red vertical con cables.

La configuración de los primeros tres se obtuvo de sistemas publicados en la literatura y el cuarto es una propuesta que se presenta en este trabajo.

Cabe mencionar, que en dos de los sistemas mostrados la base estructural que sostiene a la red vertical es un remolque, que es una alternativa para el transporte; la red se puede desarmar y guardar sobre el vehículo o bien, se abate solamente y se inclina sobre el mismo. En los otros dos casos la base es una estructura desarmable que se guarda aparte en otro tipo de transporte. La estructura puede estar fija al piso de manera definitiva o también puede ser estable por sí misma con su propio peso. En cualquiera de los cuatro casos la estructura que sostiene la red puede ser diseñada para trasladarse con remolque, ir fijo al piso o ser estable por su propio peso.

4.2 PRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CONFIGURACIONES DE RED OPCIONALES PARA EL SR.

1. Red vertical

En la fig 1 se muestra la configuración de la red vertical. Consta de una estructura base y dos postes de donde se sujeta la red. Esta se une mediante cables al dispositivo que absorbe la energía que posee el ACR, y lo detiene. Los amortiguadores absorben parte del impacto, sin embargo, en algunos sistemas no se requiere de ellos y se presentan aquí como opción en el diseño. Los postes de este sistema tienen una altura suficiente para evitar que el ACR choque con el suelo cuando su velocidad llegue a un mínimo y se desplome por efecto de la gravedad. Al caer, ya envuelto, la red lo detiene iniciando un movimiento en forma de péndulo hasta detenerse por completo como se observa en la fig 2. Una vez que el ACR alcanza el estado inmovilidad se retira de la red.

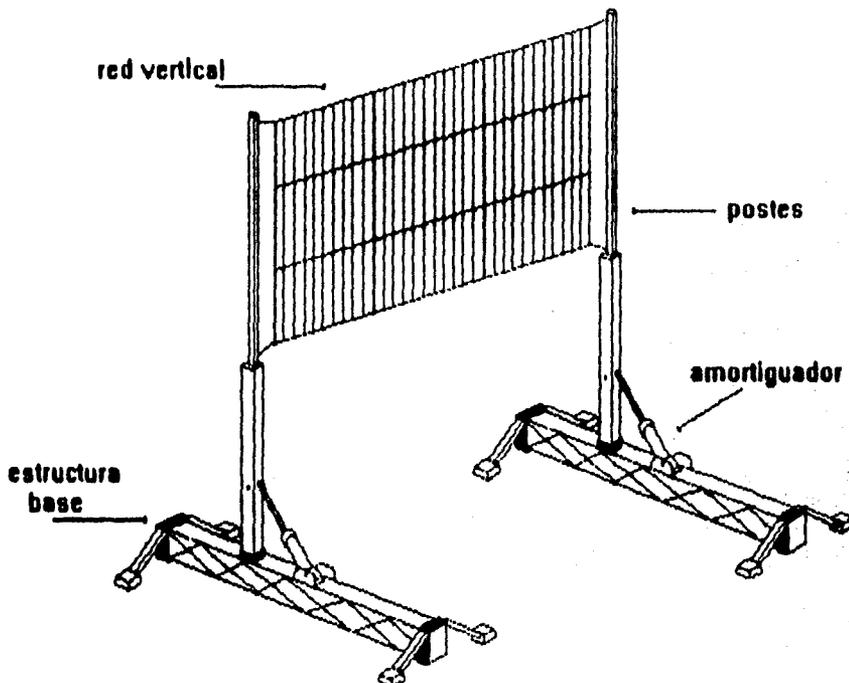


Fig 1. Red vertical

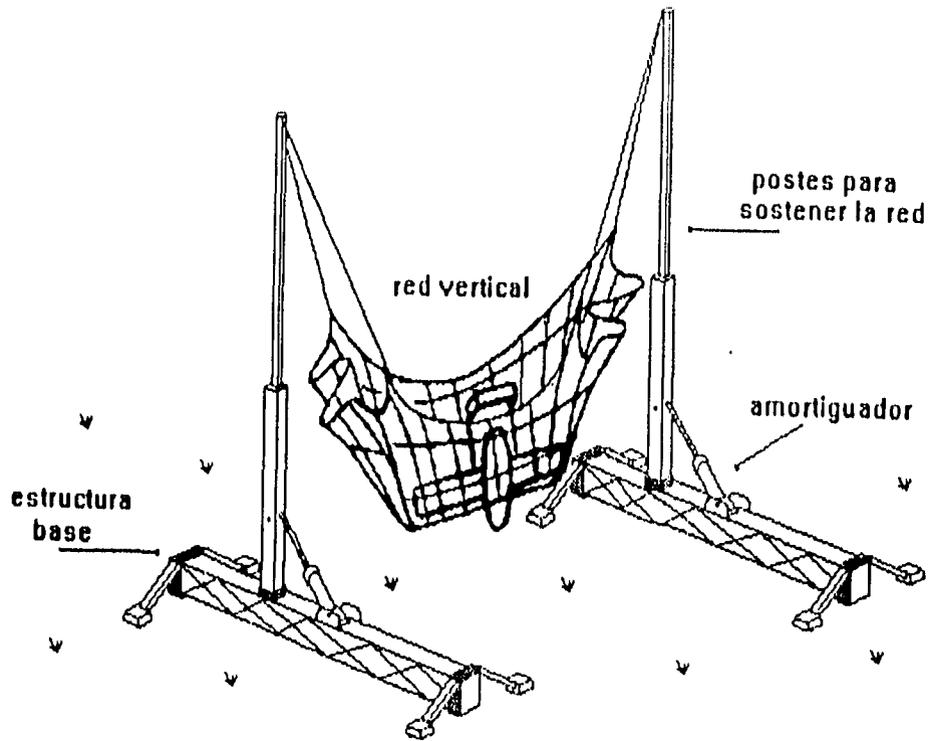


Fig 2. Red vertical con el ACR recuperado

2. Red vertical-horizontal.

Este sistema tiene un funcionamiento similar al anterior, pero el ACR incide en una segunda red colocada horizontalmente donde se detiene totalmente en forma amortiguada. La altura de los postes es menor que en el caso anterior ya que estos no necesitan evitar que el ACR impacte con el suelo. En la figura 3, se observa la configuración. En este caso, la estructura base es un remolque, las columnas se unen a los extremos de este y sostienen la red vertical. La red horizontal se despliega del remolque mediante una estructura que la tensa y la mantiene extendida.

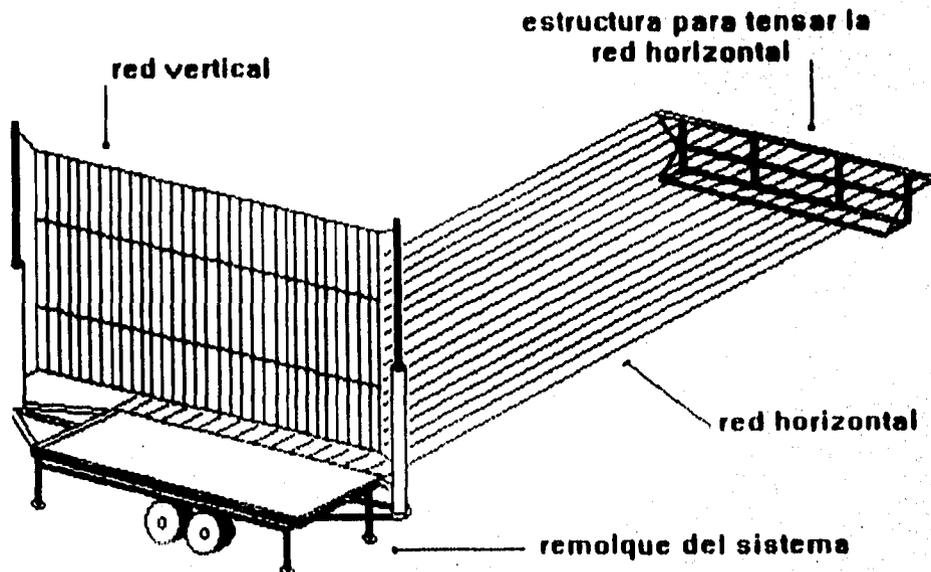


Fig 3. Red vertical - horizontal.

3. Red con vigas en cantiliver.

El arreglo de este sistema se observa en la fig 4. El poste que sostiene la red vertical es una Y que esta anclada a un remolque. La Y tiene amortiguadores tanto en sus vértices inferiores como en el poste donde se une al vehículo. El ACR jala la red al impactar con ella y los dos corren por las vigas en cantiliver controlándose su recorrido. La red se sujeta con cables al dispositivo que absorbe la energía del avión que se detiene al final de las vigas. En este momento el ACR, sujeto mediante la red, cuelga sin tocar el piso.

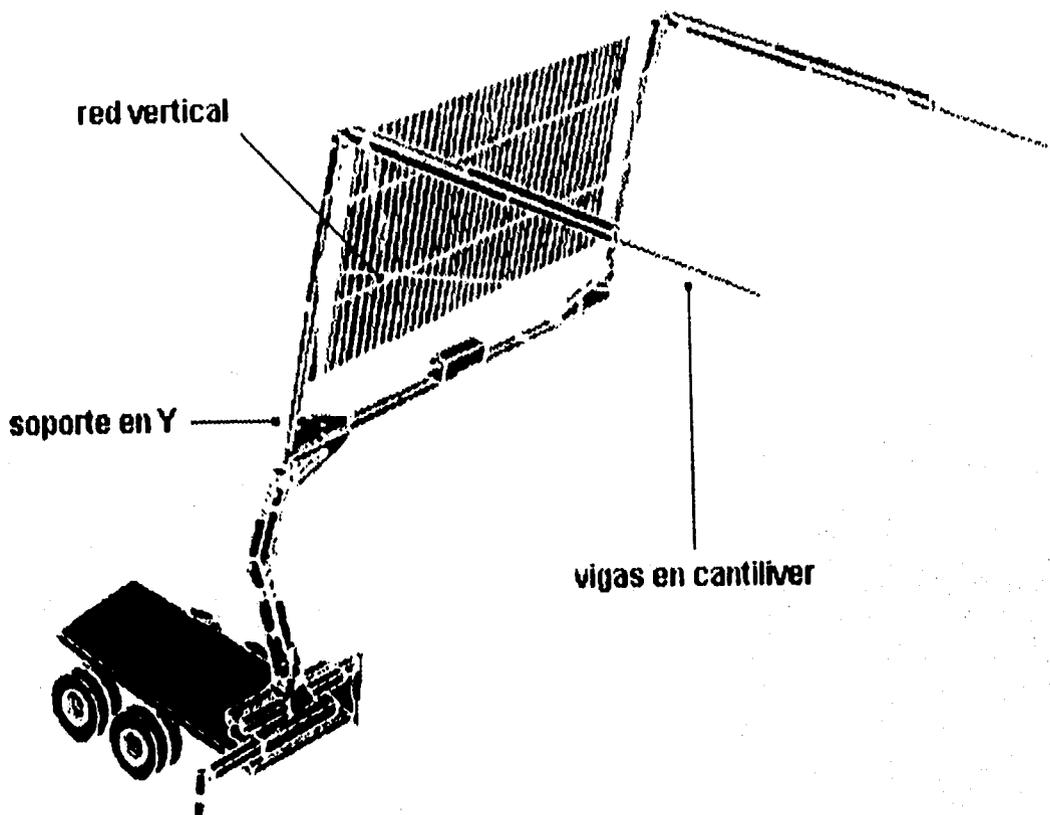


Fig 4. Red con vigas en cantiliver.

4. Red direccionada por cables.

La configuración se muestra en la fig 5. En este caso los postes sostienen a la red, pero no la sujetan. Es un sistema de cuatro postes; de cada lado hay dos cables que se sujetan a tensión. Cada extremo de la red esta unido a dos poleas que corren por los cables, por lo tanto, se guía su movimiento. El movimiento de los extremos de la red es idéntico, ya que además están sujetos a cables que salen de poleas unidas a un mismo eje, por lo que el movimiento de la red y del ACR esta mejor controlado que en los otros casos. Al final, el ACR cuelga junto con la red en el punto donde los cables casi se unen.

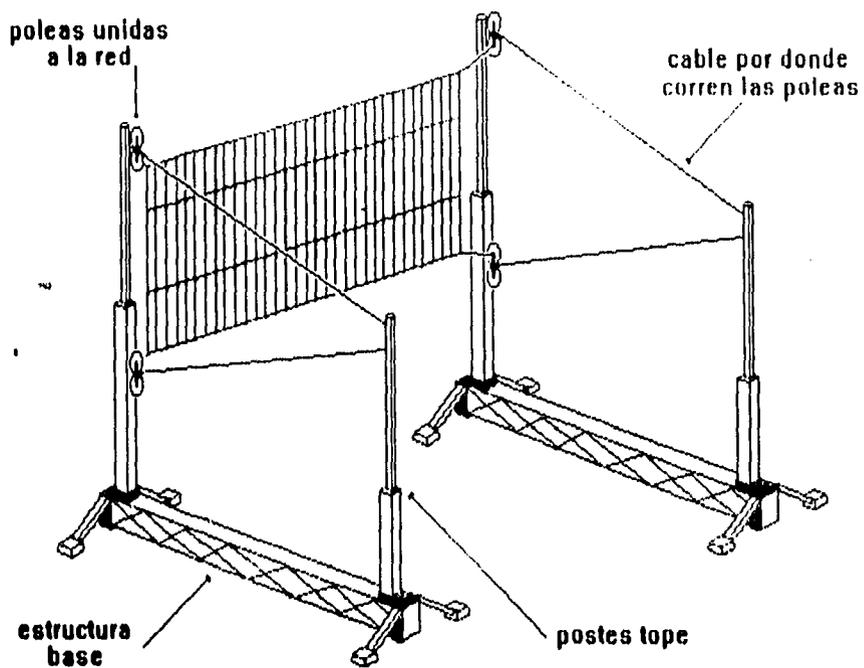


Fig 5. Red direccionada por cables

CAPÍTULO 5.

MODELADO DINÁMICO

5.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se establecen las ecuaciones de movimiento del ACR para los dos sistemas de recuperación, que por sus características han sido seleccionados como las opciones más viables para su implementación en el sistema ACR: a) sistema de red direccionada con cables y b) sistema de red horizontal-vertical. Se modelan tanto su captura, como: la posición, velocidad y aceleración, los resultados para los casos críticos, además de otros datos importantes para la comparación entre ambos sistemas y la elección de alguno de ellos para el diseño final.

5.2 MODELADO DEL SISTEMA DE RED DIRECCIONADA CON CABLES

5.2.1 Comportamiento del ACR.

En este sistema el ACR incide sobre una red, que tiene el movimiento de sus extremos restringidos, de tal manera que el ACR queda envuelto en la red durante su captura. Ver fig 5.2. Esto se logra cerrando la trayectoria de los extremos de la red mediante guías.

Los extremos de la red tienen un movimiento simultáneo, es decir los cuatro extremos recorren la misma distancia y tienen la misma velocidad y aceleración en todo momento, lo que ayuda a tener control sobre movimiento del ACR.

Durante la captura, la red con su carga se detiene uniformemente por un dispositivo de frenado, que se conecta mediante poleas y reductores a los extremos de la red.

El sistema de coordenadas rectangulares para localizar el origen de las ecuaciones de movimiento, se describe a continuación: el vector de velocidad del ACR se desplaza paralelamente al eje X, en

dirección del eje Y se encuentra la altura la red, y en dirección del eje Z se ubica el ancho de la red. Ver fig 5.1

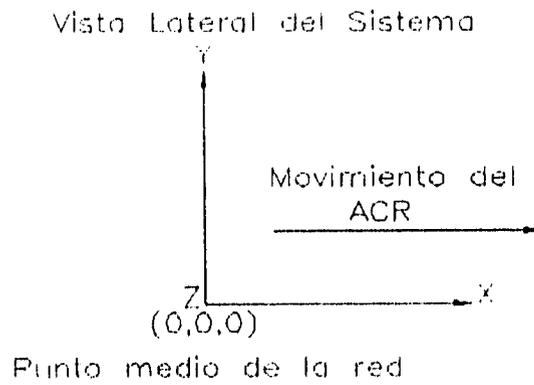


Fig 5.1. Origen del sistema de referencia rectangular a partir del cual se obtienen las componentes del movimiento del ACR.

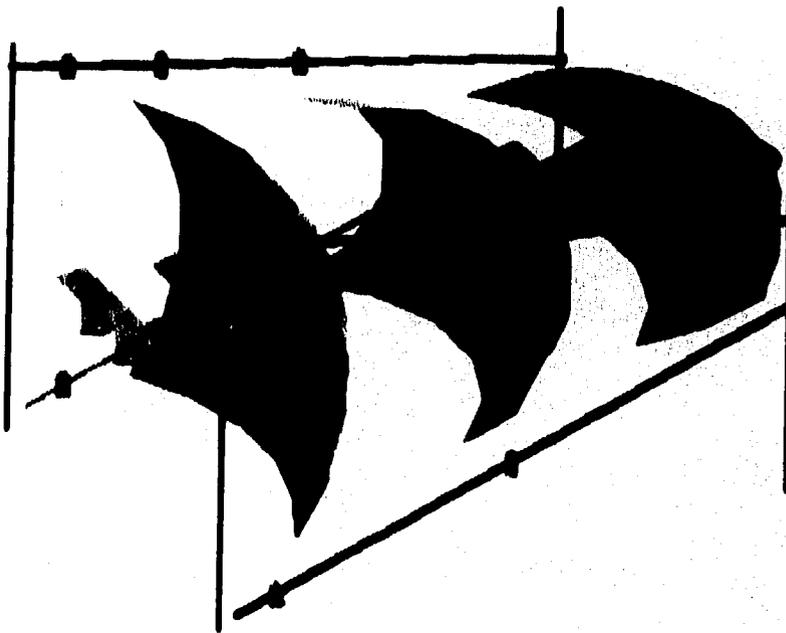


Fig 5.2. Sistema de Red direccionado por cables.

5.2.2 Descripción del sistema de recuperación.

El sistema de recuperación presenta dos dispositivos:

a) de dirección que consta de:

1. una estructura base (poleas fijas, sujetadores y estructura),
2. cables fijos,
3. correderas y
4. una red

b) y un dispositivo de frenado constituido de:

1. cables,
2. reductor,
3. poleas fijas y
4. absorbedor de energía (juego de resortes, masa variable, etc.)

El modelado se basa en el hecho de que la energía absorbida por el sistema de recuperación tiene un comportamiento similar a un juego de resortes que trabaja a compresión.

En la fig 5.2, se muestra un esquema del sistema de recuperación direccionada con cables, donde se observa que el movimiento de la misma esta delimitado por sus cuatro extremos (1). Las terminales de la red (2) están unidas a correderas (3), que se desplazan a lo largo de cables fijos (4) que guían el movimiento de la red, las correderas a su vez se conectan a un dispositivo de frenado (5).

El dispositivo de frenado consta de cuerdas que se fijan en uno de sus extremos a cada corredera y el otro extremo se acopla a una polea. Las poleas de los dos extremos verticales de la red se encuentran en un mismo eje, para asegurar un movimiento simultáneo. Además, el dispositivo consta de dos reductores (ver fig 5.2), conectados al sistema absorbedor de energía que se oponen al movimiento libre de la red.

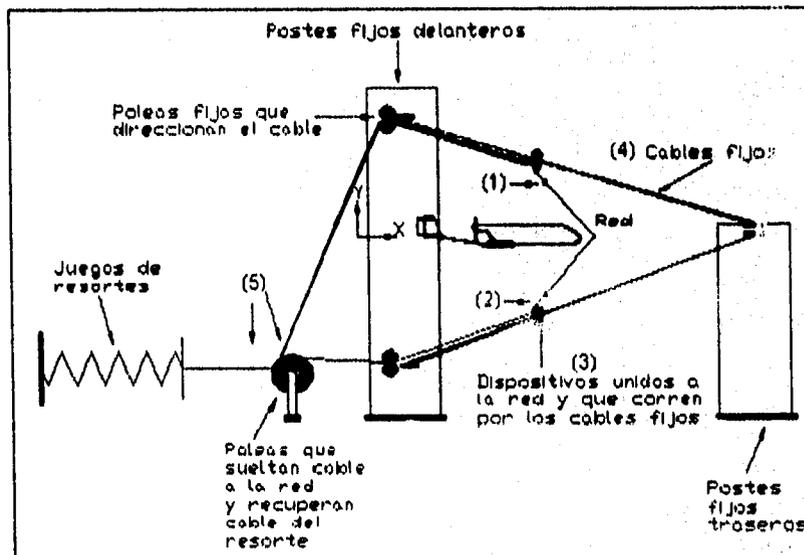


Fig. 5.3. Diagrama de las conexiones del sistema de recuperación mediante una red direccionada con cables.

Para el modelado dinámico, se considera que:

- el ACR incide con una velocidad dentro del intervalo [60 - 80 Km/hr] y con una pendiente negativa de entre [0 - 10°].
- el ACR incide en el centro de la red,
- los extremos de la red se mueven con la misma velocidad y aceleración,
- no se tiene movimiento en el eje Z, ya que el movimiento de los extremos es simultáneo y en este caso, se considera que el ACR está en el centro de la red, por lo que el movimiento es simétrico con respecto a Z, y
- los cables guía se fijan simétricamente.

Con estas restricciones de movimiento, la trayectoria del ACR queda determinada: según el punto donde incide sobre la red, por la posición de los cables fijos que sirven de guías al movimiento y la energía cinética que posee el ACR.

La velocidad y aceleración del ACR dependen:

1. de la constante de proporcionalidad del sistema de absorbedor de energía y
2. de la energía necesaria para arrancar el sistema de frenado (juegos de poleas con resortes).

Las pérdidas por fricción y otras no evaluadas del sistema mecánico se supondrán que son igual al 10% de la energía cinética inicial del ACR.

5.2.3 ECUACIONES DE MOVIMIENTO.

En esta sección se desarrollan las ecuaciones de movimiento del ACR en función de: a, b, D, L_1, L_2, r_0 , y F , etc., que son parámetros del sistema, que se evalúan según la posición de los cables guía. A estos parámetros se les asignan valores según criterios de diseño, de esta manera se pueden modelar rápidamente diferentes casos.

Ecuación de posición.

Para encontrar las ecuaciones de posición se definen los parámetros del sistema con la ayuda de los siguientes diagramas:

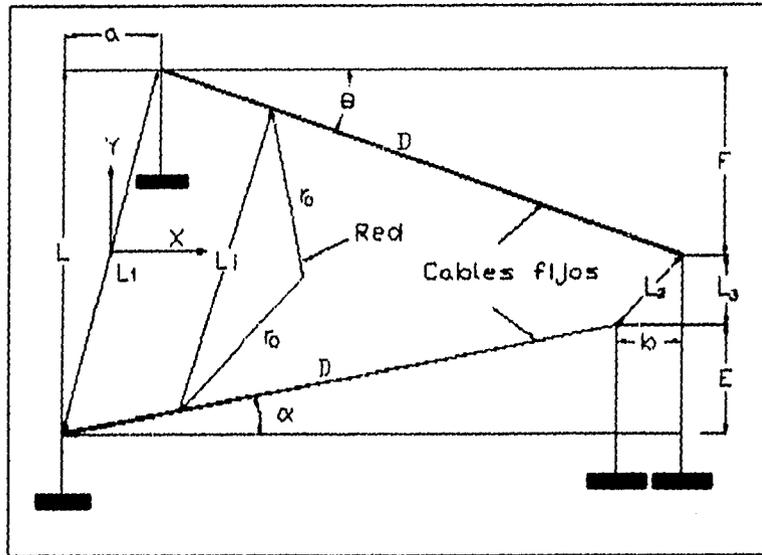


Fig. 5.4. En este diagrama se muestran los parámetros utilizados según la posición de los cables que permanecen fijos.

Sea:

- a = la distancia entre el punto inicial de los extremos superiores e inferiores sobre el eje Z en [m].
- b = la distancia entre el punto final de las extremos superiores e inferiores sobre el eje Z en [m].
- D = la distancia máxima que recorren los extremos superiores e inferiores de la red sobre el cable guía, en [m].
- L = la distancia inicial entre los extremos superiores e inferiores de la red en [m].
- L_2 = la distancia final entre los extremos superiores e inferiores de la red en [m].
- r_0 = la altura de la red dividida entre dos en [m].
- E = la distancia vertical que suben los cables inferiores en [m].
- F = la distancia vertical que bajan los cables superiores en [m].
- L_1 = la distancia instantánea entre los extremos superiores e inferiores de la red [m].

Los valores de estos parámetros se fijan al posicionar los cables fijos o cables guía.

El análisis se simplifica, si los cables fijos se posicionan simétricos a un eje paralelo al eje X, ya que en este caso la trayectoria será rectilínea con inclinación cero.

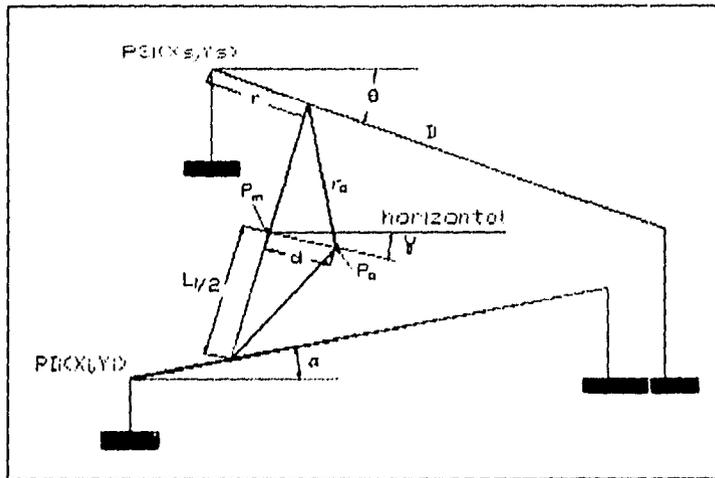


Fig 5.5. En este diagrama se observan los parámetros de posición de los extremos de la red.

A partir de la fig 5.5 se obtienen las siguientes relaciones:

$$L = \sqrt{L_i^2 - a^2}, \quad \text{Sen}(\theta) = L / 2D, \quad \text{Cos}(\theta) = \sqrt{D^2 - F^2},$$

$$\text{Sen}\alpha = \frac{0.5L - \sqrt{L^2 - b^2}}{D}, \quad \text{Cos}\alpha = \frac{\sqrt{D^2 - E^2}}{D}$$

Ahora, se encuentra la posición de los extremos de la red en función del desplazamiento del cable (ver fig 5.5). Los puntos iniciales para los extremos inferiores en P_i y superiores P_s , son:

$$P_i = (-a/2, -L/2) \quad \text{y} \quad P_s = (a/2, L/2)$$

La posición de los extremos inferiores es: $P_i(r) = ((-a/2) + r \cos \alpha, (-L/2) + r \text{sen} \theta)$.

La posición de los extremos superiores es: $P_s(r) = ((a/2) + r \cos \theta, (L/2) - r \text{sen} \theta)$.

El valor de L_i en función del desplazamiento r , es:

$$L_i = \sqrt{(r(\cos \alpha - \cos \theta))^2 + (r(\text{sen} \alpha - \text{sen} \theta))^2}$$

Y el punto medio P_m de L_i es:

$$P_m = (0.5r(\cos \alpha + \cos \theta), 0.5r(\text{sen} \alpha - \text{sen} \theta))$$

La magnitud d que se ha deformado la red se encuentra con el teorema de Pitágoras es:

$$d = \sqrt{r_0 - (L_i / 2)^2}$$

La pendiente de d es:
$$m_d = \frac{a + r(\cos() - \cos\alpha)}{r(\text{sen}\alpha + \text{sen}()) - L}$$

$$\gamma = \arctan(m_d)$$

Por lo que, la trayectoria del ACR en función de r , $Pa(r)$ es:

$$Pa(r) = (0.5r(\cos\alpha + \cos()) + d\cos\gamma, 0.5r(\text{sen}\alpha - \text{sen}()) + d\text{sen}\gamma)$$

Ecuación de velocidad

Para definir las ecuaciones de velocidad, aceleración y tiempo, se definen los parámetros del dispositivo de frenado.

En las siguientes figuras se muestran los diagramas de cuerpo libre de las principales partes del dispositivo.

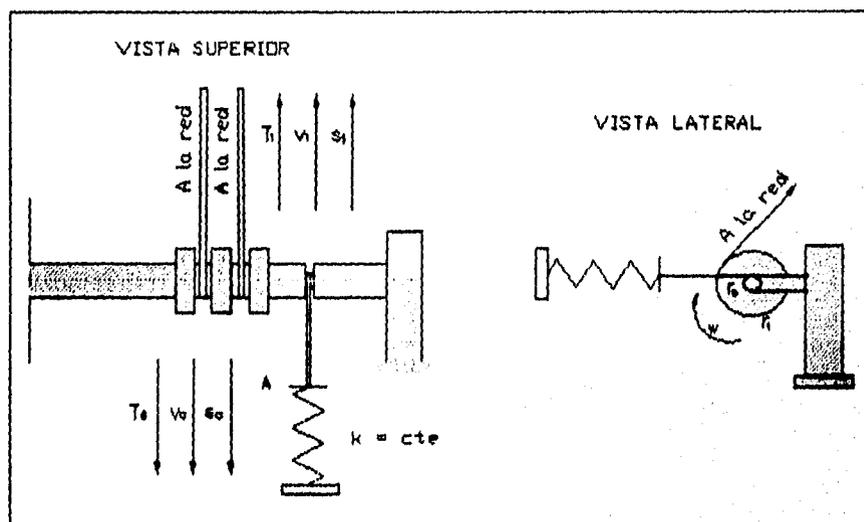


Fig.5.6. En este diagrama se observan las conexiones del resorte del dispositivo de frenado y sus conexiones.

Donde:

s_0 = desplazamiento del resorte a partir del punto A en [m].

s = desplazamiento de los extremos de la red en [m].

r_0 = radio de la polea conectada al resorte en [m].

r_1 = radio de la polea conectada a los extremos de la red en [m].

v_0 = velocidad de los extremos de la red en [m/s].

v_1 = velocidad del resorte en el punto A en [m/s].

T_0 = tensión del cable entre las poleas y el resorte en [N].

T_1 = tensión del cable entre las poleas y la polea loca en [N].

ω_0 = velocidad angular del eje en [rad/s].

Las relaciones de desplazamientos y velocidades entre los extremos de la red y el resorte son:

$$s_1 = \frac{r_1 s_0}{r_0} \quad \text{y} \quad v_1 = \frac{r_1 v_0}{r_0}$$

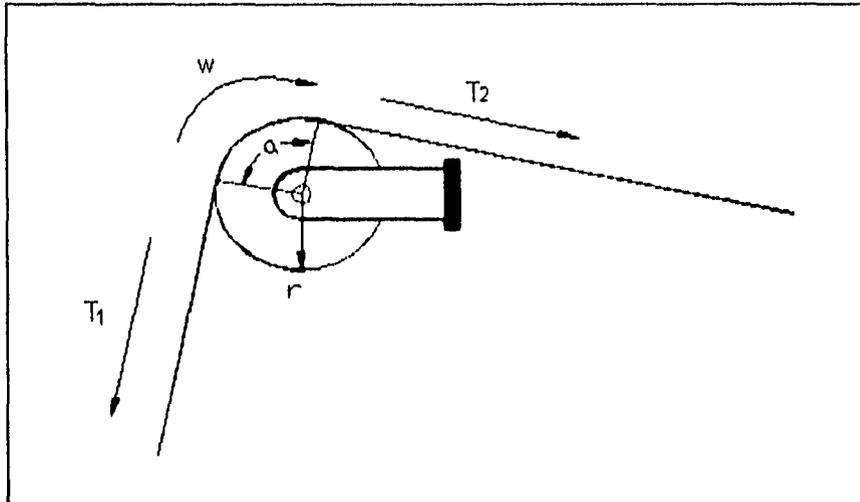


Fig. 5.7. En este diagrama aparece la polea en la estructura, que fija la dirección en la que se mueve el cable que pasa por ella.

Donde:

T_1 = tensión del cable entre las poleas y la polea loca.

T_2 = tensión entre la polea loca y el dispositivo unido al extremo de la red.

ω_1 = velocidad angular de la polea loca.

r_2 = radio de la polea loca.

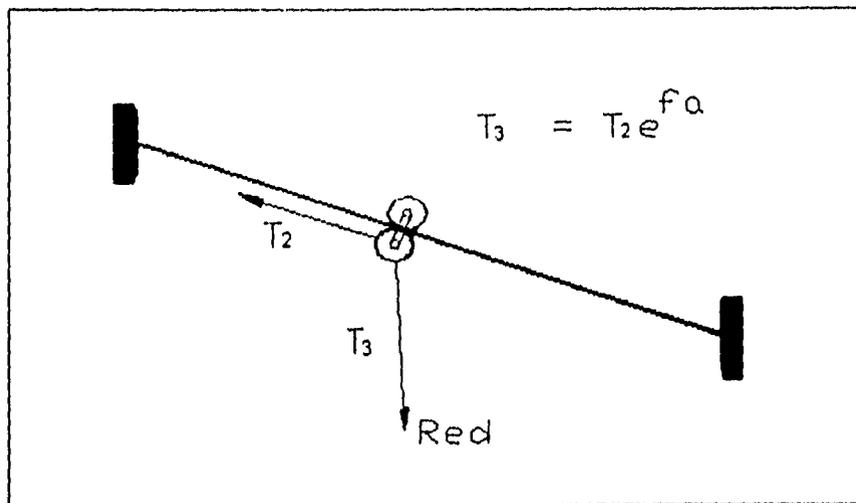


Fig. 5.8. En este diagrama aparece la polea que se desliza a través de los cables guía y las tensiones que le producen el sistema de frenado y a la red.

Donde:

T_2 = tensión entre la polea loca y el dispositivo unido al extremo de la red.

T_3 = tensión de la red.

ω_1 = velocidad angular de la polea loca.

r_2 = radio de la polea loca.

Las ecuaciones de velocidad y aceleración se obtienen a partir de un balance de energía, que se puede describir como:

Energía instantánea del ACR = Energía inicial del ACR. - Energía absorbida por el sistema de frenado. - Pérdidas

o bien,

$$\frac{1}{2} m_A v_{A1}^2(r) = \frac{1}{2} m_A v_{A0}^2 - \frac{1}{2} k s_0^2 - \sum \frac{1}{2} I \omega^2 - \text{Pérdidas}$$

Donde:

$\frac{1}{2} m_A v_{A1}^2(r)$ = Energía Instantánea del ACR.

$\frac{1}{2} m_A v_{A0}^2$ = Energía cinética inicial del ACR.

$\frac{1}{2} k s_0^2$ = Energía que absorben los juegos de resortes.

$$\sum \frac{1}{2} I \omega^2 = \text{Energía cinética de todas las poleas del sistema.}$$

P = Energía perdida por efecto Joule, fricción y estiramiento de la red, etc., esta energía se considera como el 10% de la energía cinética inicial del ACR.

donde:

m_A = masa del ACR en kg.

v_{A0} = velocidad inicial del ACR en m/s.

$v_{A1}(r)$ = velocidad instantánea del ACR en m/s.

k = constante resultante de los juegos de resortes en N/m.

s_0 = desplazamiento del resorte a partir del punto A en m.

I = momento de inercia de las poleas del sistema en kg / m^2 .

ω = velocidad angular de las poleas del sistema, todas las velocidades angulares se consideran constantes, en rad/s.

pero,

$$s_0^2 = \frac{r_0^2}{r_1^2} s_1^2$$

$s_1 = r$ - desplazamiento de los extremos de la red en m.

$$v_{A0}^2 = C_1$$

$$\frac{k}{m_A} = C_2$$

Como las velocidades angulares de las poleas del sistema dependen de la velocidad del ACR, se definió el parámetro de cambio re en función del recorrido de los extremos de la red, así tenemos que re = velocidad instantánea de los extremos de la red/velocidad inicial del ACR.

Este parámetro de cambio se evalúa como:

$$re = 0.000256742 r^4 - 0.00615459 r^3 + 0.0549858 r^2 - 0.239990 r + 0.515106 r + 0.285515$$

Despejando $v_{A1}(r)$, y sustituyendo obtendremos la ecuación que define el módulo de la velocidad y la dirección la define el ángulo γ .

La velocidad $v_{A1}(r)$, se define por la siguiente ecuación:

$$v_{A1}(r) = \sqrt{C_1 - C_2 s_0^2 - \sum \frac{I}{m_A} \omega^2 - 2 \frac{P}{m_A}} \text{ (cis } \gamma \text{)}$$

Para obtener la ecuación de velocidad de los extremos de la red, suponemos que la red se compone de dos eslabones unidos en un extremo, mientras que el otro extremo se desliza sobre guías. Como la velocidad es la misma en todos los extremos sólo se encontrará la velocidad v para los extremos inferiores.

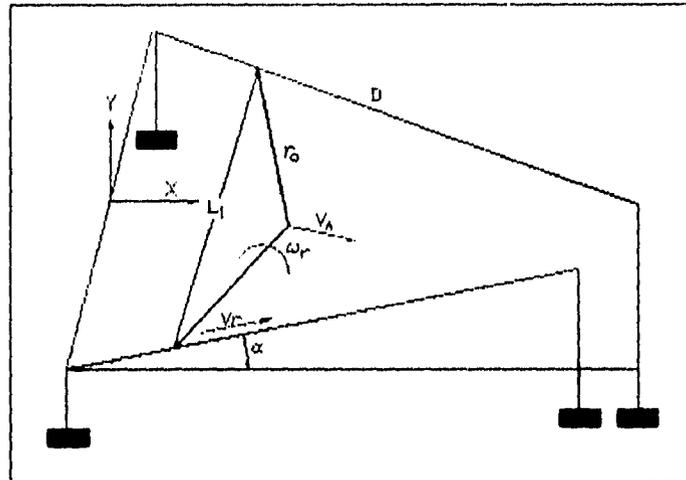


Fig 5.9. En esta figura se muestran las velocidades del ACR (v_A), y de los extremos de la red (v_r).

$$v_A(r) = v_r(r) + \omega \times r_0$$

Descomponiendo en las componentes i y j:

$$i \rightarrow v_{A_i}(r) = v_r(r) \cos \alpha - \omega_k r_j$$

$$j \rightarrow v_{A_j}(r) = v_r(r) \sin \alpha + \omega_k r_i$$

$v_{A_j}(r) = 0$, ya que si el ACR incide en el centro de la red el ángulo $\gamma = 0$

donde:

$$r_i = x_A - x_i$$

$$r_j = y_A - y_i$$

siendo:

r_i = la distancia entre el extremo de la red y el ACR sobre el eje X.

r_j = la distancia entre el extremo de la red y el ACR sobre el eje Y.

x_A = la posición instantánea del ACR sobre el eje X.

y_A = la posición instantánea del ACR sobre el eje Y.

x_i = la posición instantánea de los extremos inferiores de la red sobre el eje X.

y_i = la posición instantánea de los extremos inferiores de la red sobre el eje Y.

despejando ω_k de la ecuación de velocidad sobre el eje Y.

$$\omega_k = v_r(r) \frac{\sin \alpha}{r_j}$$

Sustituyendo en la ecuación de la velocidad sobre el eje X se obtienen

$$v_r(r) = \frac{v_{Ai}(r)}{(\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha (r_j / r_i))}$$

Ecuación del tiempo

La ecuación del tiempo para cada r se obtiene de la siguiente ecuación:

$$t = \int_{r_0}^r \frac{dr}{v(r)} \quad [11].$$

Donde dr es la derivada del desplazamiento y $v(r)$ es la ecuación de velocidad en función del desplazamiento.

Sustituyendo obtenemos:

$$t = \int_{r_0}^r \frac{(\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha (r_{oj} / r_{oi})) dr}{\sqrt{C_1 - C_2 s_n^2 - \Sigma \frac{I}{m_A} \omega^2 - 2 \frac{P}{m_A}}}$$

Ecuación de aceleración

Para encontrar una aproximación de la ecuación de aceleración del ACR se deriva la ecuación de velocidad del ACR $v_{Ai}(r)$, sin tomar en cuenta la energía cinética de las poleas del sistema ni las pérdidas por fricción, efecto Joule y estiramiento de la red, por lo que:

$$v_{Ai}(r) = \sqrt{C_1 - C_2 s_n^2}$$

Esta ecuación se puede escribir también como:

$$v_{Ai}(r) = \sqrt{C_1 - C_2 (rd \cdot r)^2}$$

donde rd es la reducción de las poleas entre los extremos de la red y el resorte.

derivando $v_{Ai}(r)$, en función de r se obtiene:

$$a_{Ai}(r) = \frac{-(rd)^2 C_2 r}{\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha (r_j / r_i)}$$

5.2.4 Resultados de las ecuaciones para los casos críticos

Resultados para las ecuaciones para un ACR con velocidad inicial de 22.22 m/s y un peso de 40 kg.

r (m)	X (m)	VA (m/s)	VR (m/s)	t (s)	AA (1/s ²)
0	0	22,22	0	0	0
0,1	0,53	22,03	7	0,02	-0,9
0,93	2,19	21,42	13,26	0,1	-3,42
1,76	3,43	20,78	14,91	0,15	-7,72
2,59	4,53	20,06	15,65	0,21	-12,35
3,42	5,57	19,15	15,85	0,26	-17,31
4,25	6,54	17,99	15,61	0,31	-22,55
5,08	7,48	16,55	14,93	0,37	-28,05
5,91	8,38	14,71	13,77	0,43	-33,32
6,74	9,26	12,39	11,98	0,49	-39,86
7,57	10,1	9,1	9,08	0,57	-46,2
8,4	10,92	1,28	1,32	0,73	-52,88

Donde:

r = distancia que ha avanzado el extremo de la red.

X = posición del ACR en el eje X.

Y = 0, posición del ACR en el eje Y.

VA = velocidad del ACR.

VR = velocidad de los extremos de la red.

AA = aceleración del ACR.

t = tiempo.

r (m)	EA (J)	ER (J)	EM (J)	Pf (J)
0	9874,56	0	0	0
0,1	9713,57	1,22	154,12	12,34
0,93	9183,27	105,78	488,52	114,79
1,76	8642,05	378,85	659,91	217,26
2,59	8052,59	820,43	706,89	319,71
3,42	7340,48	1430,52	706,43	422,17
4,25	6476,19	2209,12	689,09	524,63
5,08	5466,75	3156,24	647,57	627,09
5,91	4330,78	4271,87	562,64	729,54
6,74	3070,93	5556,01	431,53	832,01
7,57	1656,37	7008,65	286,16	934,46
8,4	32,95	8629,82	182,51	1036,92

Donde:

r = distancia que ha avanzado el extremo de la red.

EA = energía del ACR.

ER = energía del dispositivo absorbador de energía.

EM = energía cinética de las poleas del sistema.

Pf = energía de las pérdidas por efecto Joule, fricción y estiramiento de la red.

Gráficas de los resultados de las ecuaciones con velocidad inicial de 22.22 m/s y un peso de 40 kg.

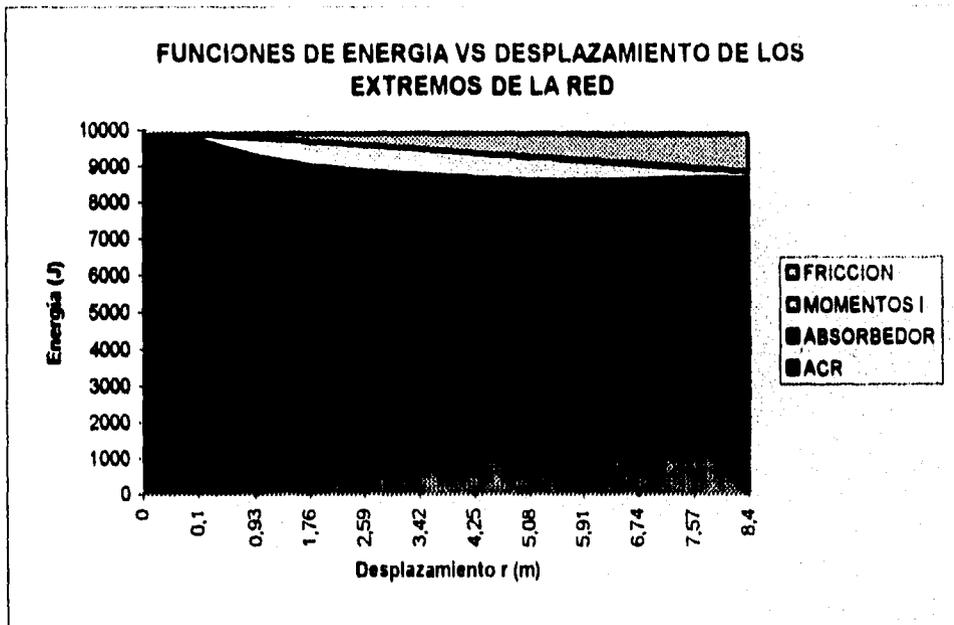
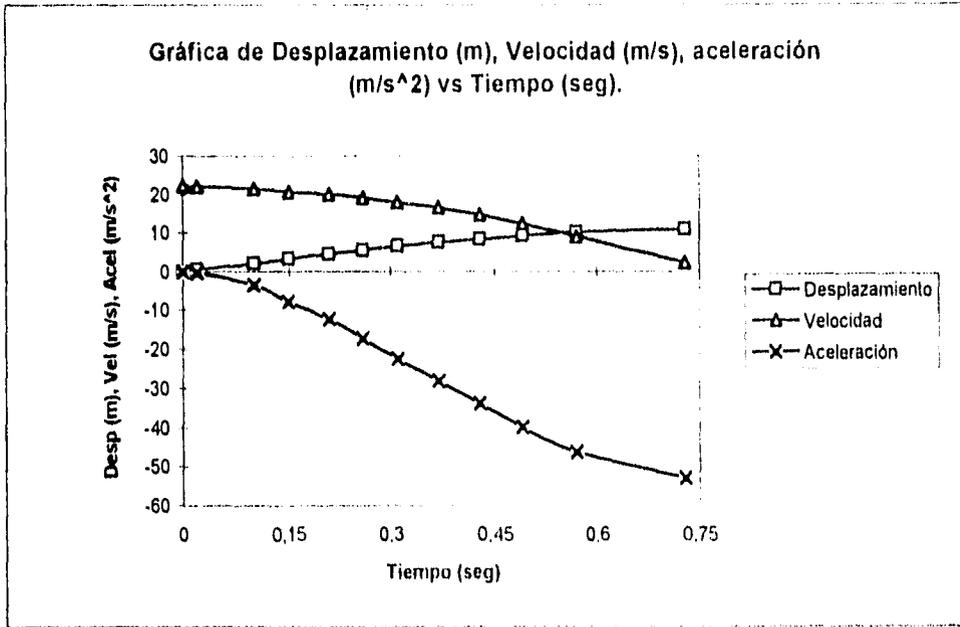
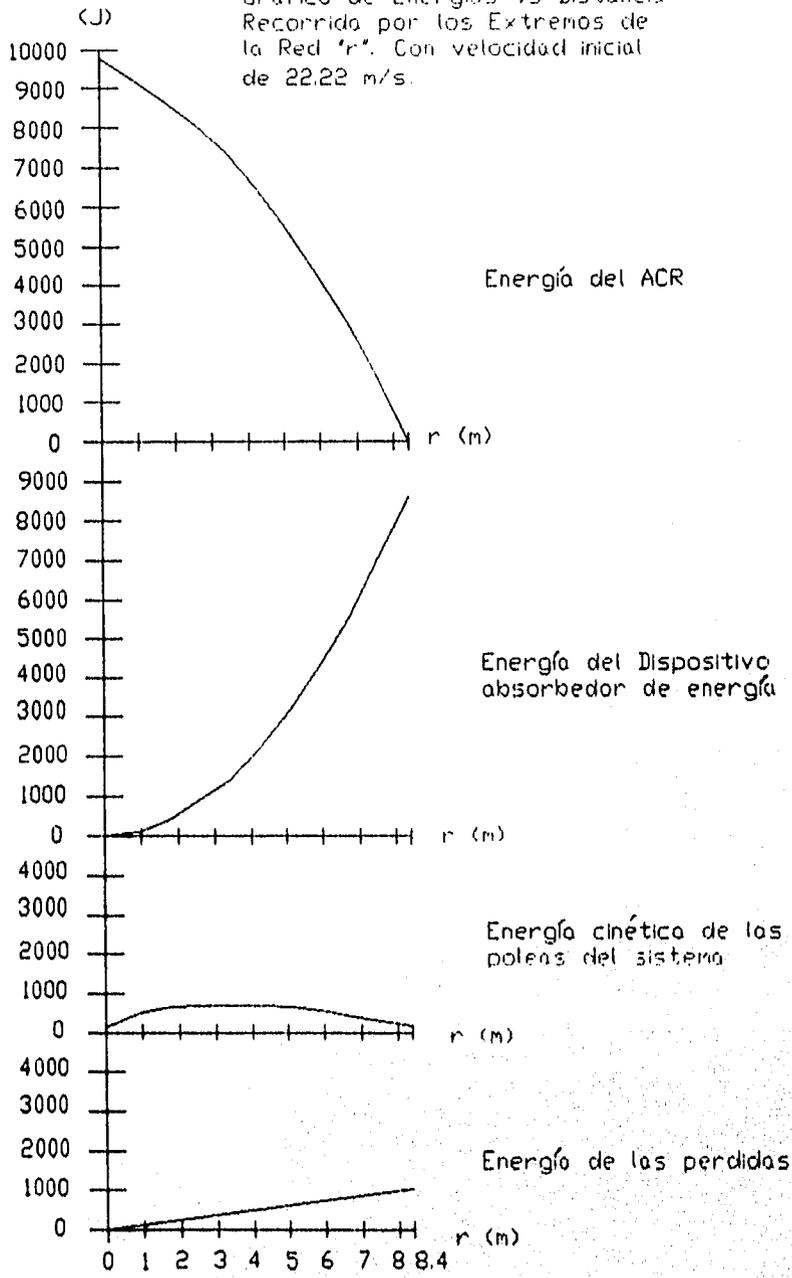


Gráfico de Energías vs Distancia
 Recorrida por los Extremos de
 la Red 'r'. Con velocidad inicial
 de 22.22 m/s.



Resultados para las ecuaciones para un ACR con velocidad inicial de 16.67 m/s y un peso de 40 kg.

r (m)	X (m)	VA (m/s)	VR (m/s)	t (s)	AA (m/s ²)
0	0	16,67	0	0	0
0,1	0,53	16,53	5,25	0,03	-0,19
0,71	1,84	16,15	9,37	0,11	-2,54
1,33	2,82	15,69	10,58	0,17	-5,49
1,95	3,69	15,14	11,11	0,23	-8,75
2,56	4,51	14,47	11,26	0,28	-12,22
3,18	5,28	13,62	11,1	0,34	-15,88
23,8	6,02	12,54	10,62	0,39	-19,69
4,41	6,74	11,16	9,76	0,45	-23,65
5,03	7,43	9,36	8,43	0,52	-27,75
5,65	8,11	6,83	6,32	0,61	-32,01
6,27	8,77	1,35	1,28	0,76	-36,41

Donde:

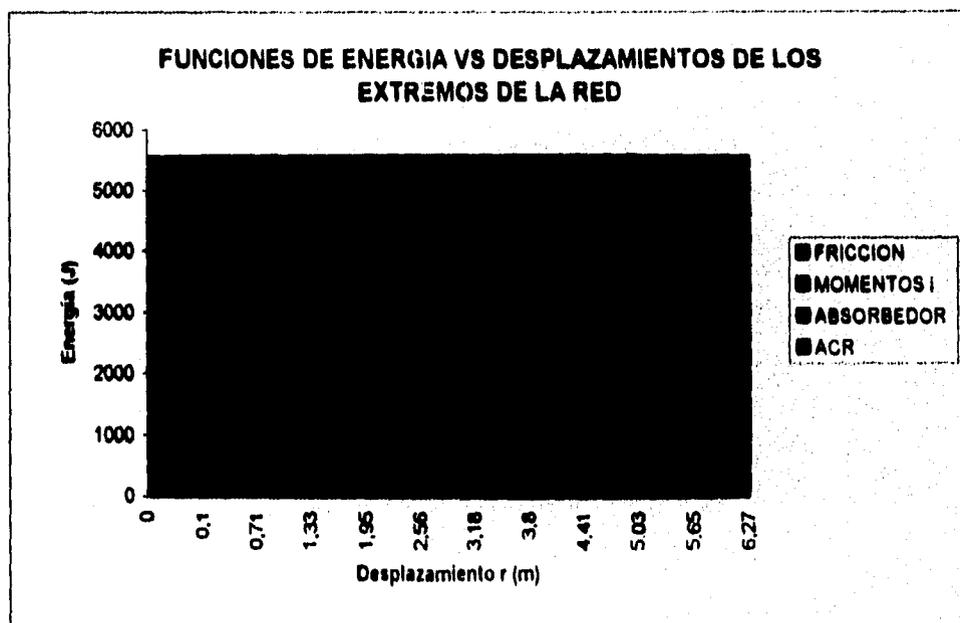
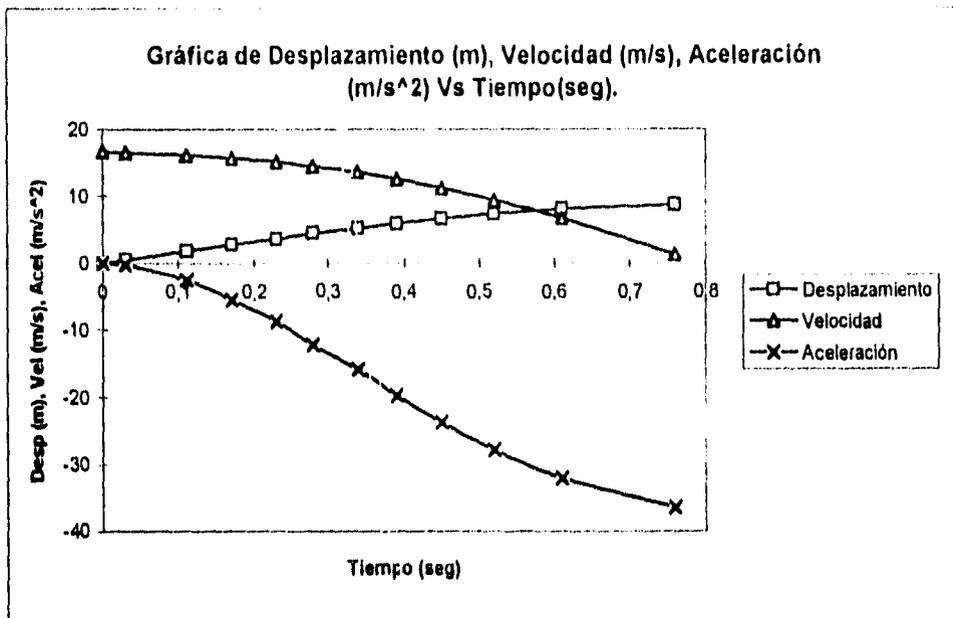
- r = distancia que ha avanzado el extremo de la red.
- X = posición del ACR en el eje X.
- Y = 0, posición del ACR en el eje Y.
- VA = velocidad del ACR.
- VR = velocidad de los extremos de la red.
- AA = aceleración del ACR.
- t = tiempo.

r (m)	EA (J)	ER (J)	EM (J)	Pf (J)
0	5557,76	0	0	0
0,1	5466,13	1,22	87,05	6,94
0,71	5219,542	62,87	234,01	49,81
1,33	4925,09	217,64	334,15	92,67
1,95	4567,96	465,54	362,09	135,54
2,56	4166,8	806,55	397,92	178,41
3,18	3710,61	1240,66	399,16	221,26
3,8	3145,02	1767,93	394,47	264,13
4,41	2491,16	2386,31	384,82	306,99
5,03	1752,45	3101,61	366,52	349,86
5,65	933,64	3906,42	334,61	392,72
6,27	36,71	4808	287,57	435,59

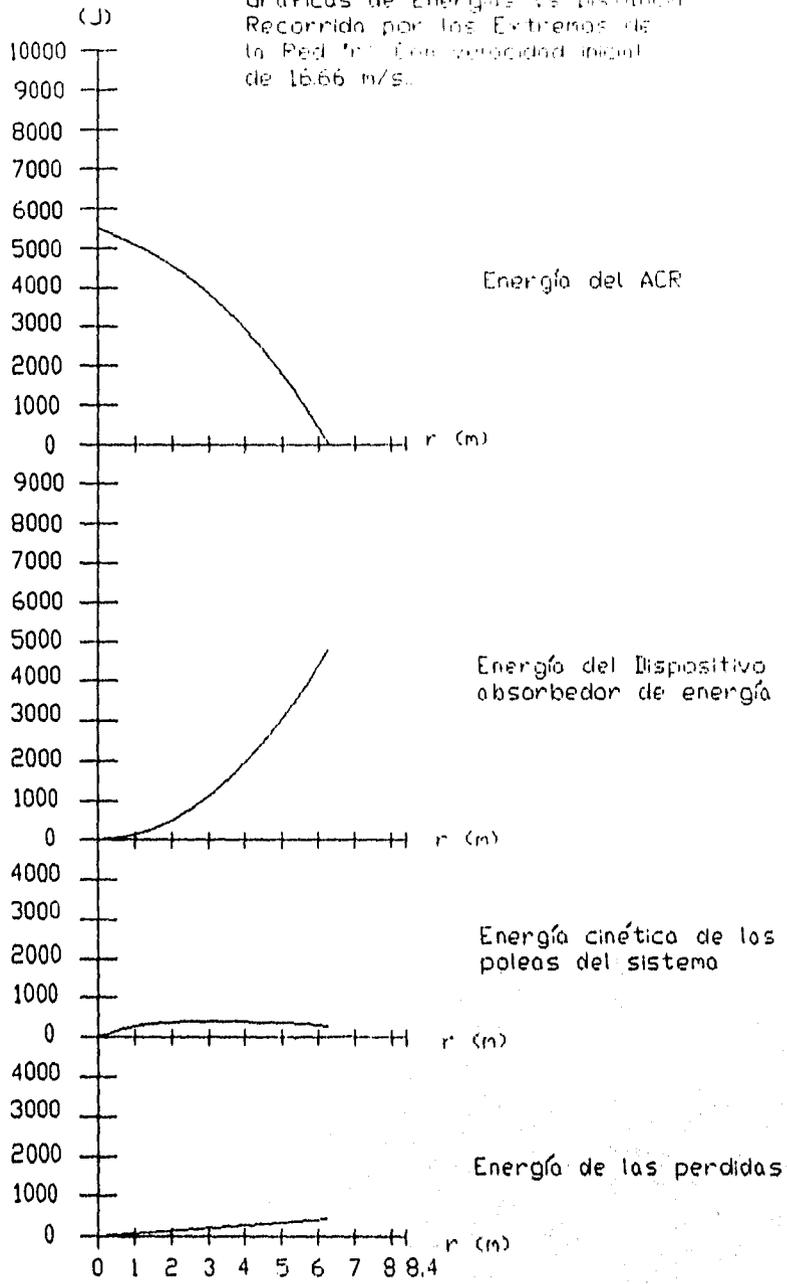
Donde:

- r = distancia que ha avanzado el extremo de la red.
- EA = energía del ACR.
- ER = energía del dispositivo absorbedor de energía.
- EM = Energía cinética de las poleas del sistema.
- Pf = energía de las pérdidas por efecto Joule, fricción y estiramiento de la red.

Gráficas de los resultados de las ecuaciones con velocidad inicial de 16.66 m/s y un peso de 40 kg.



Gráficos de Energías vs Distancia
 Recorrido por los Extremos de
 la Red. Con velocidad inicial
 de 16.66 m/s.



5.3 MODELADO DEL SISTEMA DE CAPTURA CON RED HORIZONTAL-VERTICAL

En esta sección se desarrollan las ecuaciones de movimiento del sistema de captura con red horizontal-vertical. Primero se describen los subsistemas de captura y frenado, luego se hace el modelado de la trayectoria del ACR dentro de la red y finalmente el modelado del movimiento del subsistema de frenado.

Descripción del sistema

La captura del ACR se hace mediante una red vertical que frena el movimiento que presenta en el eje X (trasladando toda la energía cinética a un sistema de frenado) y una red horizontal que amortigua el movimiento que se presenta en el eje vertical durante su caída. El sistema total se compone de dos subsistemas:

- a) el subsistema de captura que consta de:
 - 1. red vertical,
 - 2. red horizontal,
 - 3. estructura base y
 - 4. poleas fijas superiores.

- b) el subsistema de frenado que se compone de:
 - 5. bloque de carga,
 - 6. guía para el bloque de carga,
 - 7. poleas móviles y
 - 8. cables flexibles.

En la fig 5.3.1 se muestran esquemáticamente las partes del sistema y sus conexiones.

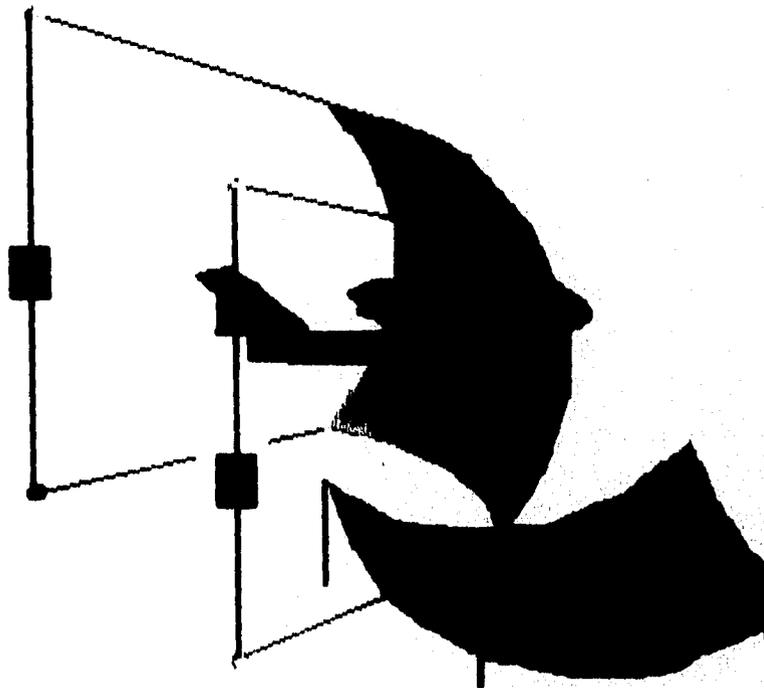


Fig 5.3.1. Sistema de recuperación por red vertical-horizontal

a) Descripción del sistema de captura:

La red vertical (a) se conecta al sistema de frenado (b) mediante cables (c). En la parte superior de cada poste vertical se tiene una viga en cantiliver (d) con una inclinación que sigue la trayectoria de la red. En cada extremo posterior de las vigas se fija una polea.

La estructura base sostiene dos postes y tres vigas que aumentan su estabilidad. Cerca de la unión de las tres vigas se fijan las poleas inferiores.

La red vertical está colocada detrás de los postes fijos de tal forma que la estructura base presenta una menor longitud. La red horizontal se encuentra sujeta a la estructura base a una altura adecuada para que el ACR no toque el suelo cuando caiga sobre ella.

b) Descripción del sistema de frenado.

Cada extremo de la red vertical se acopla al sistema de frenado mediante cables de acero. Cuando el ACR incide sobre la red, jala los cuatro cables. Cada cable pasa por un juego de poleas que guían los cables hasta el reductor de desplazamiento que reduce la altura de ascenso de la carga; de aquí, los cables se conectan a la carga de frenado. La transferencia de energía cinética a energía potencial mediante la elevación de este peso se lleva a cabo hasta una altura crítica. El reductor se usará solo en caso de que la altura crítica se quiera reducir.

Consideraciones del modelado

- velocidad del ACR al llegar a la red: 16.67 a 22.22 m/s (60 a 80 km/hr)
- aceleración de frenado del ACR constante (negativa),
- la fuerza total para detener el ACR se transmite íntegra por los cables; primeramente se calcula la carga total y luego se divide entre cuatro, ya que se conecta una carga por cada esquina de la red.
- el punto de contacto inicial del ACR en la red es en el centro de ella; sin embargo puede cambiar con alguna perturbación, por lo que se toma un intervalo de $\pm 1\text{m}$ en el eje Y, y de $\pm 1.5\text{m}$ en el eje Z para el primer punto de contacto.
- como el tiempo de recuperación es corto (0.7 seg) se considera que el ACR viaja con movimiento rectilíneo durante la recuperación.

Nomenclatura del modelado dinámico

Velocidad inicial del ACR	v_0
Masa del ACR	m_a
Aceleración del ACR	$a (-)$
Tiempo de recuperación del ACR	t
Distancia de recuperación	d
Ángulo de descenso del ACR al entrar a la red	$(\theta)_a$
Envergadura del ACR	E
Distancia que recorre el ACR desde que toca la red hasta que se tensa	x_0
Fuerza total que ejerce el ACR sobre el sistema	FT
Energía cinética del ACR	E_c
Punto de contacto del ACR sobre la red	A
Masa de la carga a levantar	m_b
Altura crítica que se levanta la carga	h_b
Aceleración de la carga	a_b
Velocidad final de la carga	v_b
Radio de las poleas	r_{pa}
Relación de reducción del reductor	r

Ángulo de las poleas con respecto al eje X	θ_{pa}
Fuerza resultante sobre la carga	FR
Fuerza sobre cada cable	FS
Tensión en el cable conectado a la red	T_1
Tensión en el cable conectado a la carga	T_2
Distancia que recorre el cable	C_0
Altura de la red	H
Longitud de la red	L
Distancia de la esquina de la red a la polea superior	G
Distancia sobre la red de la punta del ala a la polea	F
Energía que absorbe la carga	E_b
Fuerza de gravedad	g

Modelado cinemático de la trayectoria del ACR.

El modelo considera un movimiento uniformemente acelerado en el plano vertical. El ACR en el momento de incidir sobre la red lleva una velocidad que llamaremos velocidad de entrada o inicial, con un ángulo de entrada θ_a respecto a la horizontal. En el caso de una perturbación, el ángulo puede variar y ser positivo o negativo. Sin embargo, el caso ideal es cuando el ángulo está por debajo del eje X del movimiento, por lo que se considera positivo en esa dirección. El eje Y (vertical) coincide con la posición inicial de la red, y el eje Z se tiene a lo ancho de la red. El origen del sistema de coordenadas coincide con el centro de la red. En la fig 5.3.2 se observa la trayectoria estimada del ACR.

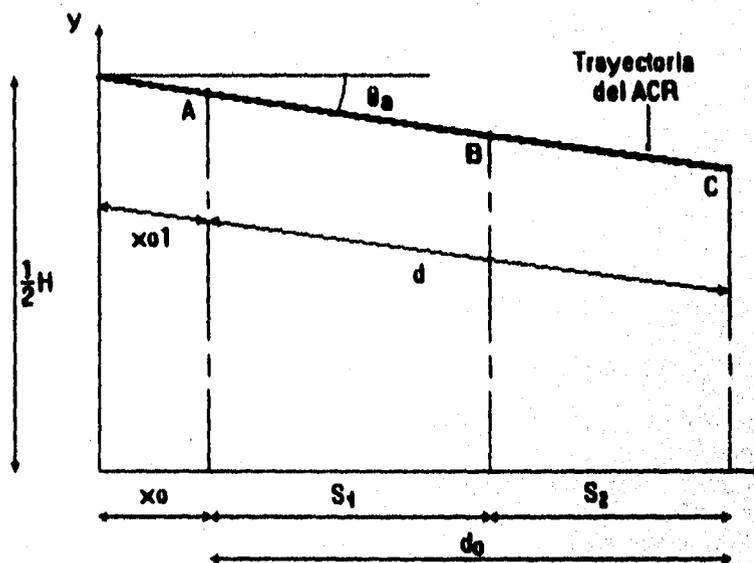


Fig 5.3.2. Trayectoria del ACR en el plano X-Y durante la recuperación.

Durante el recorrido de la distancia d_0 el movimiento es rectilíneo. El efecto de la gravedad se desprecia debido a que el tiempo de recuperación es corto. Así, de la configuración geométrica:

$$x_{01} = \frac{x_0}{\cos \theta a} \quad \text{y} \quad d = \frac{d_0}{\cos \theta a}$$

Donde, x_0 es la distancia que necesita la red para extenderse y comenzar a jalar el peso. La aceleración en X del ACR para un movimiento uniformemente acelerado se define como:

$$a_x = -\frac{(v_0 \cos \theta a)^2}{2d_0}$$

La aceleración en la dirección de la trayectoria es:

$$a = a_x \sin \theta$$

La ecuación de la trayectoria en el intervalo x_0 y d_0 está dada por:

$$y = \frac{1}{2} H - (x_{01} + x) \tan \theta a \quad (1)$$

El tiempo t es la suma del tiempo en x_0 mas el tiempo en d por lo que $t = t_{x_0} + t_d$, sustituyendo

tenemos:
$$t = \frac{2x_{01}}{v_0} + \frac{2d}{v_0}$$

La velocidad del ACR se obtiene integrando la aceleración constante a con respecto al tiempo y la posición integrando la velocidad:

$$\int_{v_0}^0 v dv = a \int_0^t dt$$

Entonces, para toda la trayectoria:

$$v_{xd} = v_0 + at \quad (2)$$

$$x_d = (v_0)t + \frac{1}{2} at^2 \quad (3)$$

x_d corresponde a la distancia sobre la trayectoria.

Movimiento de las esquinas de la red y del cable.

El análisis de las esquinas de la red permite conocer su desplazamiento relativo con respecto al desplazamiento del ACR. La dirección del movimiento de la esquina cambia porque la red va alterando su geometría gradualmente conforme aumenta la distancia recorrida.

Al conocer la relación entre ambos desplazamientos se obtiene el desplazamiento del cable. En las figs 5.3.3, 5.3.4 y 5.3.5 se muestran tres vistas de la recuperación.

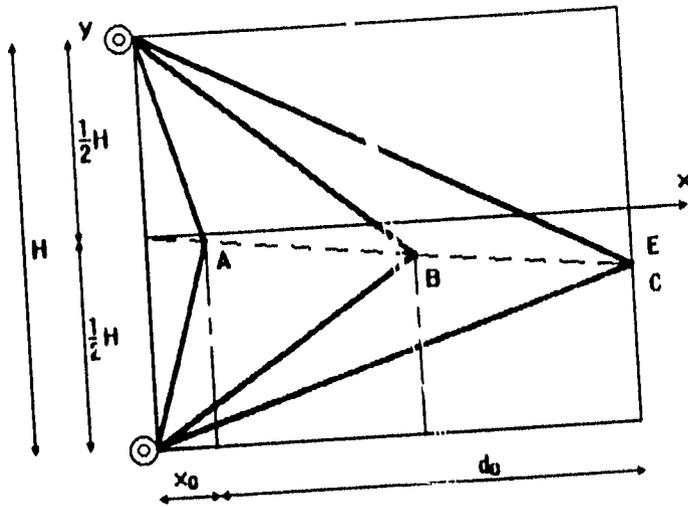


Fig 5.3.3. Vista lateral de la recuperación.

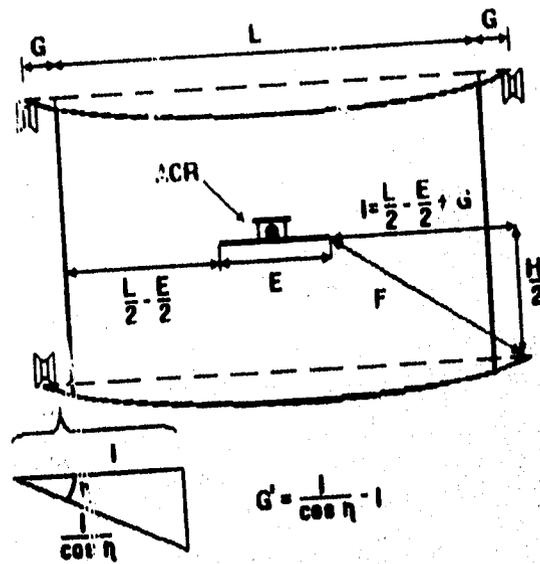


Fig 5.3.4. Vista frontal de la recuperación.

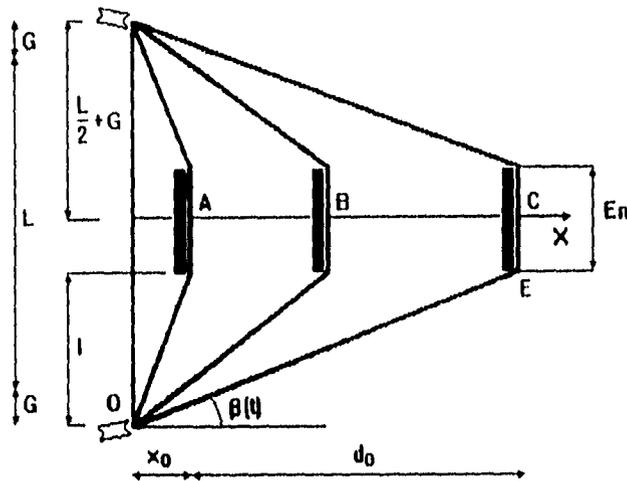


Fig 5.3.5. Vista superior de la recuperación.

En la fig 5.3.3 se observa que al recorrer la distancia x_0 la red se tensa y llega al punto A donde se ejerce la fuerza sobre el cable C_0 . El ACR tiene un movimiento hacia el eje X con un ángulo de descenso. Las líneas gruesas muestran cuatro posiciones de la red desde que se encuentra vertical sin movimiento hasta que la velocidad del ACR es mínima en el punto C. Después, cae por efecto de la gravedad.

En la fig 5.3.4 se muestra la vista superior donde se observa como cuelga la red por su peso. G es la distancia entre la polea y la red si ésta estuviera totalmente tensa y G' es la distancia con el ángulo que se forma hacia abajo. El ala del ACR tiene una longitud E_n ; F es la distancia de la punta del ala al punto donde se une la red con el cable. L es la longitud de la red sobre eje Z.

En la fig 5.3.5 se observa como el cable se tensa por las puntas del ala del ACR. El rectángulo oscuro es el ala, (la parte frontal del ACR no se dibuja ya que se considera que entra en algún hueco de la red y lo que verdaderamente jala a ésta es el ala). β es el ángulo que forma la proyección de OE sobre el plano X-Z con el eje X. La distancia F, que se mantiene constante sobre el cable, permite conocer qué cantidad de cable se requiere para frenar al ACR. Es decir, la cantidad de cable C_0 para cada posición será la magnitud de la distancia OE menos la distancia F, menos G' y menos el porcentaje que se estira el material con el que está fabricada la red por lo que:

$$C_0 = OE - F - G' - \%e \quad (5)$$

La magnitud OE es:

$$OE = \sqrt{\left(l^2 + (x_0 + x)^2 + \left(\frac{H}{2} \pm y\right)^2\right)} \quad (6)$$

donde:

$$l = \frac{L}{2} - \frac{E}{2} + G.$$

En la expresión (6), y está dada por la ecuación (1) para el intervalo de movimiento x_0 y S_1 , y por la ecuación (4) para el intervalo S_2 . El signo (+) se utiliza en el cálculo de C_0 de las poleas superiores

porque el ACR viaja por debajo del eje X y a la distancia H/2 se le suma v. El signo (-) se utiliza en el cálculo de Co de las poleas inferiores. En este caso se utilizará el signo (+).

Ecuaciones de movimiento del mecanismo de frenado.

Como se dijo anteriormente, cada esquina de la red está conectada al extremo de un cable, el cual pasa por dos poleas y un reductor hasta llegar a la carga de frenado. El ACR al jalar los cables levanta una carga que lo va frenando, así, pierde energía cinética y disminuye su velocidad en X hasta ce.o. La fig 5.3.6 muestra el sistema de frenado de manera esquemática.

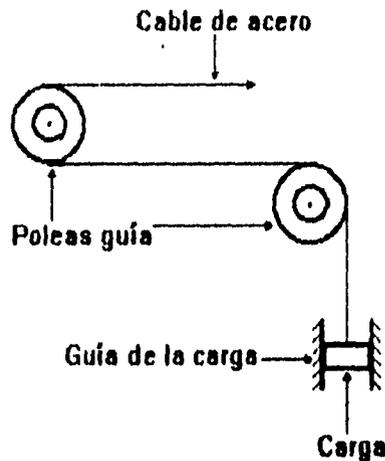


Fig 5.3.6. Sistema de frenado.

En el instante en el que el ACR toca la red, el cable no tiene movimiento. Cuando se tensa la red, en el punto xo, la fuerza FR actúa sobre el cable elevando la carga, en este momento el ACR comienza a perder energía cinética y la carga empieza a adquirir velocidad.

Para conocer la aceleración y la masa de la carga se parte de igualar la energía cinética del avión con la energía necesaria para levantar la carga, o sea:

$$E_c = E_b = \frac{1}{2} m_a v_o^2 = \frac{1}{2} m_b (v_b^2 - v_{o_b}^2) + m_b h_b$$

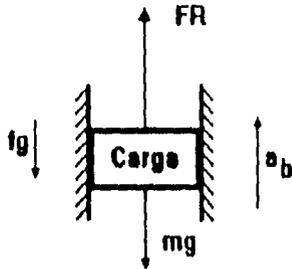
v_b es la velocidad final de la carga. v_{o_b} es la velocidad inicial que en este caso es cero porque parte del reposo. Por definición, se pueden poner la velocidad final y el desplazamiento h_b en términos del tiempo y la aceleración:

$$\frac{1}{2} m_a v_o^2 = \frac{1}{2} m_b (a_b t)^2 + m_b g \left(\frac{a_b t^2}{2} \right)$$

Se despeja a_b y la ecuación se resuelve como sigue:

$$a_b = \frac{-g + \sqrt{g^2 - \frac{Ec - fgh_b}{0.5m_b t^2}}}{2} \quad (7)$$

En el diagrama de la fig 5.3.5 se observan las fuerza que actúan sobre la carga.



Por la tercera ley de Newton:

$$FR = m_b(a_b + g) + fg$$

Fig 5.3.7. Fuerzas que actúan sobre la carga.

Donde fg es la fricción sobre la guía y FR es la fuerza necesaria para que la carga de masa m_b adquiera la aceleración a_b .

La velocidad y el desplazamiento son:

$$v_{tb} = a_b t$$

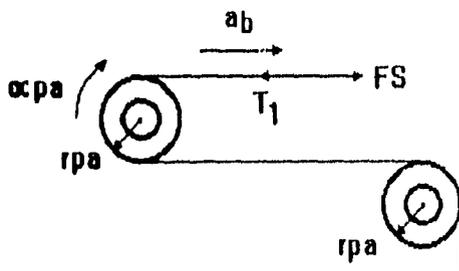
$$h_b = \frac{a_b t^2}{2} \quad (8)$$

La ecuación (5) y la ecuación (8) representan el desplazamiento del cable y la altura de la carga. Estas distancias deben ser iguales ya que por la configuración geométrica de la red en la recuperación, C_o es la longitud de cable que jala el ACR, y como el cable se conecta a la carga, su desplazamiento es el mismo. Por lo tanto, en la ecuación (7), se deben proponer distintos valores de m_b hasta que C_o y h_b sean iguales.

Finalmente, el valor de m_b se divide entre cuatro ya que son cuatro esquinas de la red y cada una se conecta a un cable que levanta una carga.

Modelado del sistema de frenado

En la fig 5.3.6 se muestra el sistema de frenado. Para su modelado se obtienen las tensiones en el cable C_o y en la unión de la polea con la carga, así como conocer la aceleración angular de las poleas y del reductor.



$$FS = \frac{FR}{4}$$

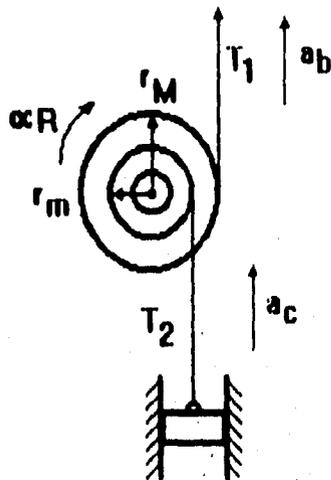
La tensión es igual a la fuerza FS sobre cada cable Co.

$$T_1 = FS \quad \alpha_{pa} = \frac{a_b}{r_{pa}}$$

Fig 5.3.8. Diagrama de conexión de las poleas sin tomar en cuenta el reductor.

El reductor se colocará según los requisitos del diseño del sistema. Si la distancia para elevar la carga hasta h_b es grande, el reductor puede disminuir la altura dos o tres veces; a la vez, la carga tendrá que ser dos o tres veces más respectivamente.

Para conocer la tensión T_2 en el reductor se analiza la fig 5.3.8:



La relación de reducción se obtiene con:

$$r = \frac{r_M}{r_m}$$

donde r_M representa el radio mayor del reductor y r_m el radio menor. La tensión en el cable c se define como:

$$T_2 = rT_1, \quad \alpha_{RE} = \frac{a_b}{r_M} \quad y$$

$$h_{b2} = \frac{h_{b1}}{r}$$

Fig 5.3.9. Diagrama del sistema con reductor.

La aceleración del cable c es: $a_c = a_b$. El término fg es la fricción de la carga sobre la guía que dirige su movimiento ascendente.

5.3.1 Resultados de las ecuaciones para una velocidad inicial de 22.22

Resultados para las ecuaciones para un ACR con velocidad inicial de 22.22 m/s y un peso de 40 kg.

t (s)	X (m)	Y (m)	V _{Ax} (m/s)	E. Sist (J)	E. ACR (J)
0	0	0	22,22	0	9875
0,05	1,05	-0,28	20,2	1714	8161
0,1	2,01	-0,45	18,18	3264	6611
0,15	2,87	-0,61	16,16	4652	5223
0,2	3,63	-0,75	14,14	5876	3999
0,25	4,28	-0,87	12,12	6937	2938
0,29	4,84	-0,97	10,1	7834	2041
0,34	5,29	-1,05	8,08	8569	1306
0,39	5,64	-1,12	6,06	9140	735
0,45	5,89	-1,16	4,04	9548	327
0,49	6,04	-1,16	2,02	9793	82
0,55	6,09	-1,2	0	9875	0

Donde:

X = posición del ACR en el eje X.

Y = posición del ACR en el eje Y.

V_{Ax} = velocidad del ACR en el eje X.

A_{Ax} = aceleración del ACR en el eje X, cte. = -40.47 m/s².

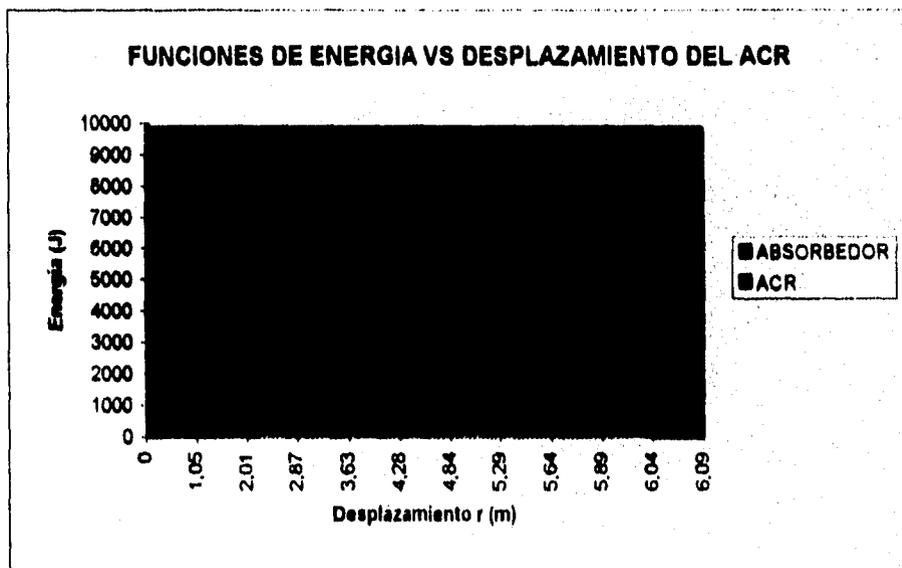
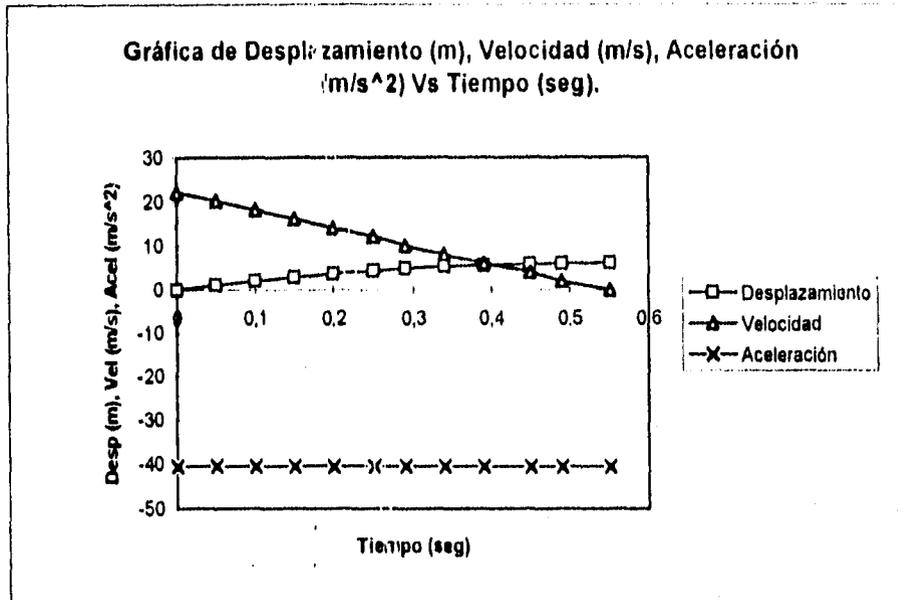
A_{Ay} = aceleración del ACR en el eje Y, cte. = -9.81 m/s².

t = tiempo.

E. Sist = Energía que absorbe el sistema.

E. ACR = Energía remanente en el ACR.

Gráficas de los resultados de las ecuaciones con velocidad inicial de 22.22 km/hr y un peso de 40 kg.



5.4 Conclusiones

A continuación se presentan las características de los Sistemas de Recuperación analizados en este capítulo.

Características	Modelado de la sección 5.2	Modelado de la sección 5.3
Tipo de red	Red vertical con cables guía y sistema absorbedor de energía opcional (resortes, masa variable, hidráulico, etc.)	Red vertical con sistema absorbedor de energía y red horizontal para amortiguamiento de caída
Distancia de recuperación para una aeronave de 40 Kg y velocidad de 22.22 m/s	7 ± 1	7 ± 1
Consideraciones del modelo	<p>La trayectoria de recuperación es forzada a ser rectilínea antes de caer por la acción de la gravedad</p> <p>La aeronave incide en el centro de la red ± 1.50 m y con un ángulo sólido de incidencia de $\pm 15^\circ$</p>	<p>La trayectoria de recuperación se supone uniformemente desacelerada, y permite que los extremos de la red se muevan independientemente capturando así a la aeronave como ya presente dentro del intervalo:</p> <p>La aeronave incide en el centro de la red ± 1.20 m, con un ángulo de $\pm 10^\circ$ en el plano XZ, y un ángulo de $\pm 15^\circ$ en el plano XY</p>
Ventajas	<p>El sistema se puede ajustar a las características de la aeronave de: peso: 40 a 60 kg velocidad: 70 a 80 km/hr Cambiando la resistencia del absorbedor de energía que se utilice</p> <p>El sistema cuenta con un sistema de reducción (en caso de utilizar el sistema de resortes o hidráulico), que ayuda a disminuir la distancia que se desplazan estos</p>	<p>El sistema se puede ajustar a las características de la aeronave de: peso: 40 a 60 kg velocidad: 70 a 80 km/hr Cambiando el peso y recorrido de las masas de carga</p> <p>Tiene poleas inclinadas con respecto al eje X para que los cables se ajusten a la trayectoria de los extremos de la red en orden de $10^\circ \pm 5^\circ$</p>

Los resultados de las ecuaciones de los modelados dinámicos de las secciones 5.2 y 5.3 se muestran en los apéndices A y B respectivamente.

Como se observa en la tabla anterior los dos sistemas cumplen adecuadamente con las especificaciones requeridas para el proyecto. El sistema de la sección 5.3 es más complejo, ya que tiene más piezas interconectadas y además una red horizontal, tiene dos puntos críticos en la unión de los postes verticales y las vigas superiores, ya que están sujetos a grandes esfuerzos en los primeros momentos de la recuperación. El sistema 1 es un sistema que asegura la trayectoria de recuperación del ACR y

permite que los cables corran de la red al sistema de frenado en forma más directa que en el sistema de la sección 5.3, reduciendo esfuerzos en postes y poleas.

Dado lo anterior y que el sistema es una propuesta original en éste trabajo que cumple con lo siguiente:

- bajo costo
- no requiere personal especializado
- los cuatro extremos de la red se mueven simultáneamente con una trayectoria previamente determinada, que permite que el ACR se envuelva dentro de la red
- no requiere de materiales especiales
- se diseñó específicamente para este proyecto

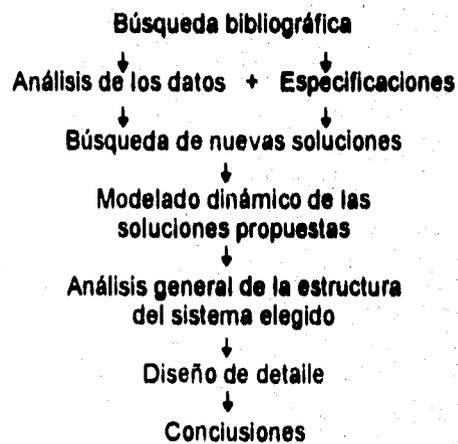
se elige el sistema de la sección 5.2, que es el **Sistema de Recuperación** con red vertical guiada por cables.

CAPÍTULO 6

DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN.

El diseño mecánico del sistema de recuperación se lleva a cabo con la siguiente metodología:



En este capítulo se muestran: el dibujo de la configuración del Sistema de Recuperación total señalando todas sus partes, los materiales para la manufactura, los programas de elemento finito del análisis estructural estático no lineal y sus resultados, los cuales nos dimensionan las partes principales de la estructura del sistema.

6.2 DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN.

En la fig. 6.1, muestra la plataforma estructural junto con los cables guía, reductores y dispositivo de frenado del Sistema de Recuperación.

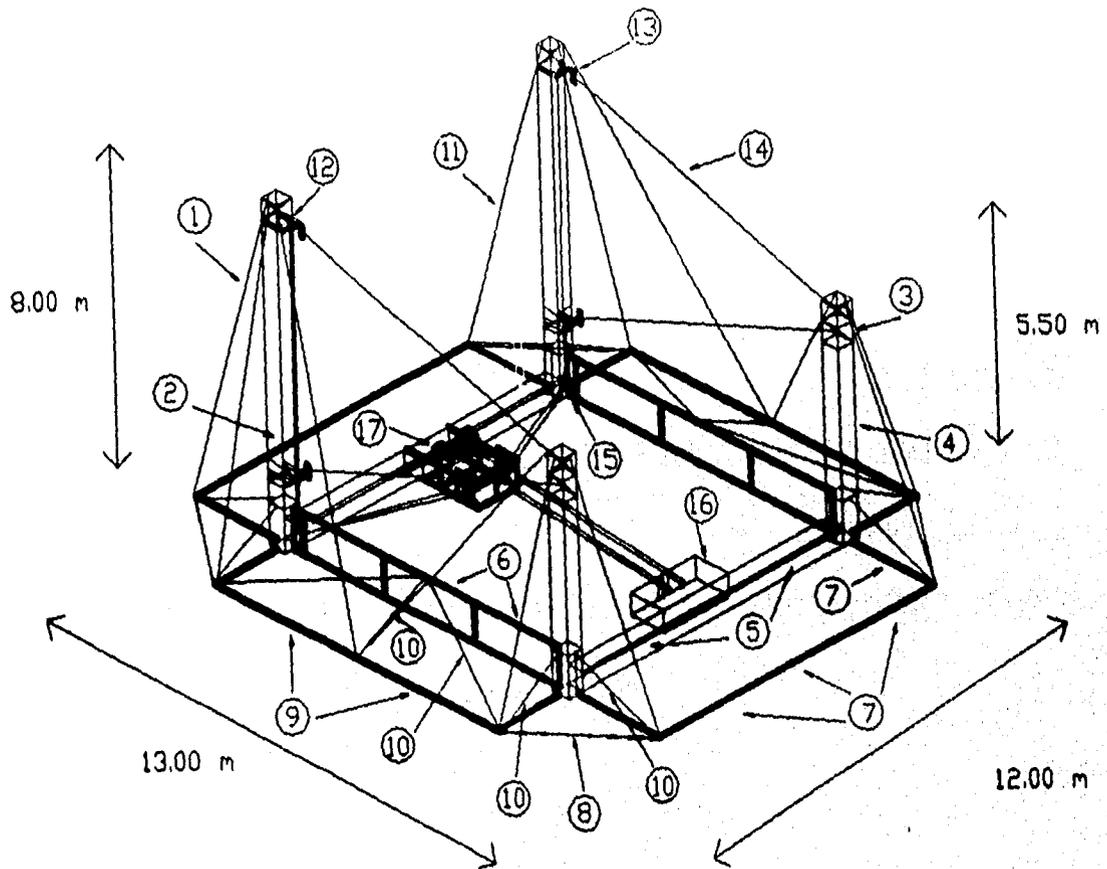


Fig 6.1. Vista de las partes principales que constituyen el Sistema de Recuperación.

6.2 DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN.

En la fig. 6.1, muestra la plataforma estructural junto con los cables guía, reductores y dispositivo de frenado del Sistema de Recuperación.

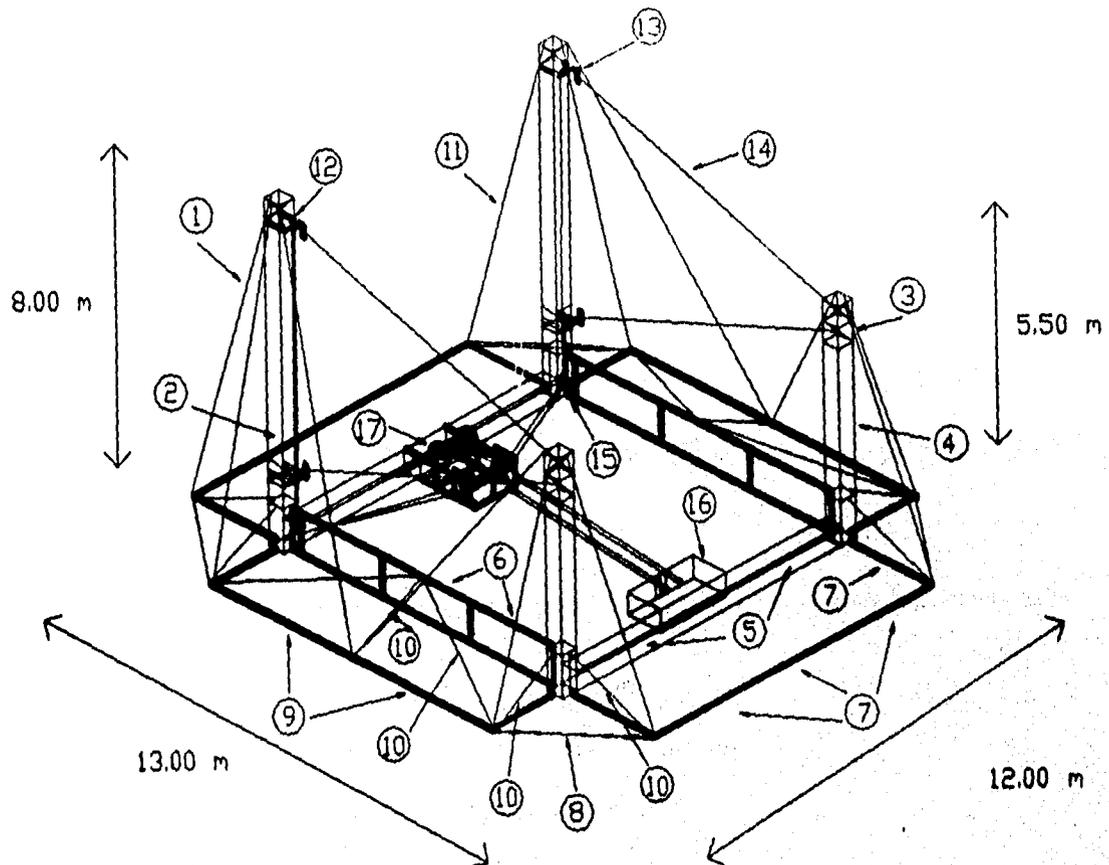


Fig 6.1. Vista de las partes principales que constituyen el Sistema de Recuperación.

En la figura anterior se presentan 2 cambios a partir del modelado dinámico de la sección 5.2,

1. se agrega un reductor conectado a los cables unidos a los extremos de la red, ya que el diámetro del tambor mínimo para enrollar un cable de 1/4" es de 20 cm aproximadamente, y para disminuir las dimensiones, se utiliza dicho reductor y

2. el sistema de resortes se presenta como se aclaró en la sección 5.2, como un dispositivo absorbedor de energía opcional. Más adelante se presentan otros dispositivos opcionales.

A continuación se presenta una vista aislada del sistema de reducción.

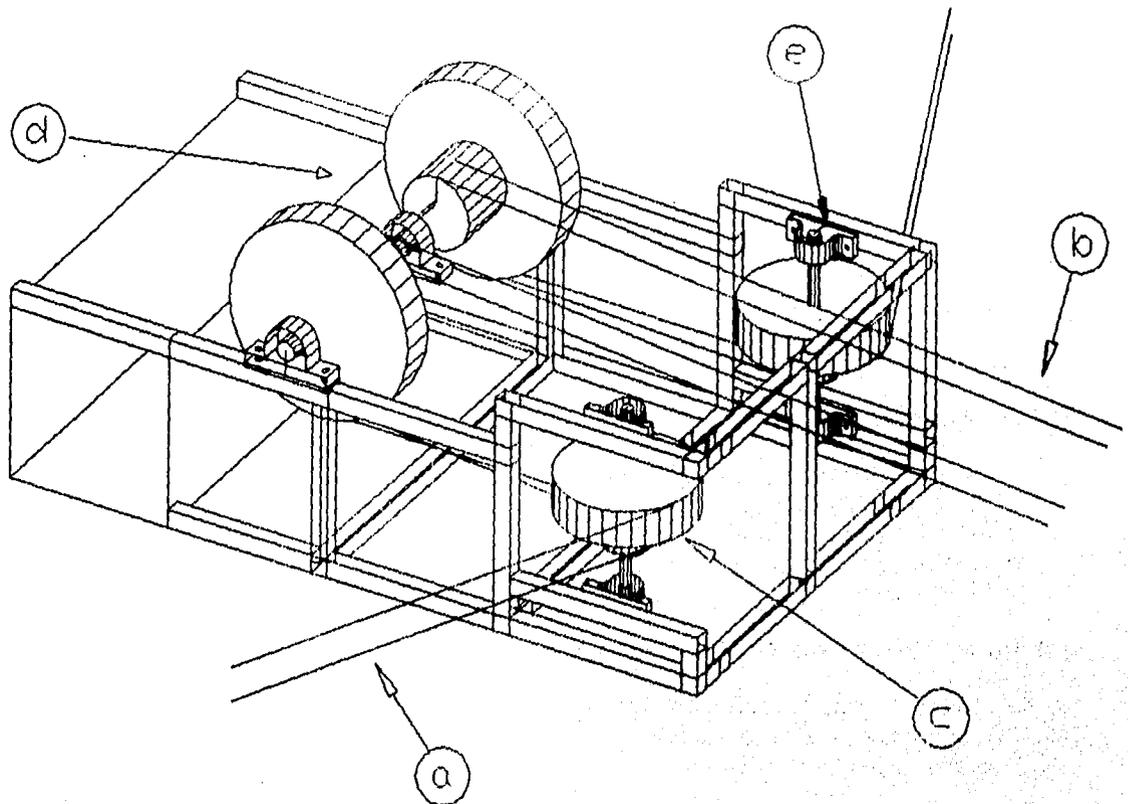


Fig. 6.2. Vista general del sistema de reducción.

6.2.1 Selección de materiales y tecnología de construcción.

Este proyecto es diseñado con materiales comerciales de fácil acceso como son el acero estructural y los cables de acero que se utilizan en todas las partes de la estructura. La red es de butadieno-estireno, que es un material viscoelástico con alto factor de amortiguamiento para disminuir posibles problemas de vibración.

La mayor parte de las piezas se ensamblan con soldadura o se unen en secciones mediante tornillos. Se evitan las tolerancias cerradas, para abatir el costo de fabricación y facilitar el ensamble de las piezas.

Las partes principales que constituyen al Sistema de Recuperación se muestran en las figs 6.1 y 6.2 , las principales dimensiones de cada parte se describen a continuación:

- 1.- Parte superior de la estructura de los postes de 8 m.
- 2.- Parte inferior de la estructura de los postes de 8 m.
- 3.- Parte superior de la estructura de los postes de 5.50 m.
- 4.- Parte inferior de la estructura de los postes de 5.50 m.
- 5.- Estructura entre postes.

Todas las estructuras están formadas por un marco de ángulo de lados iguales de 51 X 51 X 3.2 mm y reforzadas con solera de 51 X 3.2 mm, las estructuras de los postes sostienen además las poleas que direccionan el cable y el soporte para los cables fijos.

- 6.- Marco de PTR.
- 7.- Base de PTR.
- 8.- Base de ángulo.
- 9.- Base de PTR.
- 10.- Refuerzo de ángulo.
- 11.- Cables estructurales de 5/8" de 6 torones de 7 hilos, con capacidad de soportar 12.0 ton.
- 12.- Poleas fijas a la estructura que direccionan al cable unido a los extremos de la red.
- 13.- Poleas que corren a través del cable guía.
- 14.- Cables guía de 1" de 6 torones de 7 hilos, con capacidad de soportar 30.0 ton.
- 15.- Poleas fijas que direccionan el cable unido a los extremos de la red de la pieza 21 a la 16.
- 16.- Dispositivo de frenado.

17.-Sistema de reducción de desplazamiento.

- a- Cables de 1/4" de 8 torones de 19 hilos.
- b- Cables de 3/8" de 8 torones de 19 hilos.
- c- Reductores de desplazamiento.
- d- Transmisión
- e- Chumaceras

El diseño de los elementos móviles se muestra en el capítulo 7.

18.-Plataforma estructural del sistema de reducción.

Todos los ángulos de la estructura del Sistema de Recuperación son de: 51 X 51 X 3.2 mm, los cuales tienen las siguientes propiedades [10]:

$$\begin{aligned} \text{Masa por m} &= 2.4 \text{ kg/m,} \\ \text{Área} &= 312 \text{ mm}^2, \\ I &= 79100 \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Todos los perfiles estructurales cuadrados huecos (PTR), tienen las siguientes medidas: 64 X 64 X 3, con las siguientes propiedades:

$$\begin{aligned} \text{Masa por m} &= 5.48 \text{ kg/m,} \\ \text{Área} &= 698 \text{ mm}^2, \\ I &= 423000 \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Las propiedades de los perfiles estructurales de acero para este proyecto son:

$$\begin{aligned} \text{Módulo de elasticidad } E &= 200 \text{ Gpa,} \\ \text{Resistencia a la fluencia:} \\ &\text{a) tracción } 250 \text{ MPa} \\ &\text{b) fuerza cortante } 145 \text{ MPa. [10].} \end{aligned}$$

Las dimensiones de las piezas y su forma de ensamble se pueden encontrar en los dibujos de detalle y las vistas acolladas del Sistema de Recuperación del apéndice D.

6.2.2 Dispositivos absorbedores de energía.

a) Dispositivo de resortes.

Este dispositivo está compuesto por un juego de resortes en paralelo, que suman la k necesaria para detener al ACR, éstos trabajan a compresión por facilidad de diseño; el juego de resortes tiene un freno que impide a los resortes liberar la energía almacenada durante la captura y mover el sistema hacia su posición inicial. A continuación se presenta una configuración general de este dispositivo.

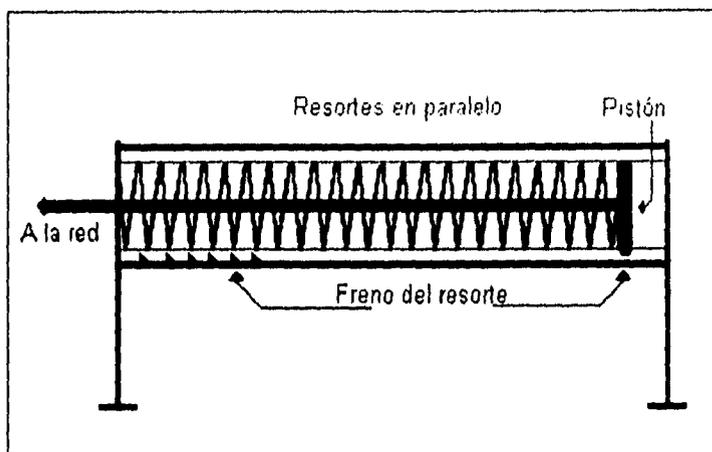


Fig 6.3. Dispositivo de resortes.

A continuación se presenta un diseño del juego de resortes [12]:

El arreglo se forma de siete resortes conectados en paralelo, los cuales al comprimirse 1 m ó 40", tienen una tensión de 15655 N, provocada por los cables que salen de los reductores, por lo que cada resorte soporta 502.58 lbs, el diámetro d del cable utilizado para formar los resortes se calcula con la siguiente fórmula.

$$d = \sqrt{\frac{2.55 \cdot P \cdot D}{S}}$$

donde,

P - carga en lbs.

D - diámetro exterior del resorte en pulgadas

S - esfuerzo permitido (obtenido de tablas)

si: D = 5" y S = 70000 psi,

$$d = 0.45"$$

De los diámetros en disposición se toma el más cercano hacia arriba, (de mayor diámetro que el calculado), así obtenemos el valor final de d .

$$d = 0.4615"$$

con este valor se vuelve a calcular el diámetro exterior D.

$D = 4.999''$, para fines prácticos $D = 5.0''$

El esfuerzo torsional S se define como:

$$S = \frac{P \cdot D}{0.393 \cdot d^3}$$

con los datos antes mencionados obtenemos:

$$S = 67024.61 \text{ lb/in}^2$$

El número de espiras N es:

$$N = \frac{F \cdot G \cdot d^4}{5.58 \cdot P \cdot D^3}$$

donde:

F = es el desplazamiento del resorte en N espiras.

G = es el módulo de elasticidad en torsión en lbs/in^2 .

para el acero ASTM A229, el valor de $G = 11,200,000 \text{ lbs/in}^2$.

$N = 57.96$ ó 58.0 espiras para fines prácticos.

La longitud inicial del resorte es de $66.75''$, mientras que la longitud final del resorte será de $26.75''$.

b) Dispositivo de frenado utilizando una masa variable.

Este dispositivo está basado en el hecho de que los extremos de la red arrastran una cadena, que absorbe la energía del ACR durante la captura. El caso de la masa constante se define en la sección 5.3. A continuación se presenta un esquema del sistema de masa variable.

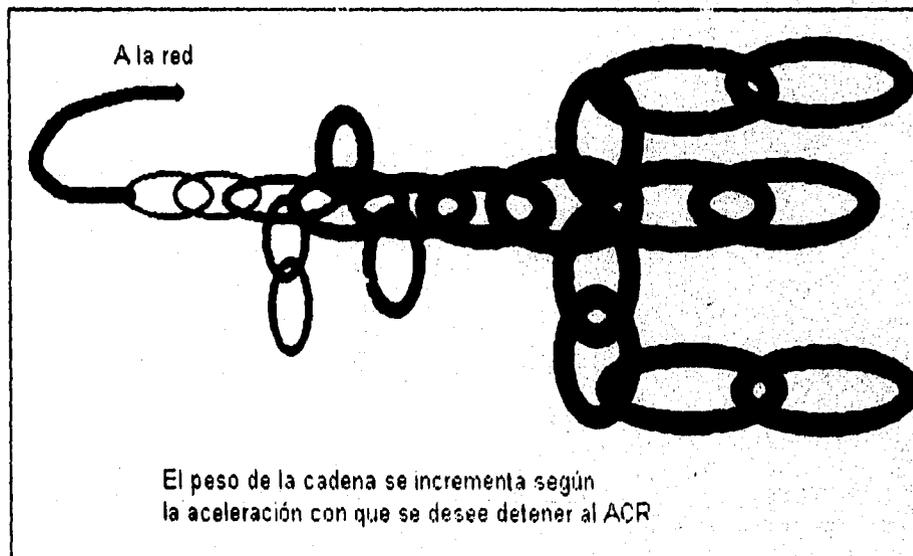


Fig. 6.4. Dispositivo de cadena con masa ρ variable, por unidad de longitud.

En el caso de tener una masa variable que se arrastre por el piso, como se presenta en la figura 6.4, no conviene tener reductor, o bien, tener un reductor que nos eleve la longitud recorrida por la masa, aumentando así su velocidad, teniendo como beneficio una masa menor.

Esta masa variable puede construirse uniendo cadenas de diferentes tamaños y/o ramificando estas para obtener la masa calculada para detener al ACR.

La masa se coloca en el piso tendida, unida a los extremos de la red, ver fig. 6.4. Por medio del juego de poleas se recupera cuerda del lado de la masa, provocando que esta adquiera velocidad y por lo tanto, energía cinética.

Al inicio de la recuperación se mueven únicamente las puntas de las cadenas de longitud total l y masa p por unidad de longitud y al final se tendrá toda la cadena en movimiento.

La masa ρ necesaria para absorber la energía de la misma forma que lo hace el juego de resortes, se calcula con la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 + \rho \cdot g \cdot r$$

$$m_p = \frac{0.5 \cdot k \cdot (0.125 \cdot r)^2}{0.5 \cdot v_r^2 + g \cdot r}$$

A continuación se presenta la masa ρ , que cumple con la ecuación anterior, tabulada junto con r (en este caso r es la cuerda que se le ha dado a los extremos de la red y la cuerda que se ha recuperado del lado de la masa), v_r es la velocidad de los extremos de la red y k la constante de proporcionalidad del resorte, definidos en la sección 5.2.

r (m)	ρ (kg/m)
0.1	0.05
0.93	1.1
1.76	2.94
2.59	5.54
3.42	8.98
4.25	13.50
5.08	19.57
5.91	27.96
6.74	40.26
7.57	60.67
8.4	103.63

c) Dispositivo hidráulico.

Este dispositivo ha sido utilizado en portaaviones [21], se forma por un cilindro que encierra un émbolo o pistón, al cual se le transmite la energía del ACR durante su recorrido de un extremo a otro del cilindro, lo que provoca presión al fluido que se encuentra dentro del cilindro, esta presión bota las válvulas del cilindro, absorbiendo de esta manera la energía del ACR.

Una configuración general de este dispositivo se presenta a continuación.

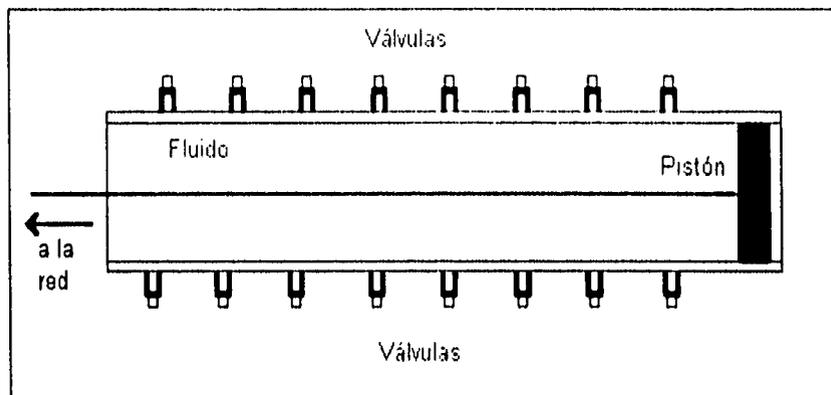


Fig 6.5 Dispositivo hidráulico.

6.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON ELEMENTO FINITO.

El concepto de análisis de elemento finito es tan sencillo como la siguiente definición: una estructura actual (por ejemplo, un ala de avión, puente, una torre de transmisión, etc.) es representada por un modelo matemático. En este modelo, la estructura es reemplazada por un número finito de componentes discretos, que son llamados "elementos". La localización en el espacio de estos elementos se definen por "nodos". Los nodos son puntos definidos en el espacio, que están definidos en un sistema de coordenadas específico. Por ejemplo, la localización de un elemento lineal es definido por dos nodos y un elemento cuadrilátero está definido por cuatro nodos.[22].

Para el cálculo de esfuerzos, fuerzas de reacción, desplazamientos de diferentes partes del sistema, se hicieron programas en NISA.

El listado de los programas se presenta en el apéndice C.

Los resultados de cada programa se utilizan en el programa subsecuente, para tener continuidad en el análisis. De esta forma el análisis comienza encontrando las fuerzas de reacción en los extremos de la red, los cuales serán igual a las fuerzas que actúan sobre los cables guía, que son analizados en el segundo programa, del que se obtienen las fuerzas de reacción en los extremos de los cables, los cuales están unidos a la estructura. Se utilizan estos resultados más las fuerzas de reacción de las poleas que direccionan el cable que se une a los extremos de la red en el tercer programa, donde se analiza los postes verticales de la estructura.

Todos los programas tienen en común las siguientes características:

- **Tipo de Análisis**

Análisis estático no lineal (no linealidad geométrica), con método iterativo Newton-Raphson.

- **Gráfica tiempo - amplitud**

En la gráfica tiempo - amplitud se dan los datos escalados de la aceleración en diferentes tiempos obtenidos en la sección 5.2, ya que la fuerza que ejerce el ACR sobre la red está en función de esta aceleración.

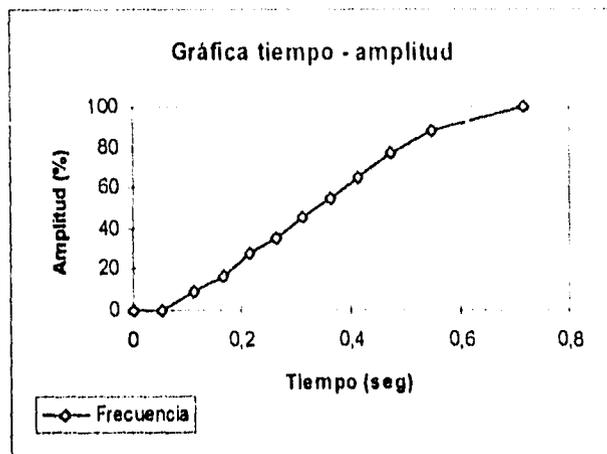


Fig 6.6. Gráfica tiempo - amplitud.

- **Procedimiento de la Solución**

Los problemas se consideran geoméricamente no lineales.

Se usa el método iterativo Newton-Raphson.

Números de Incremento de carga: 7

Número de iteraciones: 40

Tolerancias: 0.0001, 0.0001, 0.0001

6.3.1 Reacciones en los extremos de la red

- **Descripción del Problema**

Para encontrar las reacciones de los extremos de la red, que se distribuyen entre los cables fijos y los cables móviles, la red se simplifica a 4 cables de acero, que representan los extremos de la red. Como los esfuerzos máximos se encuentran en el tiempo final y para facilitar el análisis, la red se supone en la posición final en todo momento, la carga se considera puntual y se incrementa con el tiempo, según la gráfica tiempo - amplitud, antes descrita.

- **Condiciones Iniciales y de Frontera**

La carga que soporta la red se define de la siguiente manera. Para el tiempo inicial $t = 0$ seg, la fuerza F aplicada a la red es $F = 0$ N y para el tiempo final $t = 0.7$ seg, se tiene una fuerza $F = 2240$ N, incrementándose según la gráfica tiempo - amplitud.

Los extremos de la red que están unidos al cable fijo tienen restringido cualquier movimiento.

- **Propiedades**

Material

Geométricas

$E_X = 190$ Gpa

$A_1 = A_2 = 0.003$ m

- **Modelo del Elemento Finito**

La red se forma de nodos como aparecen en la fig. 6.7, con los cuales se definen los elementos.

Los desplazamientos de los nodos 1,2,3 y 4 se restringen totalmente. La fuerza concentrada es aplicada en el nodo central 5, según se muestra en la figura siguiente.

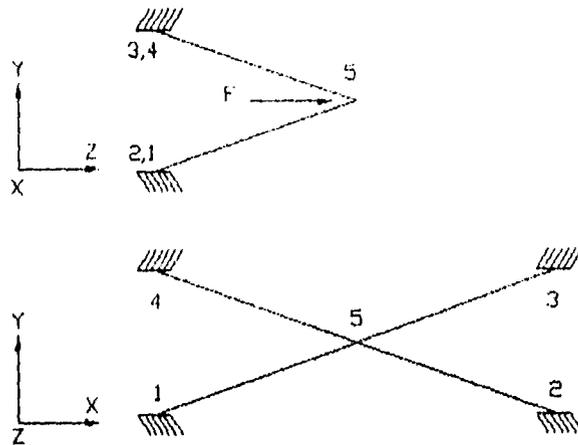


Fig 6.7. Geometría y modelo del elemento finito con condiciones de frontera.

- **Tipo de Elemento**

Elemento cable en 3D (NKTP=45, NORDR=1)

- **Resultados**

Desplazamientos del nodo 5:

Dirección	Eje X	Eje Y	Eje Z	Rot X	Rot Y	Rot Z
Desplazam.	0.0 E+00	0.0 E+00	1.56 E-04	0.0 E+00	0.0 E+00	0.0 E+00

Fuerzas de reacción en el nodo 1, 2, 3 y 4.

Nota: Las fuerzas de reacción varían en signo en los ejes X y Y, según la posición del nodo y la suma de estas reacciones es cero, ya que se contraponen.

Las fuerzas de reacción en el eje Z son siempre positivas y la suma de estas fuerzas es 2240 N, como se esperaba.

Estos resultados pueden comprobarse fácilmente con una sumatoria de fuerza y momentos.

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	7.46 E+02	5.59 E+02	5.60 E+02	0.0 E+00	0.0 E+00	0.0 E+00

- **Conclusiones**

Estos resultados indican que basta un cable de 3 mm, en los extremos de la red para soportar los esfuerzos durante la captura. Los resultados de este programa nos proporciona los datos necesarios para analizar la resistencia de los cables guía.

6.3.2 Análisis de los esfuerzos y desplazamientos de los cables guía

- **Descripción del Problema**

Un cable que se encuentra tendido con desnivel soporta una carga que se incrementa conforme pasa el tiempo, según la gráfica tiempo - amplitud de la fig 6.2.

Se aplica la fuerza cerca del final del cable, ya que es al final de la captura cuando se tienen los esfuerzos más grandes.

En este programa se analizan los cables como si fueran vigas.

Con los resultados de este programa se decide el ancho de los cables guía.

- **Condiciones Iniciales y de Frontera**

La viga se encuentra apoyada en dos puntos fijos y se le aplica una fuerza (la magnitud y sentido de esta fuerza se obtuvo en el programa anterior), desde el tiempo inicial $t = 0$ s, hasta tiempo $t = 0.7$ s, donde se aplica la fuerza máxima, esta fuerza crece según la gráfica tiempo - amplitud de la fig. 6.2.

- **Propiedades**

Material

EX = 190 GPa

GXY = 73 GPa

SY0 = 275 MPa

Sección Transversal de la Viga

TIPO = CIR

D = 0.05 m

- **Modelo del Elemento Finito**

La viga (cable) se tiende con el desnivel de los cables guía superiores.

La viga se forma de nodos y elementos, ver fig 6.8.

Los desplazamientos de los extremos de la viga se restringen totalmente (nodos 1 y 17).

La fuerza concentrada es aplicada en un nodo casi al final del cable (nodo 16), ya que será al final del recorrido de la red cuando los esfuerzos sean mayores.

A continuación se muestra un dibujo del modelo del elemento finito, donde el cable está formado de elementos que se unen en la dirección en la que están ordenados los nodos.

- **Tipo de Elemento**

Elemento viga circular de dos nodos, en 3D (NKTP=39, NORDR=1)

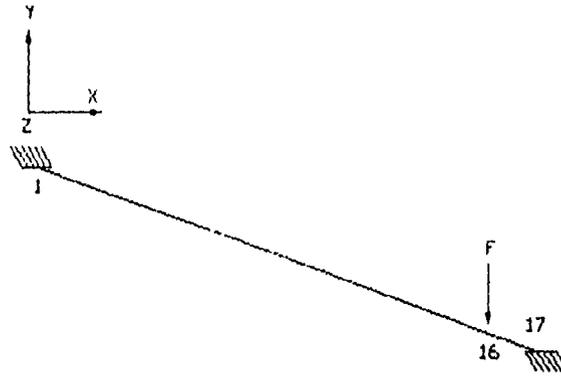


Fig 6.8 Geometría y modelo de elemento finito con condiciones de frontera.

• **Resultados**

A continuación se muestran los máximos desplazamientos de la viga, así como las fuerzas de reacción en los extremos de la viga (nodos 1 y 17), todos estos resultados son para el tiempo final $t = 0.7$ s.

Desplazamientos:

Los máximos desplazamientos están en el Nodo 11:

Dirección	Eje X	Eje Y	Eje Z	Rot X	Rot Y	Rot Z
Desplazam.	-4.53 E-04	-1.32 E-03	1.92 E-03	4.41 E-04	1.28 E-03	9.62 E-04

Fuerzas de reacción del nodo 1:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	-8.99 E+01	3.71 E+01	-8.29 E+00	7.40 E+00	2.15 E+01	1.61 E+01

Fuerzas de reacción en el nodo 17:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	-8.99 E+01	5.15 E+02	-7.28 E+02	-1.11 E+02	-3.23 E+02	-2.42 E+01

De igual manera que en el problema anterior, este problema se puede resolver fácilmente con otro método, pero se optó por este método, para obtener los resultados finales a partir de datos obtenidos con el mismo método.

Conclusiones

Los resultados de este programa indican que el diámetro del acero utilizado está sobrado, para soportar los esfuerzos durante la captura, además proporciona las fuerzas de reacción en los extremos de este, que sirven de datos en el siguiente programa.

6.3.3 Análisis de los Postes de la Estructura

• Descripción del Problema

Se tiene una estructura de 8m de alto, sometida a una carga concentrada en los nodos donde se unen los cables fijos, como se muestra en la fig 6.9. La carga se incrementa según la gráfica de la fig 6.2. Las cargas aplicadas son los resultados del programa anterior, más las fuerzas de reacción de la poleas fijas que se unen a los postes, para dirigir los cables que se unen a los extremos de la red. Estas reacciones se calcularon cuando la tensión en el cable es de 560 N.

Aunque las reacciones más grandes se encuentran en la estructura de 5.50 m de alto, se hicieron los programas con la estructura de 8 m, con el fin de que los resultados sean válidos para ambas estructuras.

• Propiedades

Elemento No. 1	Elemento No. 2	Elemento No. 3
Material		
EX = 190 GPa	EX = 190 GPa	EX = 190 GPa
Sección Transversal de la Viga		
TIPO = LSECT	TIPO = RECT	TIPO = CIR
A = 0.051 m	A = 0.051 m	D = .0254 M
B = 0.051 m	B = 0.0032 m	
T1 = 0.0032 m		
T2 = 0.0032 m		

• Modelo del Elemento Finito

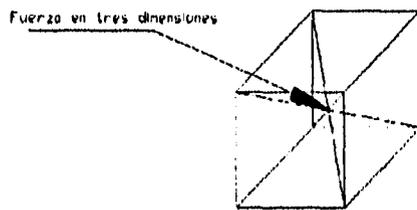
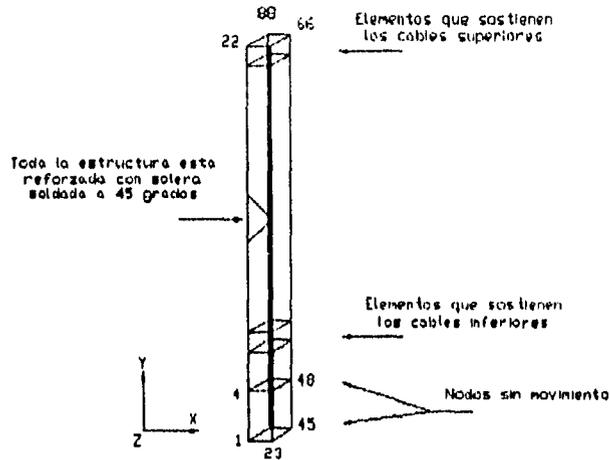
La estructura de los postes se forma de nodos y elementos como aparecen en la fig. 6.9. Los desplazamientos de los nodos inferiores y de los nodos con una altura de 1.14 m se restringen totalmente, ya que estos se unen a una estructura pesada. Las fuerzas concentradas se aplican en los nodos donde se unen los cables guía a la estructura de los postes. Estas fuerzas se incrementan según la gráfica tiempo-amplitud de la fig 6.2.

Las respuestas del problema anterior se aplican en éste teniendo así continuidad en el problema general.

• Condiciones Iniciales y de Frontera

La fuerza se aplica en tres direcciones en los elementos que sostienen los cables fijos, según los resultados del programa anterior, (fuerzas de reacción del nodo 17 del problema 6.3.2), estas fuerzas se incrementan con la misma curva tiempo-amplitud que los demás programas mostrados anteriormente. La fuerza final aplicada corresponde a los valores de las fuerzas de reacción del programa anterior más las fuerzas de reacción de las poleas unidas a la estructura con una tensión de 560 N, que se aplican debido a la tensión causada por los resortes en el tiempo final.

Tipo de Elemento
Elemento viga en 3



Hoy un elemento por cada esquina, que se une a los demas en el punto central de la estructura

Fig 6.4 geometría y modelo de elemento finito con condiciones de frontera.

• Resultados

Esfuerzos mínimos/máximos de los elementos:

Dirección	Axial X	Cortante Y	Cortante Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
Esf. Mín.	1.04 E+04	-1.18 E+02	-2.57 E+02	-1.65 E+01	-2.48 E+01	-4.73 E+01
Ele. No.	46	194	189	193	67	194
Esf. Máx	1.04 E+04	1.18 E+02	2.57 E+02	1.65 E+01	7.66 E+01	4.38 E+01
Ele. No.	46	194	189	193	189	184

Fuerzas de reacción del nodo 1:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	9.97 E-11	-4.31 E-10	9.32 E-11	-1.22 E-13	-1.12 E-14	7.83 E-14

Fuerzas de reacción del nodo 4:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	3.10 E+00	9.62 E+03	1.24 E+01	4.62 E+00	1.27 E+01	4.62 E+00

Fuerzas de Reacción del Nodo 23:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	-9.08 E-13	5.39 E-10	1.62 E-12	1.17 E-13	-6.88 E-15	-1.17 E-13

Fuerzas de Reacción del Nodo 26:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	-8.22 E+02	8.18 E+03	8.67 E+02	7.31 E+00	8.01 E+00	-6.08 E+00

Fuerzas de Reacción del Nodo 45:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	4.16 E-10	3.52 E-10	4.18 E-10	1.40 E-13	-2.81 E-14	6.12E-13

Fuerzas de Reacción del Nodo 48:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	2.95 E+01	-1.04 E+04	2.42 E+01	3.08 E+00	8.40 E-01	3.08 E+00

Fuerzas de Reacción del Nodo 67:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	2.36 E-12	5.39 E-10	-1.57 E-12	-7.57 E-14	4.27 E-15	7.57 E-14

Fuerzas de Reacción del Nodo 70:

Dirección	Fuerza X	Fuerza Y	Fuerza Z	Momento X	Momento Y	Momento Z
F. reacción	-1.86 E+03	-7.35 E+03	-1.05 E+03	-1.67 E+01	6.83 E+00	1.77 E+01

Máximos Desplazamientos:

Dirección	Eje X	Eje Y	Eje Z	Rot X	Rot Y	Rot Z
Desplazam.	9.15 E-03	-5.42 E-04	1.35 E-03	1.66 E-03	2.13 E-03	-1.96 E-03
Nodo	88	22	66	89	89	87

• Conclusiones

Las dimensiones que proporcionan los programas de elemento finito de la estructura, serán tomados como medidas usadas en el sistema, ya que los resultados son satisfactorios. En el programa se analiza el poste más alto, aún cuando es el poste menor es el que soporta los mayores esfuerzos, por lo que las medidas son válidas para los cuatro postes.

CAPÍTULO 7

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE TRANSFERENCIA DE CARGA Y MOVIMIENTO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN.

7.1 INTRODUCCIÓN

El sistema total de recuperación de la aeronave está constituido de una estructura principal, una red, los cables guía, un dispositivo de frenado y los dispositivos de transferencia de movimiento y carga. Estos últimos son las poleas que guían y cambian la dirección de los cables, los cables mismos que interconectan el sistema, los reductores de desplazamiento para disminuir la longitud del sistema de frenado y la transmisión; que se encarga de que el movimiento del sistema de frenado sea igual para las cuatro esquinas de la red.

Para el diseño de estos dispositivos se toman en cuenta los tipos de carga a que están sujetos, así como su material de manufactura y dimensiones de piezas que son comercialmente adquiribles; como en el caso de las flechas y los baleros. Junto con estos elementos, se calculan las cuñas para las bridas de los reductores y de la transmisión, así como otros componentes. También se obtienen los diagramas de momento flexionante y torsión que presentan las flechas. Se comentan los criterios de diseño empleados como son la teoría de falla de materiales y el factor de seguridad.

En la figura 7.1 se muestran los dispositivos de transferencia de carga y movimiento.

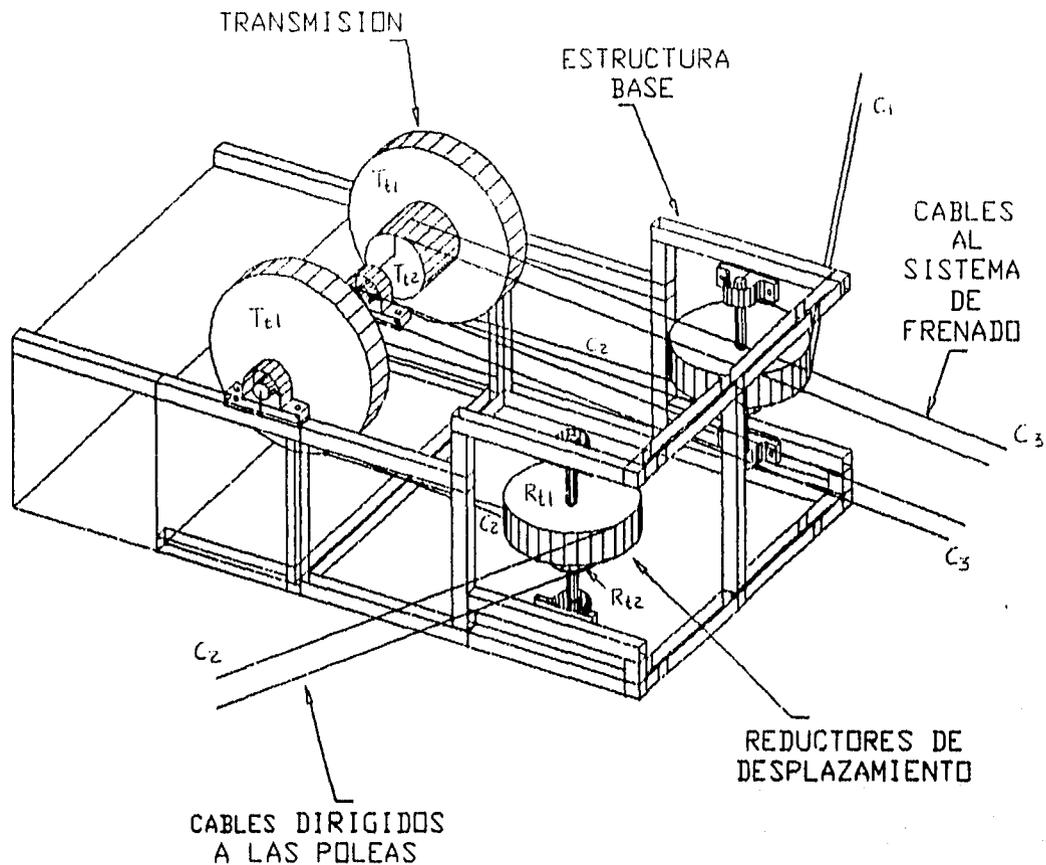


Fig 7.1 Dispositivos de transmisión de carga y movimiento.

7.2 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO

Los parámetros que se toman en cuenta para la recuperación del ACR son las siguientes:

1. Velocidad del ACR	De 16.67 a 22.22 m/s. (60 a 80 km/hr)
2. Distancia de recuperación	De 6 a 8.4 m.
3. Tiempo de recuperación	0.54 a 1 seg.
4. Cargas sobre el sistema	Casi instantáneas.

Las características 1, 2 y 3 se obtienen de los resultados del modelado dinámico del capítulo 5. Las cargas sobre el sistema son prácticamente instantáneas dado que el tiempo de recuperación es de 0.7 seg. La distancia de recuperación que se toma en cuenta para el diseño es de 8.4 m. Para diseñar cada pieza se describe a continuación el criterio de falla a seguir y los factores de seguridad empleados.

Criterios de falla para los materiales.

Las teorías mas importantes para evaluar la falla de los materiales dúctiles son:

Teoría del esfuerzo normal máximo, [13].
Teoría del esfuerzo cortante máximo (Tresca), y
Teoría de la energía de distorsión máxima (Von Mises, un solo parámetro, 1913)

El criterio de energía de distorsión predice con mejor precisión la falla de materiales dúctiles, por lo que se usa este criterio para el análisis mecánico de este proyecto con la relación siguiente:

$$S_{sy} = 0.577S_y.$$

Factores de seguridad

El factor de seguridad f.s. es usado en Ingeniería de diseño para considerar las incertidumbres que puedan ocurrir cuando las cargas reales actúen sobre un elemento. Este factor se define como:

$$n = \frac{S}{\sigma}$$

S es la resistencia del material que se quiere evaluar. En este trabajo S es el valor de la resistencia a la fluencia del material a tensión S_y y el valor de la resistencia a la fluencia por cortante S_{sy} . σ es el esfuerzo calculado que se obtiene de cada pieza.

Para las poleas, reductores y flechas se tiene un factor de seguridad mínimo de 2 ya que las cargas se consideran por impacto [17]. El factor se aproxima a 2 aunque en ocasiones queda por encima para normalizar algunas piezas.

En el caso de los cables, el factor de seguridad se obtiene de tablas [13], donde se dan valores mínimos dependiendo de la aplicación y de la velocidad de trabajo. Se seleccionó un valor de 12, para cumplir con la condición de la velocidad a la que trabaja el sistema de frenado y el riesgo que implica el ACR en sí y sus demás sistemas de funcionamiento.

Para los tornillos el factor es aproximadamente de 4 como mínimo.

7.3 SELECCIÓN DE LOS CABLES

Los cables son elementos flexibles que conectan las esquinas de la red con los reductores de desplazamiento y pasan por poleas que cambian su dirección. Luego se conectan a los reductores con la transmisión y finalmente la transmisión con el sistema de frenado (ver fig 7.1). Para seleccionar el diámetro adecuado se calcula la tensión máxima a la cual estarán sujetos durante la recuperación. Mediante los cálculos del modelo cinemática, se obtienen las siguientes tensiones:

Tensión en el cable 1:	$T_{C1} = 490.4$	N
Tensión en el cable 2:	$T_{C2} = 1471.3$	"
Tensión en el cable 3:	$T_{C3} = 7827.3$	"

Por consideración práctica no se usan cables de diámetro menor a 6.35 mm (1/4"). En la tabla 7.1 se da la relación de la resistencia última a la tensión de los cables seleccionados y su factor de seguridad. Se usan dos cables para soportar la tensión T_{C3} , esto quiere decir que se divide la tensión entre dos para obtener el f.s.

Cable	No. de cables	Calibre (mm)	Resistencia última (N)	n
C_1	1	6.35 (1/4")	20957.73	42.7
C_2	1	6.35 (1/4")	20957.73	14.24
C_3	2	9.53 (3/8")	46731.27	12

Tabla 7.1 Características de los cables

7.4 DISEÑO DE LOS REDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO Y DE LA TRANSMISIÓN

Los tambores son cilindros huecos colocados en pares (ver fig 7.1); uno de diámetro mayor al otro para reducir el desplazamiento. El objetivo de la reducción es disminuir la distancia que recorre el sistema de frenado a ≈ 1 m, cuando el ACR se detiene en los ocho metros. La reducción de desplazamiento en los reductores es de 3 a 1. En los tambores de la transmisión es de 2.67 a 1. Para conocer el diámetro de los tambores se incluye, la relación de reducción y el diámetro mínimo en el que se puede enrollar el cable para que no presente deformaciones permanentes. La relación esta dada por:

para 6.35 mm	$Dt=21 dc$
para 9.53 mm	$Dt=21.25 dc$

donde Dt es el diámetro mínimo del tambor, dc es el diámetro del cable y el factor que multiplica se obtiene por tablas [13].

El ancho de cada tambor se conoce con: el número de vueltas que se enrolla el cable, mas dos espiras muertas que refuerzan la fijación del cable, mas un espacio vacío igual al que ocupan todos los anteriores. El número de vueltas se obtiene con la distancia que recorre el cable y con el perímetro del tambor. La tabla 7.2 muestra las características de los tambores. El No. de vueltas de cable enrollado incluye las dos vueltas de seguridad. El No. de vueltas del tambor Ta_{2r} de la transmisión es la suma de los dos cables que forman C_3 . Si al tambor de diámetro menor llegara solo un cable tendría que ser casi el doble del calibre y el diámetro se incrementaría considerablemente aumentando el peso de la pieza.

Tambor	Diámetro Dt (m)	No. de vueltas de cable enrollado	Ancho del tambor (m)
Reductor R_{11}	0.42	16	0.15
Reductor R_{12}	0.14	16	0.15
Transmisión T_{11}	0.56	4	0.1
Transmisión T_{12}	0.21	4	0.2

Tabla 7.2

El espesor de los tambores depende de la presión que ejercen los cables sobre de él. La presión p_t se obtiene con la siguiente formula:

$$p_t = \frac{2TC}{dcDt} \cdot N$$

N es el número de cables sobre el tambor.

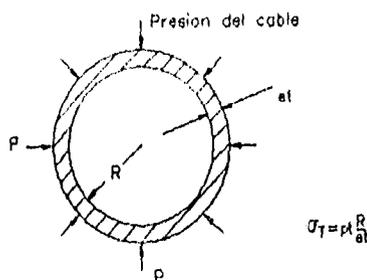


Fig 7.2.Corte de un tambor.

En la fig 7.2 se ve un corte del tambor. Para calcular el esfuerzo a tensión al que está sujeto el material se multiplica la presión p_t por la relación R/et . Se proponen diversos valores de et hasta que el f.s. sea de dos o cercano a él. Los espesores y materiales para cada tambor se ven en la tabla 7.3.

Tambor	Espesor (mm)	Material Sy en (MPa)	Esfuerzo a tensión (Mpa)	n
Reductor R_{11}	4	Tubo con costura, acero 1035 CD. Sy=461.6	227.3	2.0
Reductor R_{12}	10	Tubo sin costura, acero 1040 CD. Sy=489.19	278	2.1
Transmisión T_{11}	4	Tubo con costura, acero 1035 CD. Sy=461.6	228.39	2
Transmisión T_{12}	11	Tubo sin costura, acero 1040 CD. Sy=489.19	233.95	2.1

Tabla 7.3 Espesor de tambores

7.5 EJES DE LAS POLEAS, REDUCTOR Y TRANSMISIÓN.

Las poleas y los tambores están soportados por ejes a los cuales transmiten su movimiento. Los ejes de transmisión son elementos cilíndricos y están sometidos a cargas de flexión, compresión, torsión y cargas combinadas. Para su diseño se determinan las cargas y momentos causados por la tensión de los cables y el peso de los tambores. Se considera que todas las cargas máximas se aplican en un mismo tiempo. Se calcula el esfuerzo S_y con varios diámetros hasta que cumpla con el f.s. La ecuación que determina S_y y que involucra la energía de distorsión en el elemento sometido a torsión es la siguiente:

$$S_y = \frac{32nkIDe}{(De^4 - Di^4)\pi} \sqrt{Mx^2 + My^2 + \frac{3}{4}T^2} \quad \text{donde:}$$

M es el momento flexionante, T el momento por torsión, De es el diámetro exterior y Di el diámetro interior. Si el eje es sólido, Di vale cero. kt es el factor de concentración de esfuerzos. Se calculan dos factores; uno, debido a la reducción del diámetro para introducir los baleros, y otro debido a los canales que se maquinan para poner cuñas que transmiten la potencia. El valor máximo se toma como kt.

Ejes de las poleas, reductor y transmisión.

Los ejes de las poleas están fijos a los postes verticales. En la fig 7.3 se muestra un eje bajo carga y el diagrama de momento flexionante. La tensión del cable T_{C1} es un sistema fuerza-par aplicado en el centro de la sección del eje correspondiente a la polea. El cálculo se lleva a cabo con dos poleas. Las poleas inferiores giran sobre un mismo eje y tienen un ángulo de 27 grados con respecto al eje Z.

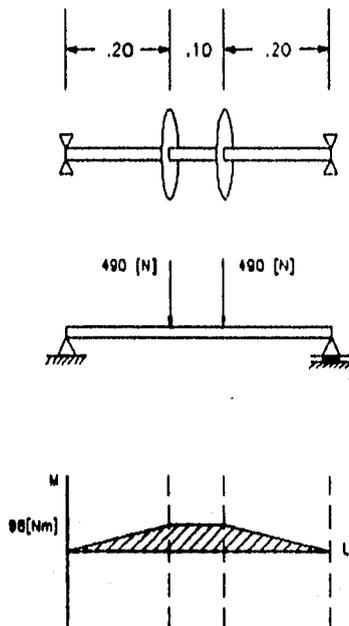


Fig 7.3 Diagrama de momentos de la polea.

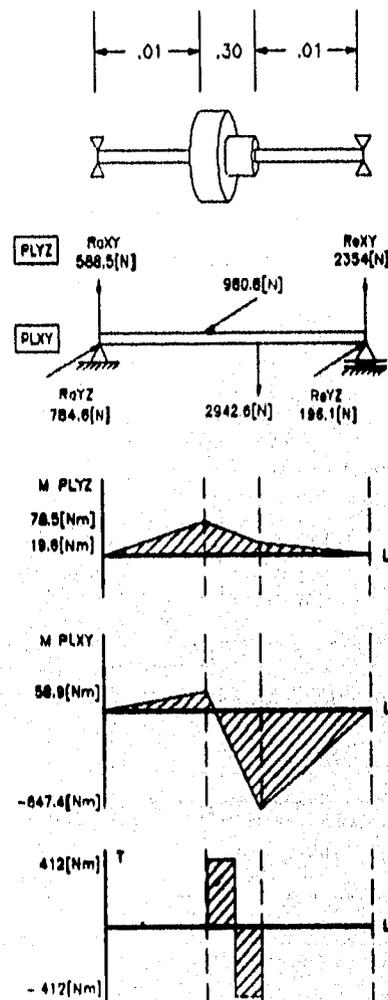


Fig 7.4. Diagrama de momentos en el plano Y-Z, en el plano X-Y y diagrama de torsión.

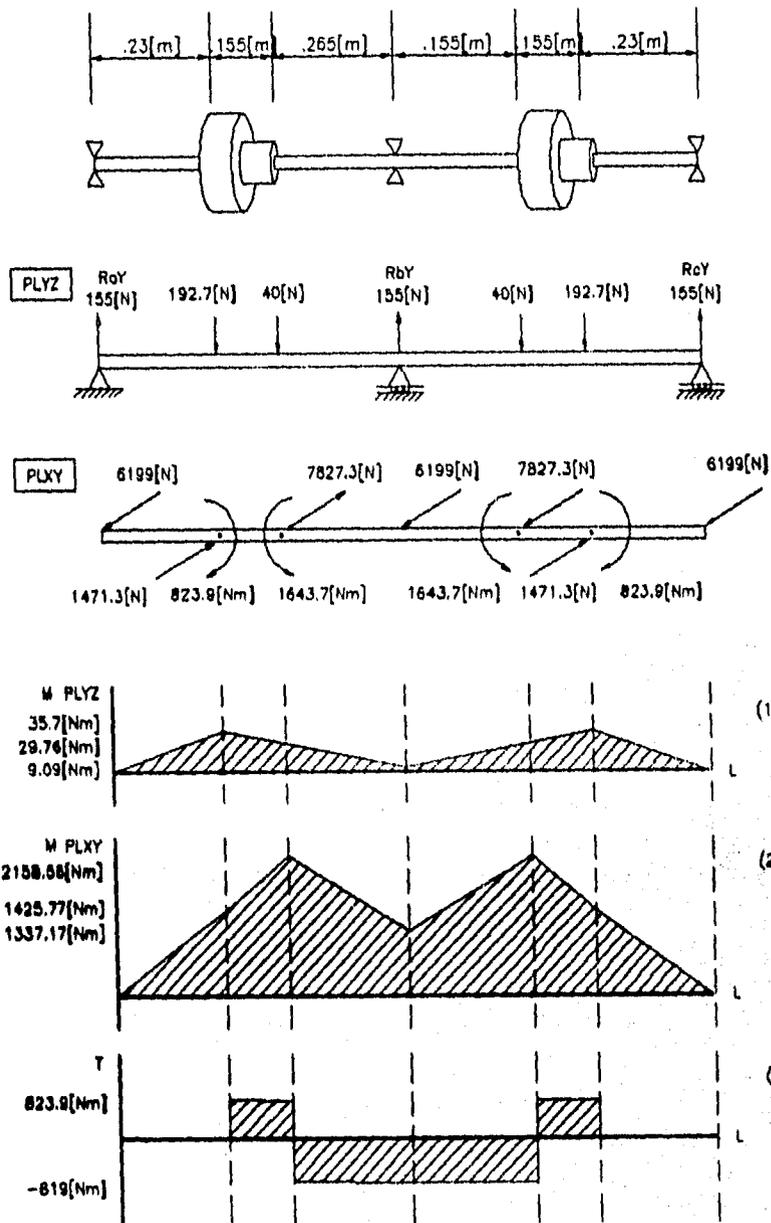


Fig 7.5. Diagramas del eje de la transmisión. (1) Diagrama de momentos en el plano Y-Z. (2) Diagrama de momentos en el plano X-Y. (3) Diagrama de Torsión.

El eje de los reductores gira sobre chumaceras colocadas en sus extremos. En la fig 7.4 se muestra el eje con sus respectivas fuerzas y momentos aplicados en cada sección con los diagramas de momento flexionante. Existe torsión entre los dos puntos de apoyo del reductor.

El eje de la transmisión está sujeto a las cargas de mayor valor del sistema. Se le llama de transmisión porque en él convergen los cuatro cables que vienen de las esquinas de la red; es el punto común para ellos y al girar jala los cuatro cables que van al sistema de frenado. La transmisión esta compuesta por cuatro tambores, dos de 0.56m de diámetro y dos de 0.21m que disminuyen el desplazamiento del cable. En la fig 7.5 muestra los diagramas respectivos.

Dimensiones mínimas de los ejes

El eje de las poleas y del reductor son sólidos mientras que el eje de la transmisión es hueco. La flecha hueca se elige así para ahorrar peso al sistema haciéndolo más versátil. Esto es posible porque los esfuerzos cortantes máximos se concentran en el diámetro exterior y los esfuerzos cortantes mínimos en el centro. En la tabla 7.4 se dan los resultado:

Eje	Longitud [m]	De [m]	Di [m]	Masa [kg]	kt	n
Poleas	0.50	0.02	0	1.20	2.0	2.1
Reductor	0.50	0.040	0	5	2.4	2.2
Transmisión	1.30	0.055	0.02	20	2.4	2.0

Tabla 7.4 Dimensiones mínimas de los ejes

7.6 BALEROS PARA LOS EJES

La tabla 7.5 muestra las dimensiones de los baleros a usar. Se debe notar que en el plano de detalle se proponen dimensiones de chumaceras de acuerdo con la referencia [18]. Pero su tamaño puede variar dependiendo del fabricante. La capacidad máxima de carga sobre el balero se obtiene con las ecuaciones:

$$F_e = XVFr \quad \text{o} \quad F_e = XVFr + YFa$$

Ambas ecuaciones se calculan y se escoge el valor de F_e de la ecuación cuyo resultado sea mayor. X y Y son factores que dependen del movimiento de la flecha ya que puede ser fija o móvil. Fr es la carga radial sobre el balero y Fa es la carga axial, para las poleas $V= 1.2$ y para el reductor y trasmision $V=1$. Los factores se obtienen de tablas de la referencia [13] para baleros rígidos de bolas.

Balero de:	X,Y	DE (mm)	DI (mm)	Ancho (mm)	Radio filete (mm)
Poleas	1,0	42	20	12	1
Reductor	1,0	68	40	9	0.5
Transmisión					
B1	0.5,1.4	90	55	18	2
B2	0.5,1.4	95	60	18	2

Tabla 7.5 Baleros de los ejes

7.7 CUÑAS DE LOS EJES

El tamaño de las cuñas de los ejes se puede consultar en tablas [19]. Para el eje del reductor la cuña es de 3/8" sq. La longitud se define como: $L_{cr} = 1.5D_e$. Entonces $L_{cr} = 63$ mm ya que el diámetro de la sección donde se coloca es de 47mm. Para el eje de la transmisión la cuña es de 1/2" sq., y su longitud es $L_{ct} = 82.5$ mm. Se colocan dos cuñas por cada par de tambores. Por consideración práctica, el espesor mínimo de la brida en el punto donde transmite el movimiento a la cuña es el grueso de la cuña. Ver planos en el apéndice.

7.8 TORNILLOS PARA BRIDAS Y CHUMACERAS.

Los tornillos para las bridas están sujetos a esfuerzo cortante durante la captura del ACR. Sobre ellos actúan dos tipos de fuerza. La carga directa o cortante primario y la fuerza cortante secundaria que depende del momento y la distancia r al centroide de todos los tornillos [13]. Ambas se definen a continuación:

$$F' = \frac{V}{nt} \qquad F'' = \frac{Mt}{4rt}$$

Para el cálculo se toma en cuenta que rt es la distancia de cada tornillo al centroide, en este caso, el centro de giro es el eje. Entonces, Mt es el momento generado por la fuerza que actúa sobre el tambor. La fuerza primaria es solamente la fuerza que actúa entre el número nt de tornillos. La fuerza primaria y secundaria se suman y se dividen entre el área de la sección del tornillo que está sometida a cortante para calcular el esfuerzo. El área se obtiene con el diámetro medio del tornillo.

En el caso de las chumaceras, los esfuerzos de tensión y cortante se calculan con la fuerza con la que tiran los cables. También se toma en cuenta la fuerza que provoca el momento de giro de toda la pieza. El momento se define como el producto del momento de inercia del reductor o la transmisión por su aceleración angular respectiva. La fuerza provocada por este momento se encuentra con la distancia del centro del eje al centro del tornillo de la chumacera:

$$M_{giro} = (I_{pieza})(\alpha_{pieza}) \qquad F_{giro} = \frac{M_{giro}}{dist}$$

El momento de inercia para los tambores, las bridas y la flecha hueca es:

$$I = \frac{m}{8} (D^2 + d^2)$$

y para los discos:

$$I = \frac{md^2}{8}$$

La tabla 7.6 contiene los valores calculados para el reductor y la transmisión:

	Momento de inercia (kg m ²)	Aceleración angular (rad/s ²)
Reductor	0.237	357
Transmisión	0.105	127.4

Tabla 7.6 Momentos de inercia y aceleración angular del reductor y la transmisión.

El reductor tiene dos chumaceras, osea, cuatro tornillos en total, y la transmisión tiene tres chumaceras, osea, seis tornillos en total. En la fig 7.5 se muestran las fuerzas que actúan sobre un tornillo de cada chumacera debidas a la tensión de los cables, al momento de giro y al peso, en el caso del reductor.

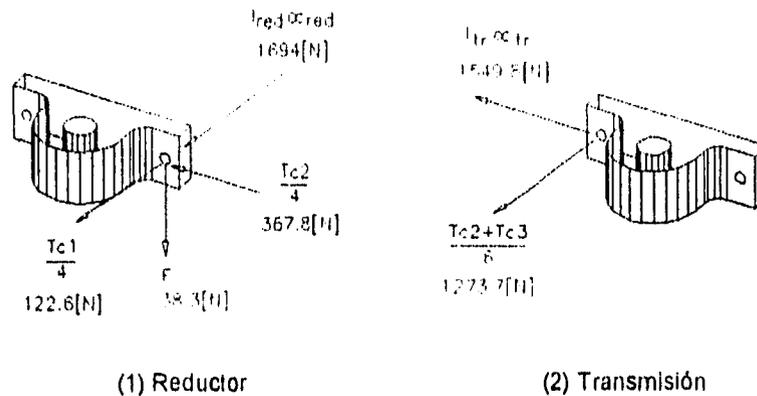


Fig 7.5. Fuerzas sobre las chumaceras.

Para todos los tornillos el material se toma como acero 1020 templado con $S_y=964.6$ (Mpa). El esfuerzo cortante es $S_{sy}=.577S_y$, entonces $S_{sy}=556.6$ (Mpa). La tabla 7.6 muestra el número de tornillos y el diámetro para las bridas y las chumaceras.

	No. de tornillos y diámetro	Esfuerzo máximo cortante (Mpa)	n
Bride reductor (tambor R_{11})	8 de 5/16"	139.4	4.1
Bride reductor (tambor R_{12})	6 de 5/16"	117.9	4.7
Bride transmisión (ambos tambores)	6 de 5/16"	111.3	5
Chumacera del reductor	2 de 1/2" en cada chumacera	51.23	10.8
Chumacera de la transmisión	2 de 5/8" en cada chumacera	64.83	8.8

Tabla 7.6 Diámetros de tornillos

Para las chumaceras el diámetro mínimo del tornillo puede ser de 3/8", sin embargo, para que el diámetro sea congruente con el barreno de la pieza recomendada, el diámetro de los tornillos se escoge de 1/2" para el reductor y para la transmisión de 5/8". Para escoger las chumaceras se debe tomar en cuenta las dimensiones de los baleros propuestas en la tabla 7.5., sobre todo el diámetro interior que se debe respetar.

La base de las chumaceras se debe calzar de tal forma que los ejes no queden desalineados para que no exista pandeo y se originen esfuerzos extras por fatiga. Se debe tener especial cuidado en alinear el eje de la transmisión, ya que está soportado por tres baleros.

7.9 ENSAMBLE DE LOS TAMBORES

La fig 7.6 muestra el ensamble de los tambores, las bridas y los discos de los tambores:

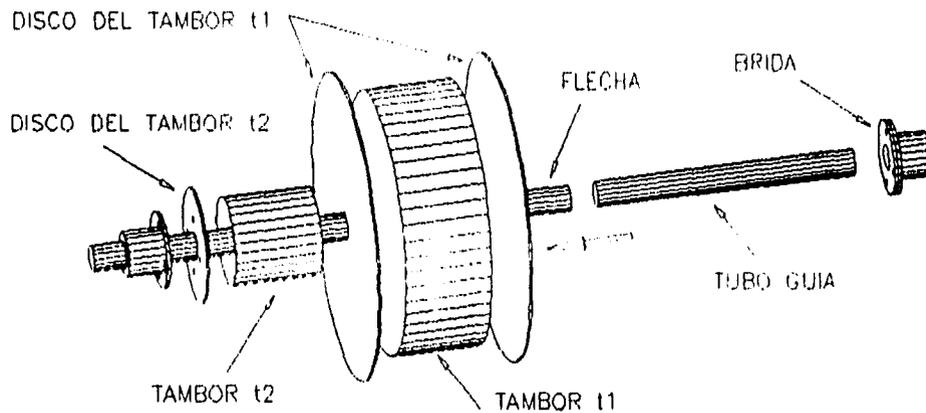


Fig 7.6. Ensamble de los tambores.

Los discos que se muestran en la fig 7.6 son de acero 1040 cold rolled de 4mm de espesor y tienen agujeros para reducir el peso. El tubo guía también es del mismo material y sus diámetros varían según la pieza. Para el armado, se une previamente a 90 grados un disco con el tubo guía mediante cuatro puntos de soldadura. Luego, se sueldan consecutivamente: un tambor, un disco, el otro tambor y el otro disco entre sí, con un cordón de soldadura que corre por toda la circunferencia de cada tambor en la unión con el disco. Entonces, se introduce la flecha por el tubo guía. Las bridas se unen con los tornillos al disco, habiendo insertado antes las cuñas. Finalmente, se colocan las chumaceras que irán atornilladas a la estructura. El detalle de las piezas se puede ver en el apéndice C al final del presente trabajo.

7.10 CONCLUSIÓN

Se han diseñado los diferentes dispositivos de transferencia de carga. Se toman en cuenta los tipos de carga a que están sujetos, así como su material de manufactura y dimensiones de piezas que son comercialmente adquiribles; como en el caso de las flechas y los baleros. Junto con estos elementos, se calculan las cuñas de las flechas de los reductores y la transmisión y los tornillos de bridas y chumaceras. También se obtienen los diagramas de momento flexionante y torsión que presentan las flechas, así como sus factores de seguridad.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo corresponde al diseño básico de un **Sistema de Recuperación** para aeronaves teledirigidas de bajo peso con ciertas especificaciones básicas. El escrito se divide en tres partes a saber:

- 1º. búsqueda bibliográfica del tema,
- 2º. modelados dinámicos y
- 3º. diseño básico.

En la primera parte se relacionaron diferentes características de las aeronaves tales como tamaño, peso y sistema de captura entre otras, elaborando diferentes tablas y gráficas con el fin de conocer y comparar sus configuraciones y cualidades, además se hizo una clasificación de las aeronaves en función de sus sistemas de recuperación. Posteriormente se seleccionaron las aeronaves con las características similares al proyecto a desarrollar. Este estudio llevó a la elección del sistema de captura óptimo: **el sistema de captura por red.**

Dicho sistema cumple con las siguientes especificaciones:

- no usa pistas de aterrizaje,
- la captura se realiza sin dañar a la aeronave ,
- es portátil,
- no sobrepasa los -5 g de aceleración en la captura.

En la segunda parte se realizó el modelado dinámico de dos métodos de captura por red a saber:

- a) en el primer método; la aeronave, una vez semicircunscrita por la red es forzada a seguir una trayectoria establecida para detenerse con la ayuda de dos sistemas: el de cables y el de frenado. Este último puede ser un sistema absorbedor de energía, como son los resortes, cilindros neumáticos, una masa variable etc.
- b) en el segundo método; es un procedimiento convencional donde inicialmente se asegura que la aeronave después de haber parado su motor siga un movimiento uniformemente desacelerado en la

dirección horizontal (con un ángulo de descenso pequeño), así la aeronave una vez semicircunscrita por la red es frenada por cuatro lastres acoplados mediante un reductor de desplazamiento a las puntas de la red.

Ambos modelos se explican y se evalúan en el capítulo 5. Se concluye que el método más adecuado para frenar la aeronave es una combinación de ambos métodos es decir: asegurarse que la aeronave sigue una trayectoria horizontal antes de su captura, forzarla a seguir una trayectoria mediante cables y frenarla con cuatro lastres de masa fija o variable acoplados a las puntas de la red por medio de un reductor de desplazamiento. A este sistema le llamamos: "red guiada por cables fijos".

La propuesta anterior es una idea original que nace por la metodología que se siguió al abordar este problema. Por último, el diseño básico del sistema de red guiada por cables fijos incluye varios subsistemas:

- la estructura de apoyo ó estructura base,
- los cables guía,
- la red,
- la reducción de desplazamiento,
- el lastre de frenado y
- los dispositivos de acoplamiento, unión y seguridad.

El diseño de estas partes se llevó a cabo en forma general, se elaboraron los diferentes planos para su manufactura que incluyen la selección del material, el análisis de esfuerzos y de deformación, los factores de seguridad que se tienen en cada pieza y también se dan los detalles para el acoplamiento de cada subsistema, así de esta manera este sistema tiene las siguientes características y ventajas:

- la trayectoria de captura es guiada por cables,
- el tiempo de frenado está en el intervalo de 0.7 a 1 segundo,
- se calcula que el tiempo de montaje en campo es de alrededor de un día,
- el mantenimiento preventivo que se espera es mínimo,
- el costo de producción es bajo, ya que se diseñó con materiales disponibles en el mercado nacional y
- además se puede adaptar a diferentes sistemas de frenado si se requiere.

Se recomienda hacer un modelo a escala y probarlo con diferentes cargas que simulen el peso y velocidad de la aeronave, para:

- evaluar si los diferentes elementos del sistema cumplen con lo calculado estructuralmente y si su tiempo de respuesta es el adecuado,
- corregir los detalles de acoplamiento que siempre surgen en el primer prototipo,
- calibrar la tensión de los cables guía,
- rediseñar aquellos elementos que no presenten un funcionamiento adecuado y
- probar nuevamente hasta obtener el prototipo adecuado para una misión real.

Una vez teniendo el prototipo adecuado, manufacturar el prototipo a escala real con las correcciones pertinentes y al escalarlo tener en cuenta las siguientes reglas:

- a) identificar las piezas con marcas para tener un ensamblado correcto y eficiente,
- b) llevar a cabo pruebas de funcionamiento de los diferentes elementos de cada sistema,
- c) proteger las diferentes piezas contra la corrosión (con recubrimientos especiales o pintura anticorrosiva),
- d) hacer pruebas con cargas que simulen la aeronave y corregir detalles o calibrar si es necesario,
- e) hacer pruebas con una aeronave con carga muerta, y
- f) finalmente se obtendrá el prototipo de un sistema de recuperación guiado por cables totalmente eficiente.

$$l1 = 6$$

El punto final de los extremos inferiores de la red es (XIf, YIf).
El punto final de los extremos superiores de la red es (XSf, YSf).

$$\begin{aligned} XIf &:= 8 & XSf &:= 8 \\ YIf &:= -0.25 & YSf &:= 0.25 \end{aligned}$$

La distancia l2 al final para el recorrido máximo es:

$$l2 := \left[(XIf - XSf)^2 + (YIf - YSf)^2 \right]^{0.5}, \text{ evaluando tenemos que:}$$

$$l2 = 0.5$$

Sean a y b las distancias proyectadas sobre el eje X de los extremos superiores y los extremos inferiores de la red al inicio y al final de la recuperación respectivamente, por lo que:

$$\begin{aligned} a &:= 0 \\ b &:= 0 \end{aligned}$$

D es la distancia máxima que recorren los extremos de la red sobre los cables guías,

$$D := 8.38$$

r es la distancia que recorre cada extremo de la red en un momento dado.

$$r := 0.1, 0.93 \dots 8.4$$

L es la proyección de l1 (altura de la red inicial sobre el eje Y).

$$L := \left[l1^2 - a^2 \right]^{0.5}$$

$$L = 6$$

ro y a0 son la mitad de las dimensiones de la red (altura y ancho) respectivamente.

$$\begin{aligned} r0 &:= 3 \\ a0 &:= 4 \end{aligned}$$

E es la altura máxima que suben los cables inferiores.

F es la altura máxima que bajan los cables superiores.

$$\begin{aligned} E &:= 2.75 \\ F &:= 2.75 \end{aligned}$$

l3 es la proyección de l2 sobre el eje Y.

$$\begin{aligned} l3 &:= L - (E + F) \\ l3 &= 0.5 \end{aligned}$$

Sea:

A1 el seno del ángulo formado por la horizontal y los cables inferiores.
A2 el coseno del ángulo formado por la horizontal y los cables inferiores.
Ts el seno del ángulo formado por la horizontal y los cables superiores.
T2 el coseno del ángulo formado por la horizontal y los cables superiores.

Así que:

$$A1 := \frac{E}{D}, \quad A2 := \frac{\left[D^2 - E^2 \right]^{0.5}}{D}, \quad T1 := \frac{F}{D}, \quad T2 := \frac{\left[D^2 - F^2 \right]^{0.5}}{D},$$

calculando:

$$A1 = 0.328, \quad T1 = 0.328, \\ A2 = 0.945, \quad T2 = 0.945$$

La puntos $(X_I(r), Y_I(r))$, $(X_S(r), Y_S(r))$ de los extremos inferiores y superiores en función del desplazamiento r de la cuerda unida a los extremos de la red, se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$X_I(r) := -0.5 \cdot a + r \cdot A2, \quad X_S(r) := 0.5 \cdot a + r \cdot T2, \\ Y_I(r) := -0.5 \cdot L + r \cdot A1, \quad Y_S(r) := 0.5 \cdot L - r \cdot T1$$

El punto medio PM entre los extremos inferiores y superiores de la red, se obtiene con las siguientes ecuaciones.

$$X_M(r) := \frac{X_I(r) + X_S(r)}{2}, \quad Y_M(r) := \frac{Y_I(r) + Y_S(r)}{2}$$

Para encontrar la distancia d entre el ACR y el PM, se encuentra la distancia LI, entre los extremos de la red superiores e inferiores de la red.

$$LI(r) := \left[(X_I(r) - X_S(r))^2 + (Y_I(r) - Y_S(r))^2 \right]^{0.5}$$

$$d(r) := \left[r^2 - (0.5 \cdot LI(r))^2 \right]^{0.5}$$

Donde la pendiente de d es:

$$md(r) := \frac{a + r \cdot (T2 - A2)}{r \cdot (A1 + T1) - L}$$

El ángulo de inclinación $Q(r)$ es:

$$Q(r) := \text{atan}(md(r))$$

La posición del ACR es la suma vectorial de el punto PM y la distancia d, por lo tanto:

$$XA(r) := XM(r) + d(r) \cdot \cos(Q(r))$$

$$YA(r) := YM(r) + d(r) \cdot \sin(Q(r))$$

A continuación se muestran los resultados de las ecuaciones anteriores. Siendo $Q(r) = 0$, $YM(r) = 0$, $YA(r) = 0$.

r	XI(r)	YI(r)	XS(r)	YS(r)
0.1	0.094	-2.967	0.094	2.967
0.93	0.878	-2.695	0.878	2.695
1.76	1.663	-2.422	1.663	2.422
2.59	2.447	-2.15	2.447	2.15
3.42	3.231	-1.878	3.231	1.878
4.25	4.015	-1.605	4.015	1.605
5.08	4.799	-1.333	4.799	1.333
5.91	5.583	-1.061	5.583	1.061
6.74	6.367	-0.788	6.367	0.788
7.57	7.151	-0.516	7.151	0.516
8.4	7.935	-0.243	7.935	0.243

r	XM(r)	d(r)	XA(r)
0.1	0.094	0.443	0.537
0.93	0.878	1.318	2.197
1.76	1.663	1.77	3.432
2.59	2.447	2.092	4.539
3.42	3.231	2.34	5.57
4.25	4.015	2.534	6.549
5.08	4.799	2.688	7.486
5.91	5.583	2.806	8.389
6.74	6.367	2.895	9.261
7.57	7.151	2.955	10.106
8.4	7.935	2.99	10.925

En la sección 5.2 se define la ecuación $re(r)$, que se utiliza para conocer las velocidades angulares aproximadas de los reductores y de la flecha de transmisión.

$$re(r) := .000256742 \cdot r^5 - .00615459 \cdot r^4 + .0549858 \cdot r^3 - .239990 \cdot r^2 + .515106 \cdot r + .285515$$

$$w1(r) := \frac{VAO \cdot re(r)}{D1}$$

$$w2(r) := \frac{w1(r) \cdot D2}{D3}$$

$P := .5 \cdot ma \cdot VAO^2$ Energía inicial del ACR.

$n := .10$ Porcentaje de la energía que se absorbe en pérdidas por fricción, efecto Joule y estiramiento de la red.

$Pf(r) := \frac{n \cdot P \cdot r}{8}$ Cálculo de la Energía pérdida en función de r.

y se definen las siguientes constantes.

$C1 := VAO^2$ y $C2 := \frac{k}{ma}$

$C1 = 493.773$ y $C2 = 391.375$

En las siguientes tablas se observan los valores de las velocidades angulares de los reductores y de la flecha de transmisión, así como los valores del parámetro de cambio $re(r)$.

w1(r)
16.902
30.14
35.036
36.264
36.252
35.804
34.707
32.348
28.324
23.056
18.4

w2(r)
4.226
7.535
8.759
9.066
9.063
8.951
8.677
8.087
7.081
5.764
4.6

re(r)
0.335
0.597
0.694
0.718
0.718
0.709
0.687
0.641
0.561
0.457
0.364

La velocidad del ACR se define como:

$$VA(r) := \left[C1 - C2 \cdot (0.125 \cdot r)^2 - \left[\frac{I1T}{ma} \right] \cdot w1(r)^2 - \left[\frac{I2T}{ma} \right] \cdot w2(r)^2 - \frac{2 \cdot Pf(r)}{ma} \right]^{0.5}$$

Se puede calcular la velocidad de los extremos de la red $Vr(r)$, con la velocidad relativa. Ver capítulo 5.

$$C3(r) := \frac{YA(r) - YI(r)}{XA(r) - XI(r)}$$

$$Vr(r) := \frac{VA(r)}{A2 + A1 \cdot C3(r)}$$

Y la ecuación del tiempo es la integral de la derivada del desplazamiento entre la ecuación de velocidad en función del desplazamiento. Como se muestra a continuación:

$$t1(r) := \int_0^r \frac{A2 + A1 \cdot \frac{[YA(r) - YI(r)]}{[XA(r) - XI(r)]}}{\left[C1 - C2 \cdot (.125 \cdot r)^2 - \frac{[I1T]}{ma} \cdot w1(r)^2 - \frac{[I2T]}{ma} \cdot w2(r)^2 - 2 \cdot \frac{Pf(r)}{ma} \right]^{0.5}} dr$$

La ecuación de aceleración del ACR es:

$$AA(r) := \frac{-[.125 \cdot C2 \cdot r]^2}{A2 + A1 \cdot \frac{[YM(r) - YI(r)]}{[XA(r) - XI(r)]}}$$

En las siguientes tablas se muestran los resultados de las velocidades del ACR VA(r) y de los extremos de la red Vr(r) en m/s, la aceleración del ACR AA(r) en m/s y el tiempo para cada longitud de r en m/s.

r	VA(r)	Vr(r)	t1(r)	AA(r)
0.1	22.038	7.007	0.024	-0.194
0.93	21.428	13.265	0.101	-3.521
1.76	20.787	14.914	0.159	-7.722
2.59	20.066	15.654	0.213	-12.356
3.42	19.158	15.859	0.266	-17.313
4.25	17.995	15.614	0.318	-22.551
5.08	16.533	14.93	0.373	-28.053
5.91	14.715	13.77	0.43	-33.82
6.74	12.391	11.984	0.494	-39.862
7.57	9.1	9.083	0.573	-46.205
8.4	1.284	1.322	0.738	-52.884

$$EA(r) := .5 \cdot ma \cdot VA(r)^2 \quad \text{Energía del ACR.}$$

$$ER(r) := .5 \cdot k \cdot (.125 \cdot r)^2 \quad \text{Energía del resorte.}$$

$$EM(r) := .5 \cdot I1T \cdot w1(r)^2 + .5 \cdot I2T \cdot w2(r)^2 \quad \text{Energía cinética de los reductores y flecha de transmisión.}$$

La energía de fricción Pf(r) se definió anteriormente.

A continuación se observan las energías para cada r.

r	EA(r)	ER(r)	EM(r)	Pf(r)
0.1	9713.576	1.223	148.313	12.344
0.93	9183.271	105.781	471.603	114.802
1.76	8642.053	378.851	637.293	217.26
2.59	8052.59	820.432	682.716	319.718
3.42	7340.489	1430.525	682.268	422.176
4.25	6476.191	2209.128	665.504	524.634
5.08	5466.753	3156.244	625.369	627.092
5.91	4330.78	4271.87	543.257	729.549
6.74	3070.937	5556.008	416.504	832.007
7.57	1656.37	7008.658	275.964	934.465
8.4	32.959	8629.819	175.757	1036.923

APENDICE DE LA SECCION 5.3.

PROGRAMA PARA LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE MOVIMIENTO DEL SISTEMA DE RECUPERACION POR RED VERTICAL-HORIZONTAL.

Del modelado dinámico del capítulo cinco, sección 5.3 se obtuvieron las ecuaciones de aceleración, velocidad y desplazamiento de la carga de frenado y la aceleración constante del ACR, a las cuales se les da solución en el presente programa y cuyos parámetros son los siguientes:

CONDICIONES INICIALES

$$t_0(0) = 0 \quad [\text{seg}] \quad v_0(0) = 22.22 \quad [\text{m/seg}]$$

ma := 40	[kg]	L := 8	[m]
vo := 22.22	[m/s]	H := 6	[m]
ρ := .349	[rad]	G := 1	[m]
e := 0.01	[%]	E := 3	[m]

DIMENSIONES DE LAS POLEAS Y DEL REDUCTOR.

r := 3	[m]	rpa := .2	[m]
fg := 40	[N]	rRE := .4	[m]
Γ_{pa} := .26	[rad]		

92

PARAMETROS DE LA TRAYECTORIA.

ϕ_a := .18	[rad]	do := 6	[m]
xo := .5	[m]		
Gravedad:	g := 9.78	[m/s ²]	

MOVIMIENTO DEL ACR.

Para resolver la ecuación (5) se obtienen primero, la aceleración promedio del ACR y su velocidad y posición con respecto al tiempo en el recorrido. El tiempo total de recuperación es $t = t_2 + t_1$. t_1 es el tiempo en el que se tensa la red y es prácticamente despreciable, por lo que $t_0 = t_2$.

$$x_{o1} := \frac{x_0}{\cos(\phi_a)} \quad d := \frac{d_0}{\cos(\phi_a)}$$

$$t_2 := 2 \cdot \frac{d}{v_0}$$

$$t_1 := 2 \cdot \frac{x_{01}}{v_0}$$

$$T_i := \frac{t_1 + t_2}{11}$$

$$t := 0, T_i \dots t_2$$

La aceleración constante del ACR es:

$$a := \frac{(v_0)^2}{-2 \cdot d} \quad a = -40.479$$

La velocidad y desplazamiento en función del tiempo es:

$$x(t) := v_0 \cdot t + a \cdot \frac{t^2}{2} \quad v(t) := \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot a \cdot x(t)}$$

MOVIMIENTO DEL CABLE.

La longitud total de cable que es suministrada por la polea se determina con:

$$l := \frac{L}{2} - \frac{E}{2} + G$$

$$F := \sqrt{1 + \frac{H^2}{4}} \quad G_1 := \frac{1}{\cos(\rho)} - 1 \quad G_1 = 0.225$$

$$y(t) := (x_{01} + x(t)) \cdot \tan(\phi_a)$$

$$OE(t) := \left[1 + (x_{01} + x(t) \cdot \cos(\phi_a))^2 + \left[\frac{H}{2} + y(t) \right]^2 \right]^{.5}$$

$$Co(t) := OE(t) - (F + G_1 + e \cdot OE(t))$$

x(t)	OE(t)	Co(t)
0	4.698	-0.183
1.142	5.08	0.195
2.166	5.601	0.711
3.071	6.168	1.272
3.858	6.721	1.82
4.527	7.226	2.319
5.078	7.66	2.749
5.51	8.011	3.097
5.824	8.271	3.354
6.02	8.435	3.516
6.097	8.5	3.58

La cantidad total de cable que "sale" de la polea es de:

$$Co(t_2) = 3.582 \quad [m]$$

FUERZA SOBRE EL SISTEMA DE FRENADO.

Para obtener la masa y la aceleración de la carga se plantea la ecuación de energía: la energía potencial más la energía cinética de la carga debe ser igual a la energía cinética del ACR.

$$Ec := 0.5 \cdot m_a \cdot v_o^2 \qquad Ec = 9.875 \cdot 10^3 \quad [J]$$

Se proponen distintos valores de m_b para que al final la altura h_b que se eleva la carga coincida con Co máxima, osea $Co(t_2)$.

$$m_b := 81 \quad [Kg]$$

$$A := \frac{1}{m_b} \cdot (-1) \cdot \left[\frac{Ec - (f_g \cdot Co(t_2))}{0.5 \cdot t_2^2} \right]$$

$$a_b := \frac{-g + \sqrt{g^2 - 4 \cdot A}}{2} \qquad a_b = 23.769 \quad [m/s^2]$$

Se plantea la ecuación de Newton para la carga para conocer la fuerza resultante sobre él:

$$FR := m_b \cdot (a_b + g) + f_g$$

$$FR = 2.757 \cdot 10^3 \quad [N]$$

La velocidad de la carga al final y la distancia recorrida son:

$$vfb := ab \cdot t2 \qquad hb := ab \cdot \frac{t2^2}{2} \qquad hb = 3.581 \quad [m]$$

La aceleración angular de las poleas es:

$${}^n pa := \frac{ab}{rpa} \qquad {}^n pa = 118.846 \quad [rad/s^2]$$

La velocidad angular de las poleas es:

$$wpa := \frac{vfb}{rpa} \qquad wpa = 65.237 \quad [rad/s]$$

La energía necesaria para levantar la carga con la aceleración ab es:

$$Eb := \left[0.5 \cdot mb \cdot vfb^2 \right] + (mb \cdot g \cdot hb) + (fg \cdot hb)$$

RESULTADOS

ab = 23.769	[m/s ²]	Eb = 9.875 · 10 ³	[J]
vfb = 13.047	[m/s]	Ec = 9.875 · 10 ³	[J]
hb = 3.581	[m]		
Co(t2) = 3.582	[m]	mb = 81	[kg]

La masa por cada esquina de la red es: $m := \frac{mb}{4}$ m = 20.25 [kg]

NOTA: En este programa no se toma en cuenta el reductor de desplazamiento, ya que se considera que la altura crítica obtenida es adecuada.

APENDICE C

Programa de la Sección 6.3.1

```

ANAL=NLSTATIC
NLTYPE=GEOM
REFC=TOTAL
FILE=LMRE1
SAVE=26,27
MAXC=800
LOAD=1
RESE=OFF
*TITLE
REACCIONES DE LOS EXTREMOS DE LA
RED.
*ELTYPE
** Selección del elemento
  1, 45, 1
*RCTABLE
** Datos del grosor del elemento
  1,3
  0.0003,0.0003,300
***
*LCSYSTEM
** Sistema de coordenadas local
  3,0,2,0,0,0,0,0
*NODES
**Definición de los nodos
  1, , , 0.0E+00, 0.0E+00, 0.0E+00,3
  2, , , 8.0, 0, 0.0E+00,3
  3, , , 8.0E+00, 6.0E+00, 0.0E+00,3
  4, , , 0.0,6,0,0,3
  5, , , 4.0E+00, 3.0E+00, 3.0E+00,3
***
*ELEMENT
** Conexión de los elementos
  1, 1, 1, 1, 0
  1, 5,
  2, 1, 1, 1, 0
  2, 5,
  3, 1, 1, 1, 0
  3, 5,
  4, 1, 1, 1, 0
  4, 5,
***
*MATERIAL
**Propiedades del material
  EX, 1, 0, 190E+09
*TIMEAMP
** Curva tiempo - amplitud
  444,12
  
```

```

0,0,02,0,05,0,09,0,11,0,17,0,16,0,26,
0,21,0,35,0,26,0,45,0,31,0,55,0,36,0,65,
0,41,0,77,0,47,0,88,0,54,1,0,0,71,1
***
*EVENT, ID=1
** Parámetros de control del evento
INCREMENTS=USER,7
MAXITERATION=40
TIMEEND=0.7
TOLERA=.0001,.0001,.0001
NEWT=FULL,1
EQUI=ON,1
FRQO=1
*STEPSIZE
** Definición del tamaño de los saltos
  0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
*NLOUT
** Selección de la salida
  1,2,6,3,1,5,0
**Condiciones de contorno
*SPDISP,TCRV=444
  1,UXYZ, 0.00000E+0,4,1
*CFORCE,TCRV=444
  5,FZ , 2240
*ENDDATA
  
```

Programa de la Sección 6.3.2

```

ANAL=NLSTAT
NLTYPE=GEOM
RESE=OFF
FILE=LMC2
SAVE=26,27
*TITLE
ANALISIS DEL CABLE/VIGA FIJO
*ELTYPE
** Definición del elemento
  1, 39, 1
*BMSECT
** Datos de la sección de la viga
  CIR,1,2,3,8,0
  0,05
*BMDATA
**Datos de la viga.
  1,18,0,0,0,4
  1,0,0,0,0
  0,0,0,0,0,0,0,0
***
  
```

```

*LCSYSTEM
** Eje local de coordenadas
3,0,2,0,0,0,0,0,0
*ELEMENT
**Conexión de los elementos
1, 1, 1, 1, 0
1, 2,
2, 1, 1, 1, 0
2, 3,
3, 1, 1, 1, 0
3, 4,
4, 1, 1, 1, 0
4, 5,
5, 1, 1, 1, 0
5, 6,
6, 1, 1, 1, 0
6, 7,
7, 1, 1, 1, 0
7, 8,
8, 1, 1, 1, 0
8, 9,
9, 1, 1, 1, 0
9, 10,
10, 1, 1, 1, 0
10, 11,
11, 1, 1, 1, 0
11, 12,
12, 1, 1, 1, 0
12, 13,
13, 1, 1, 1, 0
13, 14,
14, 1, 1, 1, 0
14, 15,
15, 1, 1, 1, 0
15, 16,
16, 1, 1, 1, 0
16, 17
***
*NODES
**Definición de los nodos
1$0,0,3,0,0
17,0,1,0,8,0,0,25,0,0
18$0,0,10
***
*MATERIAL
**Propiedades del material
EX, 1, 0, 190E9
*PLASTIC
MODE,1,0,0
SY0, 1, 0, 275E+06
*TIMEAMP
**Curva tiempo - amplitud
111,12
0,0,0,05,0.02,0.11,0.09,0.16,0.17,
0.21,0.26,0.26,0.35,0.31,0.45,0.36,0.55,
0.41,0.65,0.47,0.77,0.54,0.88,0.71,1

```

```

*EVENT
** Parámetros de control del evento
INCREMETATION=EQUAL,7
MAXITERATION=15
NEWT=FULL,1
STEP=0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
TIMEEND=0.7
TOLERA=0.001,0.001,0.001
*NLOUT
**Selección de la salida
1,1,-1,4,0,1
*PRINT
LDVE,0
**Condiciones de contorno
*SPDISP
1,ALL,0.0
17,ALL,0.0
*CFORCE,TCRV=111
16,FY,-5.59E+02
16,FZ,7.46E+02
*ENDDATA

```

Programa de la sección 6.3.3

```

ANAL=NLSTAT
NLTYPE=GEOM
RESE=OFF
FILE=LME8
*TITLE
ANALISIS DE LA ESTRUCTURA
*ELTYPE
**Selección de los elementos
1, 39, 1
2, 39, 1
3, 39, 1
*BMSECT
**Datos de la sección de las viga
LSECT,1,1,5,5,3
0.051,0.051,0.0032,0.0032
RECT,2,1,5,5,3
0.051,0.0032
CIR,3,1,3.8,3
0.0254
*BMDATA
** Datos de las vigas
1,91,0,1,0
1,0,0,0,0
0,0,0,0,0,0,0,0
2,91,0,1,0
2,0,0,0,0
0,0,0,0,0,0,0,0
3,91,0,1,0
3,0,0,0,0
0,0,0,0,0,0,0,0
***

```

****Eje local de coordenadas**

***LCSYSTEM**

3,0,2,0,0,0,0,0

***NODES**

****Definición de los nodos**

1,0,0,0,0,0,0

2,0,0,0,0,0,38,0

3,0,0,0,0,0,76,0

4,0,0,0,0,1,14,0

5,0,0,0,0,1,53,0

6,0,0,0,0,1,91,0

7,0,0,0,0,2,29,0

8,0,0,0,0,2,68,0

9,0,0,0,0,3,06,0

10,0,0,0,0,3,44,0

11,0,0,0,0,3,83,0

12,0,0,0,0,4,21,0

13,0,0,0,0,4,59,0

14,0,0,0,0,4,97,0

15,0,0,0,0,5,36,0

16,0,0,0,0,5,75,0

17,0,0,0,0,6,12,0

18,0,0,0,0,6,51,0

19,0,0,0,0,6,89,0

20,0,0,0,0,7,27,0

21,0,0,0,0,7,66,0

22,0,0,0,0,8,0,0

23,0,0,0,0,0,-0.5

24,0,0,0,0,0,38,-0.5

25,0,0,0,0,0,76,-0.5

26,0,0,0,0,1,14,-0.5

27,0,0,0,0,1,53,-0.5

28,0,0,0,0,1,91,-0.5

29,0,0,0,0,2,29,-0.5

30,0,0,0,0,2,68,-0.5

31,0,0,0,0,3,06,-0.5

32,0,0,0,0,3,44,-0.5

33,0,0,0,0,3,83,-0.5

34,0,0,0,0,4,21,-0.5

35,0,0,0,0,4,59,-0.5

36,0,0,0,0,4,97,-0.5

37,0,0,0,0,5,36,-0.5

38,0,0,0,0,5,75,-0.5

39,0,0,0,0,6,12,-0.5

40,0,0,0,0,6,51,-0.5

41,0,0,0,0,6,89,-0.5

42,0,0,0,0,7,27,-0.5

43,0,0,0,0,7,66,-0.5

44,0,0,0,0,8,-0.5

45,0,0,0,-0.5,0,-0.5

46,0,0,0,-0.5,0,38,-0.5

47,0,0,0,-0.5,0,76,-0.5

48,0,0,0,-0.5,1,14,-0.5

49,0,0,0,-0.5,1,53,-0.5

50,0,0,0,-0.5,1,91,-0.5

51,0,0,0,-0.5,2,29,-0.5

52,0,0,0,-0.5,2,68,-0.5

53,0,0,0,-0.5,3,06,-0.5

54,0,0,0,-0.5,3,44,-0.5

55,0,0,0,-0.5,3,83,-0.5

56,0,0,0,-0.5,4,21,-0.5

57,0,0,0,-0.5,4,59,-0.5

58,0,0,0,-0.5,4,97,-0.5

59,0,0,0,-0.5,5,36,-0.5

60,0,0,0,-0.5,5,75,-0.5

61,0,0,0,-0.5,6,12,-0.5

62,0,0,0,-0.5,6,51,-0.5

63,0,0,0,-0.5,6,89,-0.5

64,0,0,0,-0.5,7,27,-0.5

65,0,0,0,-0.5,7,66,-0.5

66,0,0,0,-0.5,8,0,-0.5

67,0,0,0,-0.5,0,0

68,0,0,0,-0.5,0,38,0

69,0,0,0,-0.5,0,76,0

70,0,0,0,-0.5,1,14,0

71,0,0,0,-0.5,1,53,0

72,0,0,0,-0.5,1,91,0

73,0,0,0,-0.5,2,29,0

74,0,0,0,-0.5,2,68,0

75,0,0,0,-0.5,3,06,0

76,0,0,0,-0.5,3,44,0

77,0,0,0,-0.5,3,83,0

78,0,0,0,-0.5,4,21,0

79,0,0,0,-0.5,4,59,0

80,0,0,0,-0.5,4,97,0

81,0,0,0,-0.5,5,36,0

82,0,0,0,-0.5,5,75,0

83,0,0,0,-0.5,6,12,0

84,0,0,0,-0.5,6,51,0

85,0,0,0,-0.5,6,89,0

86,0,0,0,-0.5,7,27,0

87,0,0,0,-0.5,7,66,0

88,0,0,0,-0.5,8,0,0

89,0,0,0,-0.25,7,83,-0.25

90,0,0,0,-0.25,1,72,-0.25

91,0,0,0,-0.25,8,0,-0.25

***ELEMENTS**

****Conexión de los elementos**

1, 1, 1, 1, 0,21,1,1,1

1, 2,

22, 1, 1, 1, 0,21,1,1,1

23, 24,

43, 1, 1, 1, 0,21,1,1,1

45, 46,

64, 1, 1, 1, 0,21,1,1,1

67, 68,

85, 2, 2, 2, 0

1, 24,

86, 2, 2, 2, 0

24, 3,

87, 2, 2, 2, 0
3, 26,
88, 2, 2, 2, 0
26, 5,
89, 2, 2, 2, 0
5, 28,
90, 2, 2, 2, 0
28, 7,
91, 2, 2, 2, 0
7, 30,
92, 2, 2, 2, 0
30, 9,
93, 2, 2, 2, 0
9, 32,
94, 2, 2, 2, 0
32, 11,
95, 2, 2, 2, 0
11, 34,
96, 2, 2, 2, 0
34, 13,
97, 2, 2, 2, 0
13, 36,
98, 2, 2, 2, 0
36, 15,
99, 2, 2, 2, 0
15, 38,
100, 2, 2, 2, 0
38, 17,
101, 2, 2, 2, 0
17, 40,
102, 2, 2, 2, 0
40, 19,
103, 2, 2, 2, 0
19, 42,
104, 2, 2, 2, 0
42, 21,
105, 2, 2, 2, 0
21, 44,
106, 2, 2, 2, 0
24, 45,
107, 2, 2, 2, 0
24, 47,
108, 2, 2, 2, 0
47, 26,
109, 2, 2, 2, 0
26, 49,
110, 2, 2, 2, 0
49, 28,
111, 2, 2, 2, 0
28, 51,
112, 2, 2, 2, 0
51, 30,
113, 2, 2, 2, 0
30, 53,
114, 2, 2, 2, 0
53, 32,

115, 2, 2, 2, 0
32, 55,
116, 2, 2, 2, 0
55, 34,
117, 2, 2, 2, 0
34, 57,
118, 2, 2, 2, 0
57, 36,
119, 2, 2, 2, 0
36, 59,
120, 2, 2, 2, 0
59, 38,
121, 2, 2, 2, 0
38, 61,
122, 2, 2, 2, 0
61, 40,
123, 2, 2, 2, 0
40, 63,
124, 2, 2, 2, 0
63, 42,
125, 2, 2, 2, 0
42, 65,
126, 2, 2, 2, 0
65, 44,
127, 2, 2, 2, 0
45, 68,
128, 2, 2, 2, 0
68, 47,
129, 2, 2, 2, 0
47, 70,
130, 2, 2, 2, 0
70, 49,
131, 2, 2, 2, 0
49, 72,
132, 2, 2, 2, 0
72, 51,
133, 2, 2, 2, 0
51, 74,
134, 2, 2, 2, 0
74, 53,
135, 2, 2, 2, 0
53, 76,
136, 2, 2, 2, 0
76, 55,
137, 2, 2, 2, 0
55, 78,
138, 2, 2, 2, 0
78, 57,
139, 2, 2, 2, 0
57, 80,
140, 2, 2, 2, 0
80, 59,
141, 2, 2, 2, 0
59, 82,
142, 2, 2, 2, 0
82, 61,

143, 2, 2, 2, 0
 61, 84,
 144, 2, 2, 2, 0
 84, 63,
 145, 2, 2, 2, 0
 63, 86,
 146, 2, 2, 2, 0
 86, 65,
 147, 2, 2, 2, 0
 65, 88,
 148, 2, 2, 2, 0
 1, 68,
 149, 2, 2, 2, 0
 68, 3,
 150, 2, 2, 2, 0
 3, 70,
 151, 2, 2, 2, 0
 70, 5,
 152, 2, 2, 2, 0
 5, 72,
 153, 2, 2, 2, 0
 72, 7,
 154, 2, 2, 2, 0
 7, 74,
 155, 2, 2, 2, 0
 74, 9,
 156, 2, 2, 2, 0
 9, 76,
 157, 2, 2, 2, 0
 76, 11,
 158, 2, 2, 2, 0
 11, 78,
 159, 2, 2, 2, 0
 78, 13,
 160, 2, 2, 2, 0
 13, 80,
 161, 2, 2, 2, 0
 80, 15,
 162, 2, 2, 2, 0
 15, 82,
 163, 2, 2, 2, 0
 82, 17,
 164, 2, 2, 2, 0
 17, 84,
 165, 2, 2, 2, 0
 84, 19,
 166, 2, 2, 2, 0
 19, 86,
 167, 2, 2, 2, 0
 86, 21,
 168, 2, 2, 2, 0
 21, 88,
 169, 1, 1, 1, 0
 1, 23,
 170, 1, 1, 1, 0
 23, 45,

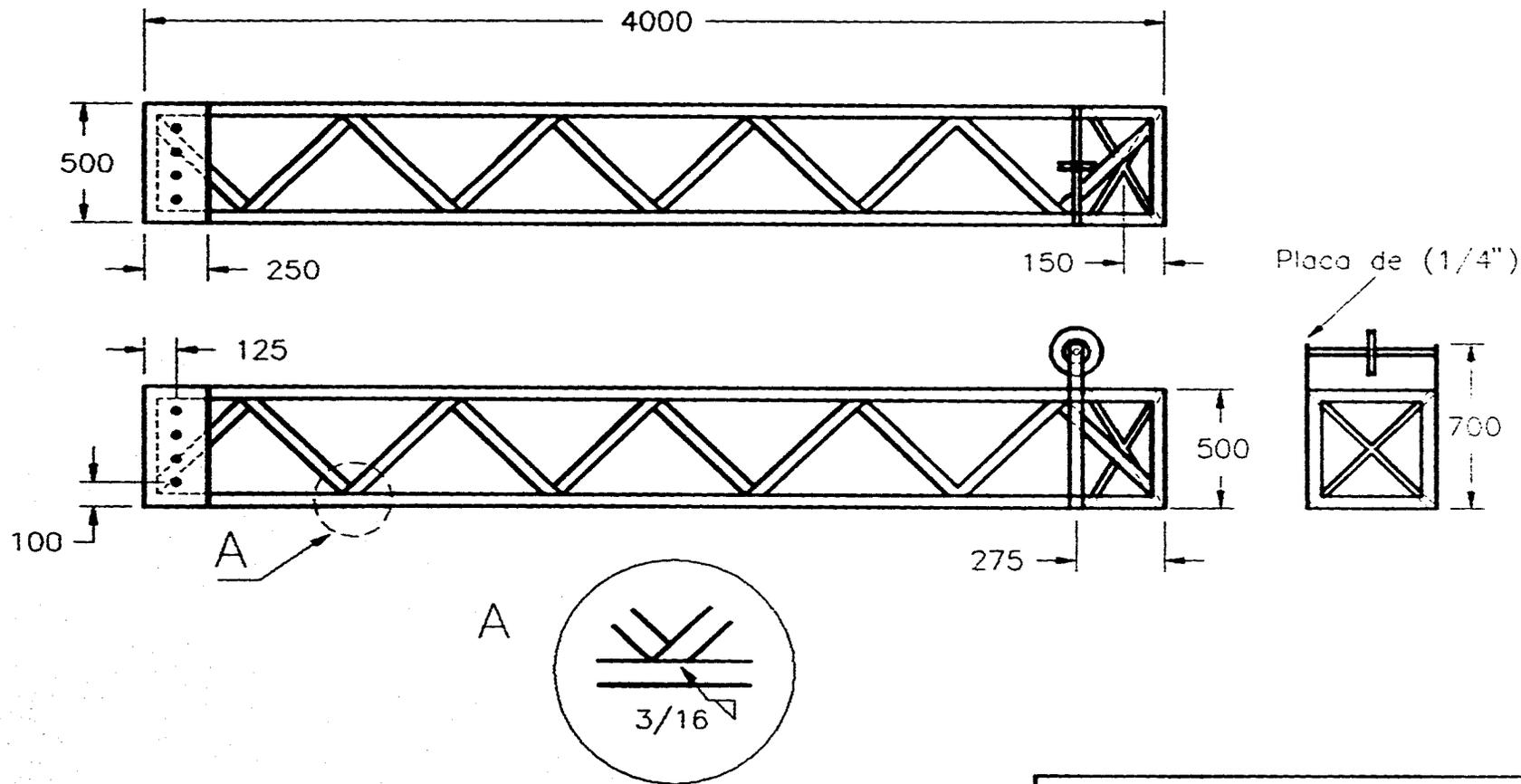
171, 1, 1, 1, 0
 45, 67,
 172, 1, 1, 1, 0
 67, 1,
 173, 1, 1, 1, 0
 12, 34,
 174, 1, 1, 1, 0
 34, 56,
 175, 1, 1, 1, 0
 56, 78,
 176, 1, 1, 1, 0
 78, 12,
 177, 1, 1, 1, 0
 22, 44,
 178, 1, 1, 1, 0
 44, 66,
 179, 1, 1, 1, 0
 66, 88,
 180, 1, 1, 1, 0
 88, 22,
 181, 3, 3, 3, 0
 21, 89,
 182, 3, 3, 3, 0
 43, 89,
 183, 3, 3, 3, 0
 65, 89,
 184, 3, 3, 3, 0
 87, 89,
 185, 3, 3, 3, 0
 22, 89,
 186, 3, 3, 3, 0
 44, 89,
 187, 3, 3, 3, 0
 66, 89,
 188, 3, 3, 3, 0
 88, 89,
 189, 3, 3, 3, 0
 5, 90,
 190, 3, 3, 3, 0
 27, 90,
 191, 3, 3, 3, 0
 49, 90,
 192, 3, 3, 3, 0
 71, 90,
 193, 3, 3, 3, 0
 6, 90,
 194, 3, 3, 3, 0
 28, 90,
 195, 3, 3, 3, 0
 50, 90,
 196, 3, 3, 3, 0
 72, 90,
 ...

*MATERIAL 90,FZ,89.9
 **Propiedades del material 90,MX,242
 EX,1,0,190E+09 90,MY,323
 NUXY,1,0,0.3 90,MZ,111
 DENS,1,0,7.8 *ENDDATA
 EX,2,0,190E+09
 NUXY,2,0,0.3
 DENS,2,0,7.8
 EX,3,0,190E+09
 NUXY,3,0,0.3
 DENS,3,0,7.8
 *PLASTIC
 MODE,1,0,0
 SY0,1,0,400E6
 MODE,2,0,0
 SY0,2,0,400E6
 MODE,3,0,0
 SY0,3,0,400E6
 *TIMEAMP
 **Curva tiempo - amplitud
 111,12
 0,0,0.05,0.02,0.11,0.09,0.16,0.17,
 0.21,0.26,0.26,0.35,0.31,0.45,0.36,0.55,
 0.41,0.65,0.47,0.77,0.54,0.88,0.71,1

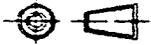
 *EVENT, ID=1
 **Parámetros del evento
 INCREMETAION=EQUAL.1
 MAXITERATION=12
 NEWT=FULL,1
 TIMEEND=.717
 TOLERA=0.01,0.001,0.001
 *NLOUT
 **Selección de la salida
 1,2,6,3,1,5,0
 *PRINT
 LDVE,0
 **Condiciones de contorno
 *SPDISP
 1,ALL,0.0
 4,ALL,0.0
 23,ALL,0.0
 26,ALL,0.0
 45,ALL,0.0
 48,ALL,0.0
 67,ALL,0.0
 70,ALL,0.0
 *CFORCE,TCRV=111
 89,FX,1257.28
 89,FY,-515
 89,FZ,89.9
 89,MX,242
 89,MY,323
 89,MZ,111
 90,FX,1257.28
 90,FY,515

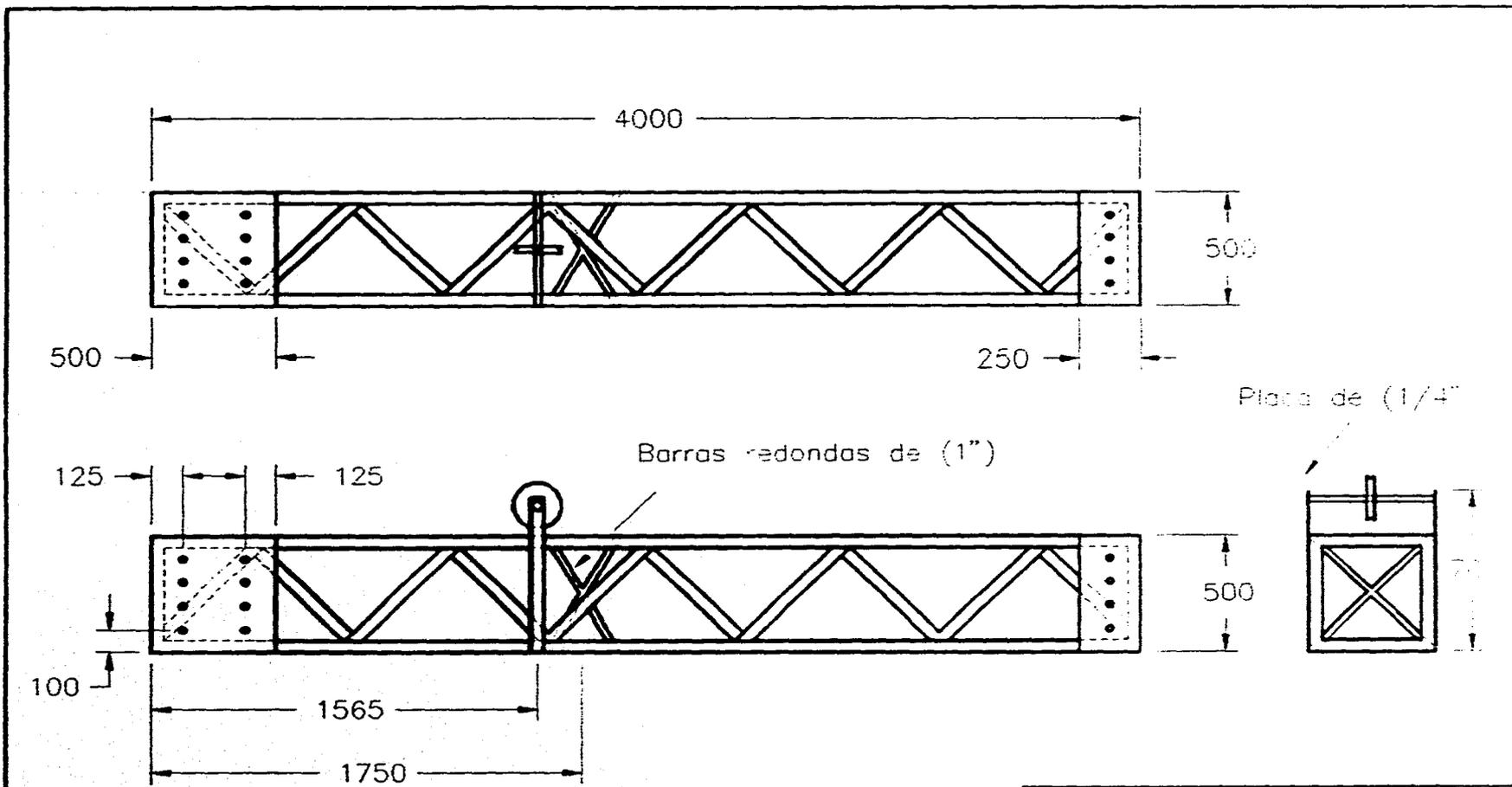
APÉNDICE D

DIBUJOS DE DETALLE Y ENSAMBLE

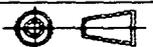


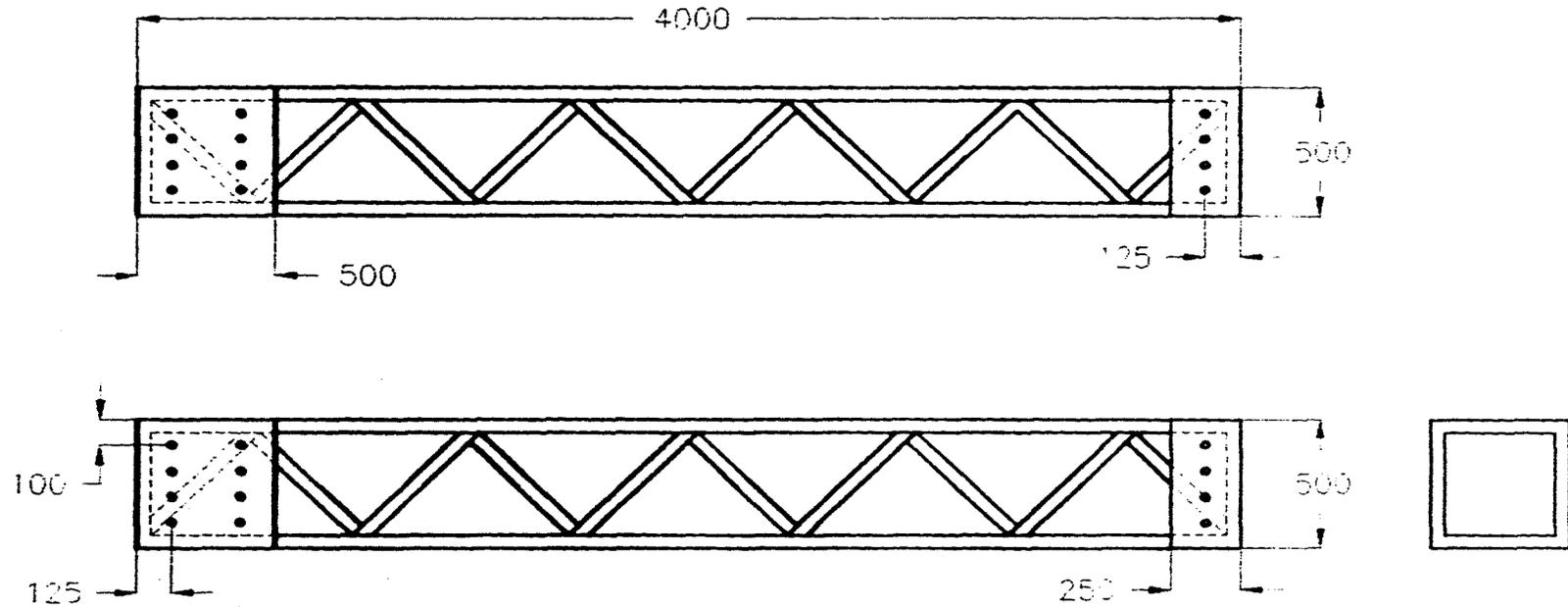
Nota: La estructura se forma de un marco de ángulo de lados iguales de 51X51X3.2 mm, reforzado con solera de 51X3.2 mm. La estructura tiene placas de (1/4"), para su ensamble, con agujeros de (1/2") igualmente espaciados. Se observa también la posición de las poleas. Todas las partes de la estructura están unidas con soldadura.

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Estructura pieza 1	
DIB: Monterrubio	ACOT: mm. (pulg.)
AUT: Navarrete	ESCALA: 1:25
FECHA: 6-Mar-96	



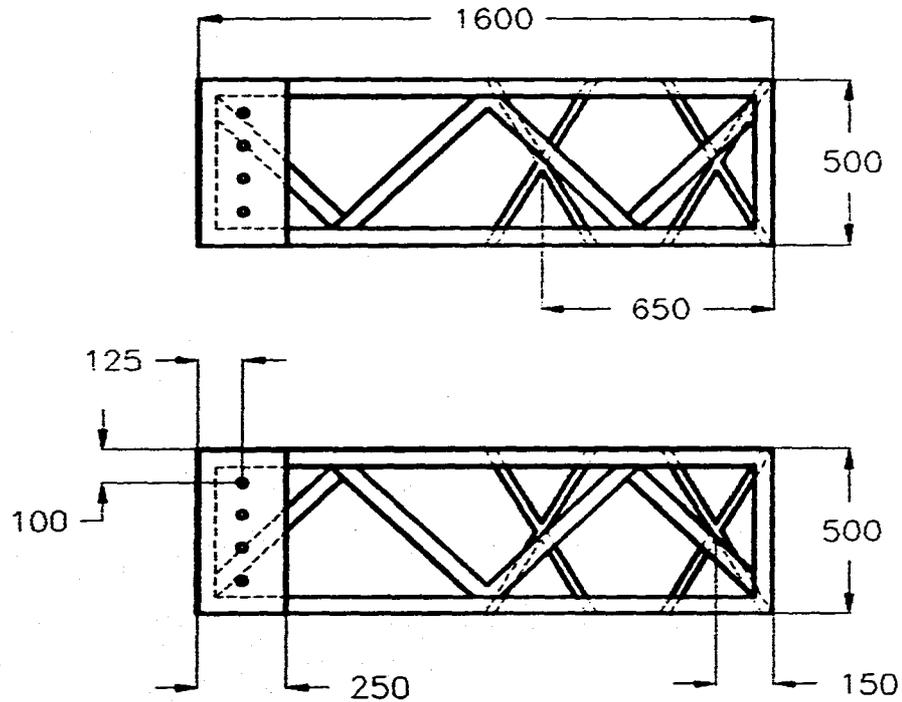
Nota: La estructura se forma de un marco de ángulo de lados iguales de 51X51X3.2 mm, reforzado con solera de 51X3.2 mm. La estructura tiene placas de (1/4"), para su ensamble, con agujeros de (1/2") igualmente espaciados. Se observa también la posición de las poleas.
 Todas las partes de la estructura están unidas con soldadura.

<i>INSTITUTO DE INGENIERIA</i>	
	<i>UNAM</i>
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Estructura pieza 2	
DIB: Monterrubio	ACDT: mm.(pulg.)
AUT: Navarrete	ESCALA: 1:25
FECHA: 6-Mar-96	

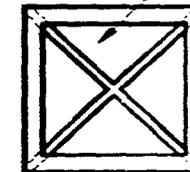


Nota: La estructura se forma de un marco de ángulo de lados iguales de 51X51X3.2 mm, reforzado con solera de 51X3.2 mm. La estructura tiene placas de (1/4"), para su ensamble, con agujeros de (1/2") igualmente espaciados. Todas las partes de la estructura están unidas con soldadura.

<i>INSTITUTO DE INGENIERIA</i>	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Estructura pieza 3.	
DIB: Monterrubio	ACOT: mm. (pulq.)
AUT: Navarrete	ESCALA: 1:25
FECHA: 6-Mar-96	

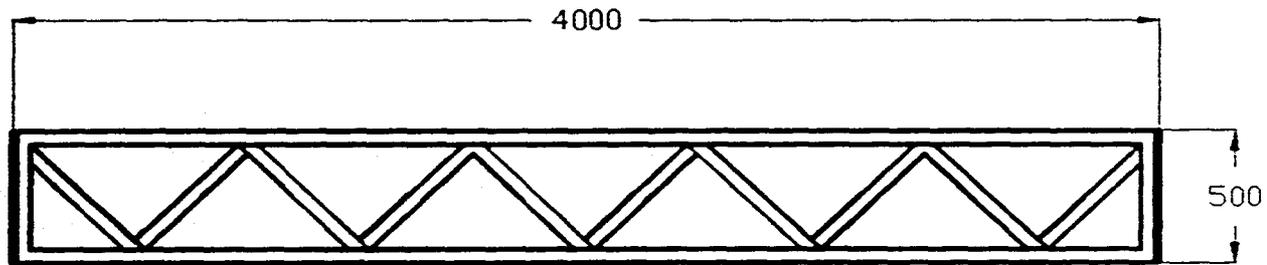


Barra redonda de (1")

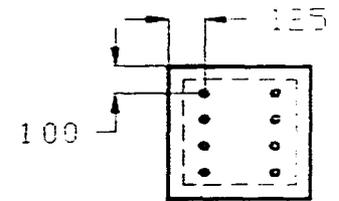
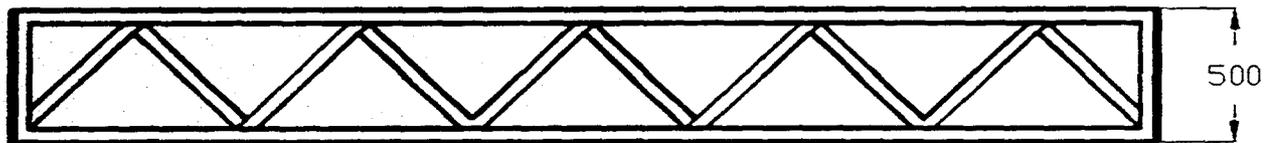


Nota: La estructura se forma de un marco de ángulos de lados iguales de 51X51X3.2 mm, reforzado con solera de 51X3.2 mm. La estructura tiene placas de (1/4") para su ensamble, con agujeros de (1/2") igualmente espaciados. Se observa también la posición de las poleas.
 Todas las partes de la estructura están unidas con soldadura.

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR	
PIEZA: Estructura pieza 4	
DIB: Monterrubio	ACDT: mm. (pulq.)
AUT: Navarrete	ESCALA: 1:20
FECHA: 6-Mar-96	



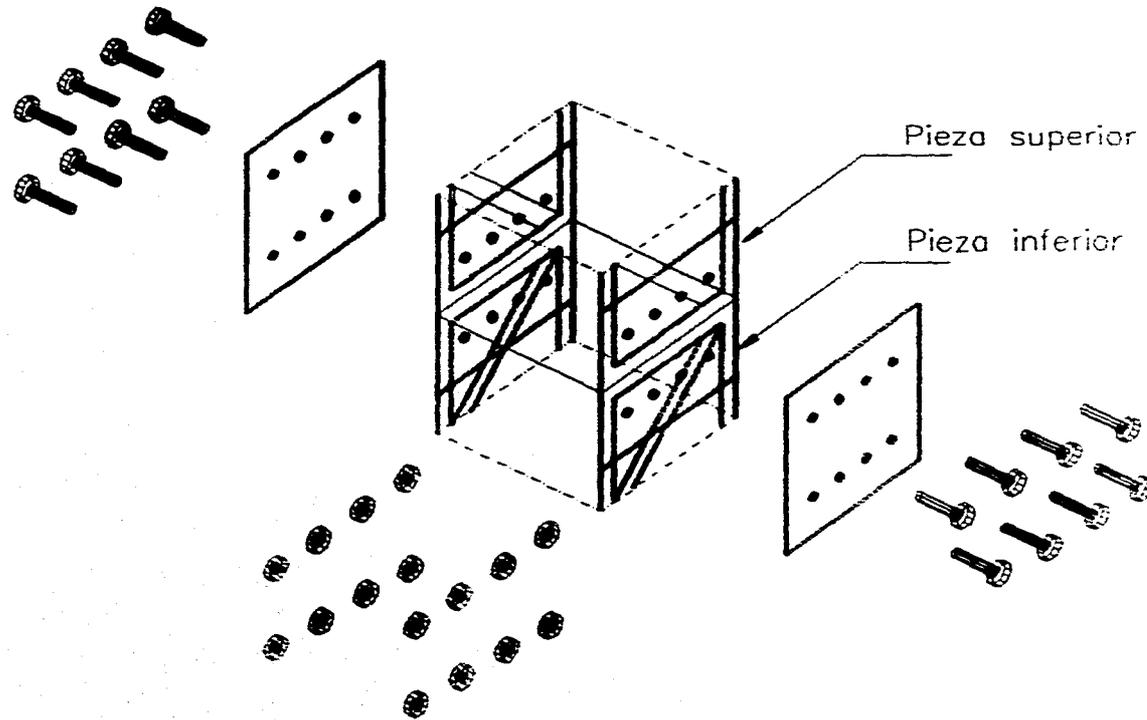
Placa de (1/4")



Nota: La estructura se forma de un marco de ángulo de lados iguales de 51 X 51 X 32 mm, reforzado con placa de 51 X 32 mm. La estructura tiene placas de (1/4"), en los extremos para su ensamble con agujeros de (1/2") igualmente espaciados.

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Estructura pieza 5	
DIB: Monterrubio	ACDT: mm. (pulg.)
AUT: Navarrete	ESCALA: 1:25
FECHA: 6-Mar-96	

DETALLE DE ENSAMBLE



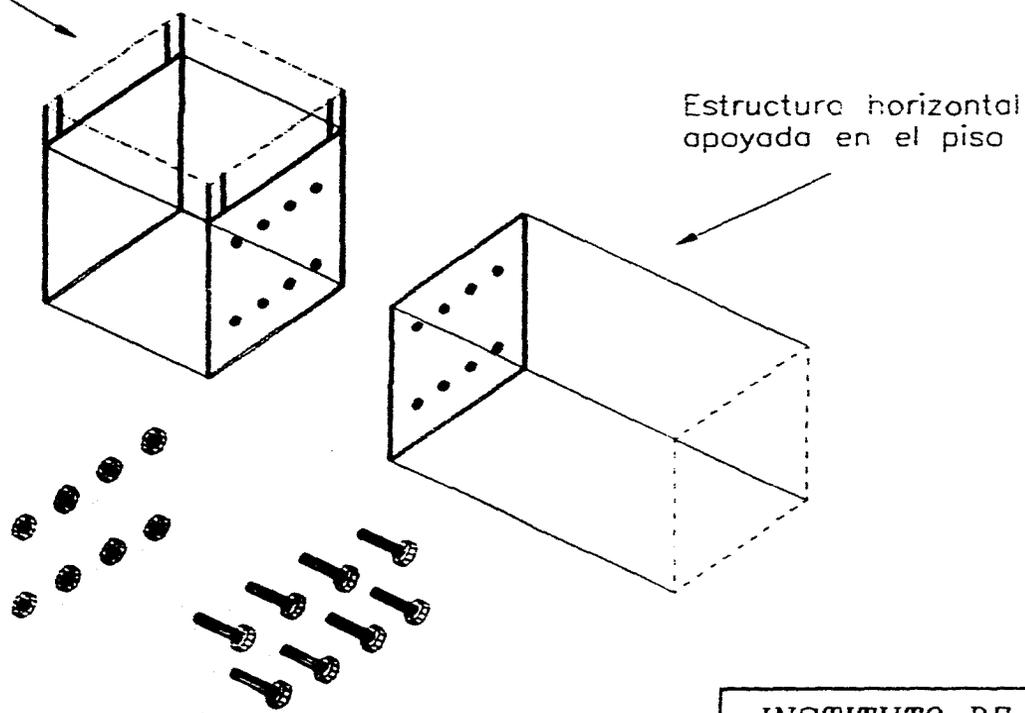
Este detalle muestra el ensamble de las dos partes que forman los postes verticales, ya sean de 5.50 m o de 8.0 m de altura total.

La unión debe hacerse por los cuatro lados de los postes.

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Detalle de ensamble	
DIB: Monterrubio	ACDT:
AUT: Navarrete	ESCALA: s/esc.
FECHA: 6-Mar-96	

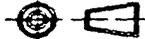
Poste vertical

DETALLE DE ENSAMBLE



Estructura horizontal
apoyada en el piso

Este detalle de ensamble muestra la unión entre los postes
verticales y la estructura apoyada en el piso.
Las dos partes tienen una placa soldada con agujeros de
(1/2").

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Detalle de ensamble	
DIB: Monterrubio	ACOT:
AUT: Navarrete	ESCALA: s/esc.
FECHA: 6-Mar-96	

DETALLE DE ENSAMBLE



Las uniones de los PTR y de los ángulos se lleva a cabo uniendo las placas soldadas en los extremos de cada pieza con tornillos de (1/4") como se muestra en el dibujo de arriba. La placa tendrá las dimensiones necesarias para permitir el paso del tornillo y su tuerca.

INSTITUTO DE INGENIERIA



UNAM

PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.

PIEZA: Ejemplo de ensamble

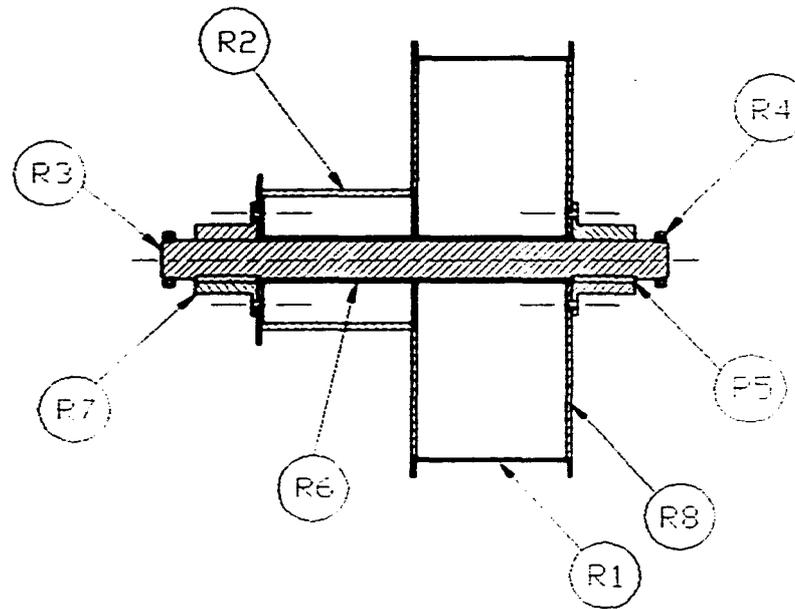
DIB: Monterrubio

ACOT:

AUT: Navarrete

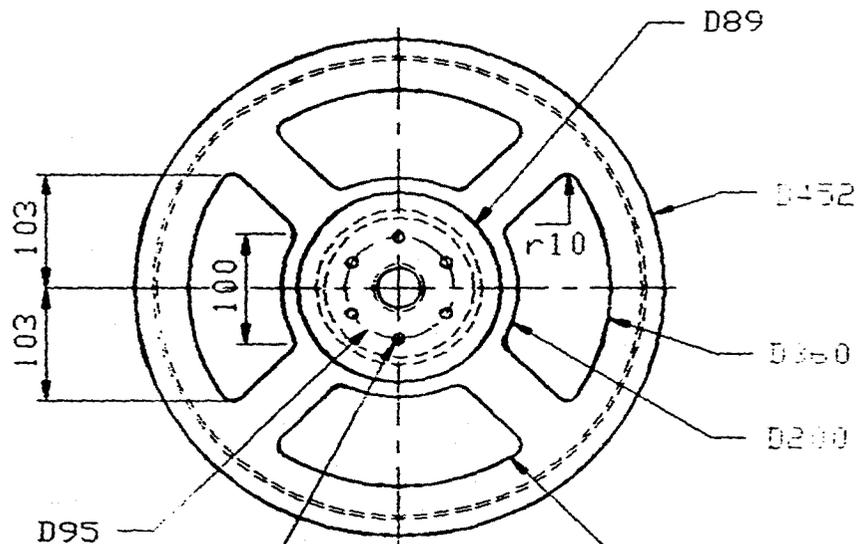
ESCALA: s/esc.

FECHA: 6-Mar-96



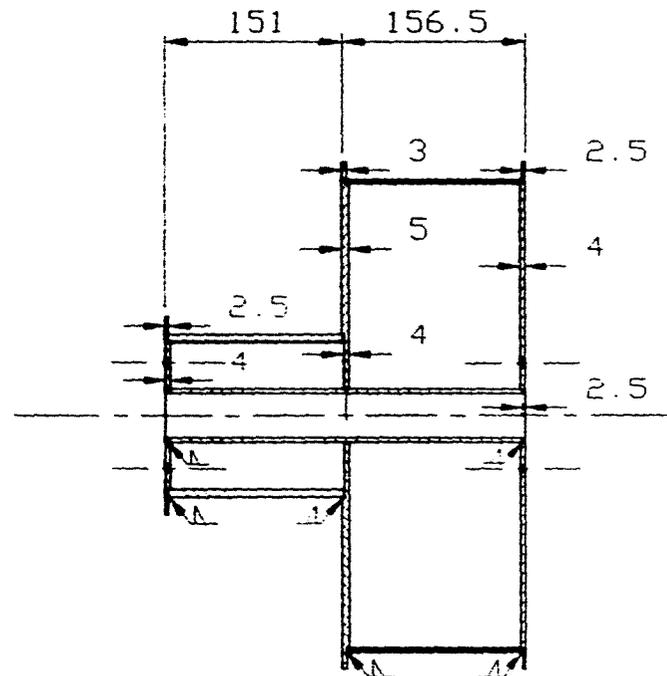
No.	PIEZA	MATERIAL
R1	TAMBOR Rt1	ACERO 1035 COLD DRAWN
R2	TAMBOR Rt2	ACERO 1040 COLD ROLLED
R3	EJE	ACERO 302 INOXIDABLE
R4	BALEROS	CONSULTAR AL PROVEEDOR
R5	CUÑA	ACERO 1020 COLD ROLLED
R6	TUBO GUIA	ACERO 1040 COLD ROLLED
R7	BRIDA	ACERO 1040 COLD ROLLED
R8	DISCOS	ACERO 1040 COLD ROLLED

<i>INSTITUTO DE INGENIERIA</i>	
	<i>UNAM</i>
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: REDUCTOR	
DIB: FIP	ACOT:
AUT: MNM	ESCALA: 1:7
FECHA: Marzo 1996	



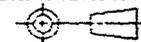
6 barrenos roscados de
(5/16") cuerda estandar
igualmente espaciados

Cuatro agujeros
igualmente espaciados



	DE	DI	TIPO
R1	420	414	Tubo con costura
R2	140	126	Tubo sin costura
R6	50	44	Tubo sin costura

INSTITUTO DE INGENIERIA



UNAM

PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.

PIEZA: R1, R2, R6 y R8.

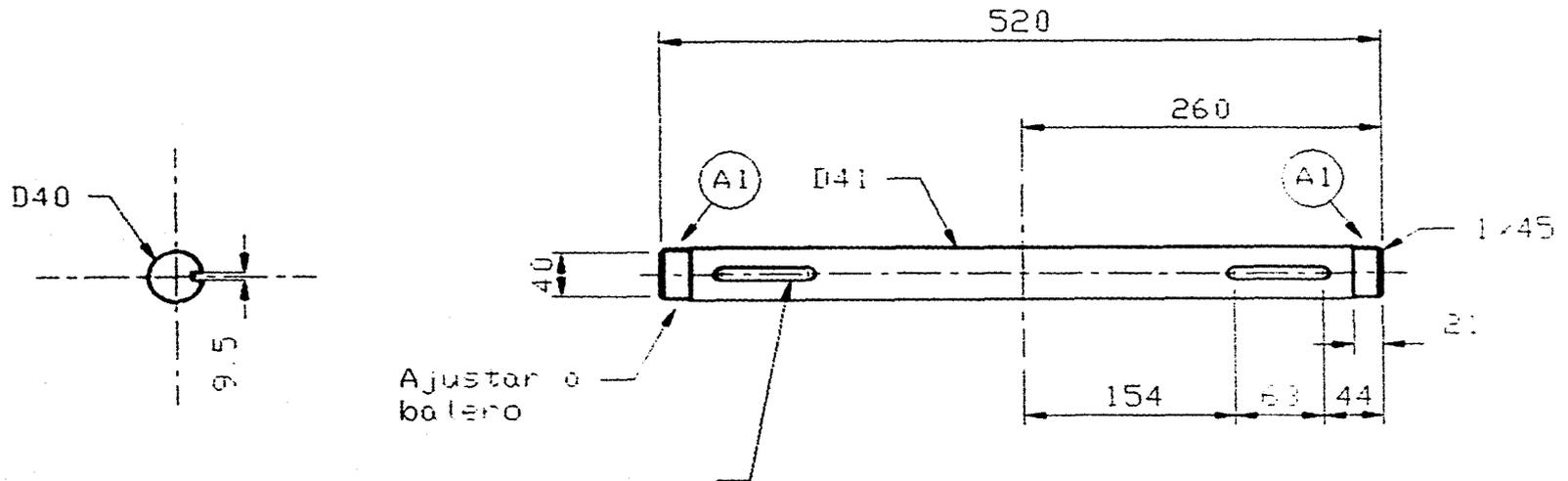
DIB: FIP

ACDT: mm (pulg)

AUT: MNM

ESCALA: 1:6

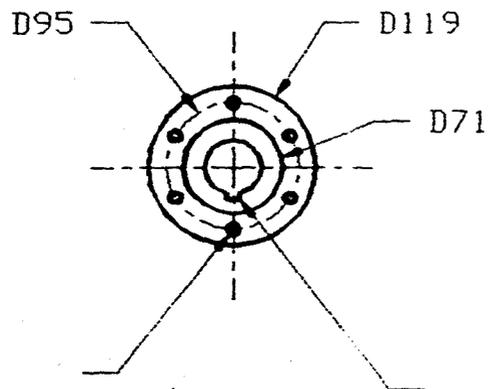
FECHA: Marzo 1996



2 cuñeros de (3/8") x 63
de largo y 4.3 de profundidad

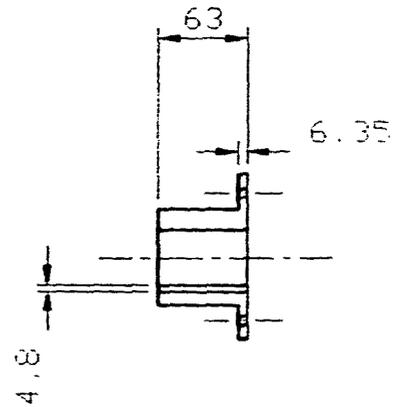
BALERO	DE	DI	ANCHO	RADIO DE FILETE
A1	68	40	9	0.5

INSTITUTO DE INGENIERIA	
UNAM	
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: R3 y R4	
DIB: FIP	ACOT: mm (pulg)
AUT: MNM	ESCALA: 1:5
FECHA: Marzo 1996	

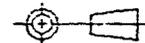


6 barrenos pasados de 8mm de diametro (5/16") igualmente espaciados.

Canal para cuna 9.5 de ancho x 4.8 de profundidad y 63 de longitud



INSTITUTO DE INGENIERIA



UNAM

PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.

PIEZA: R7

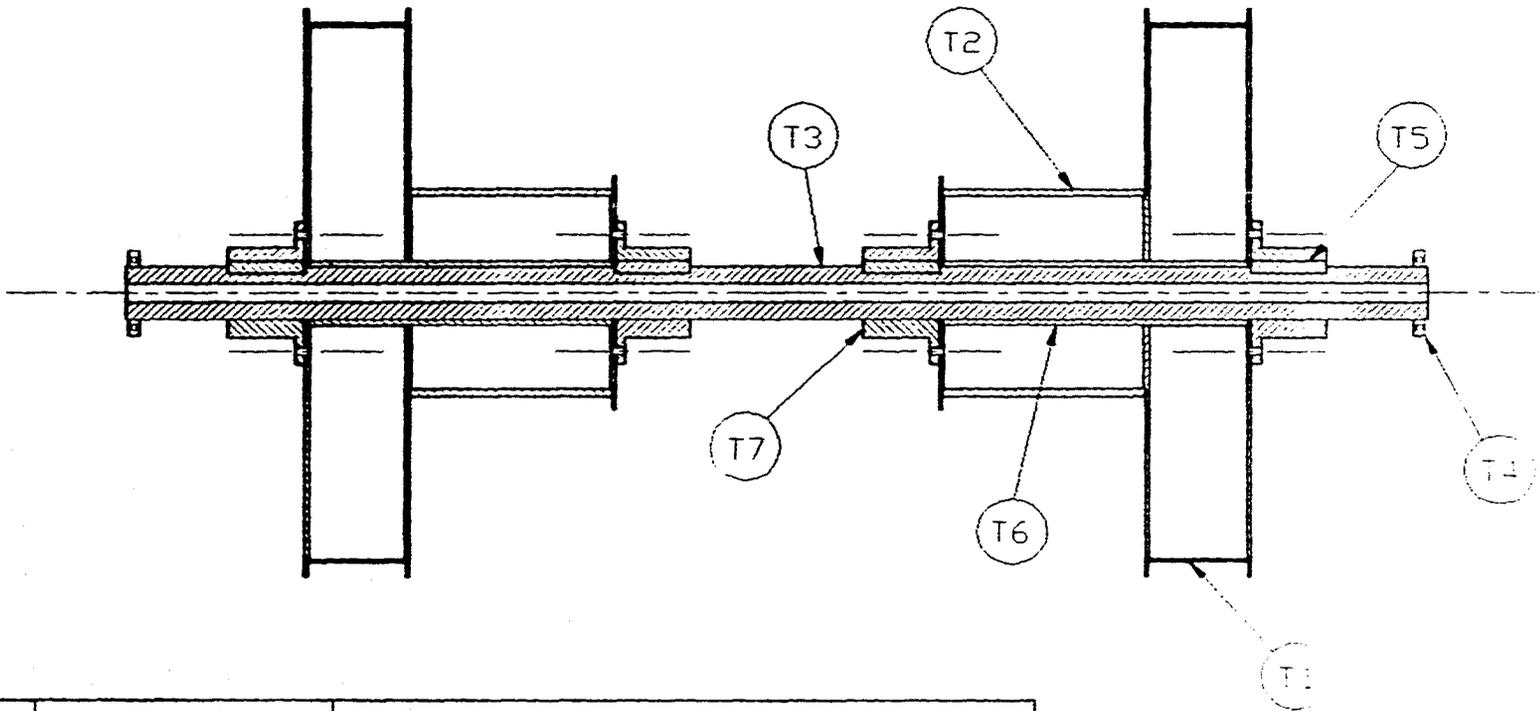
DIB: FIP

ACBT: mm (pulg)

AUT: MNM

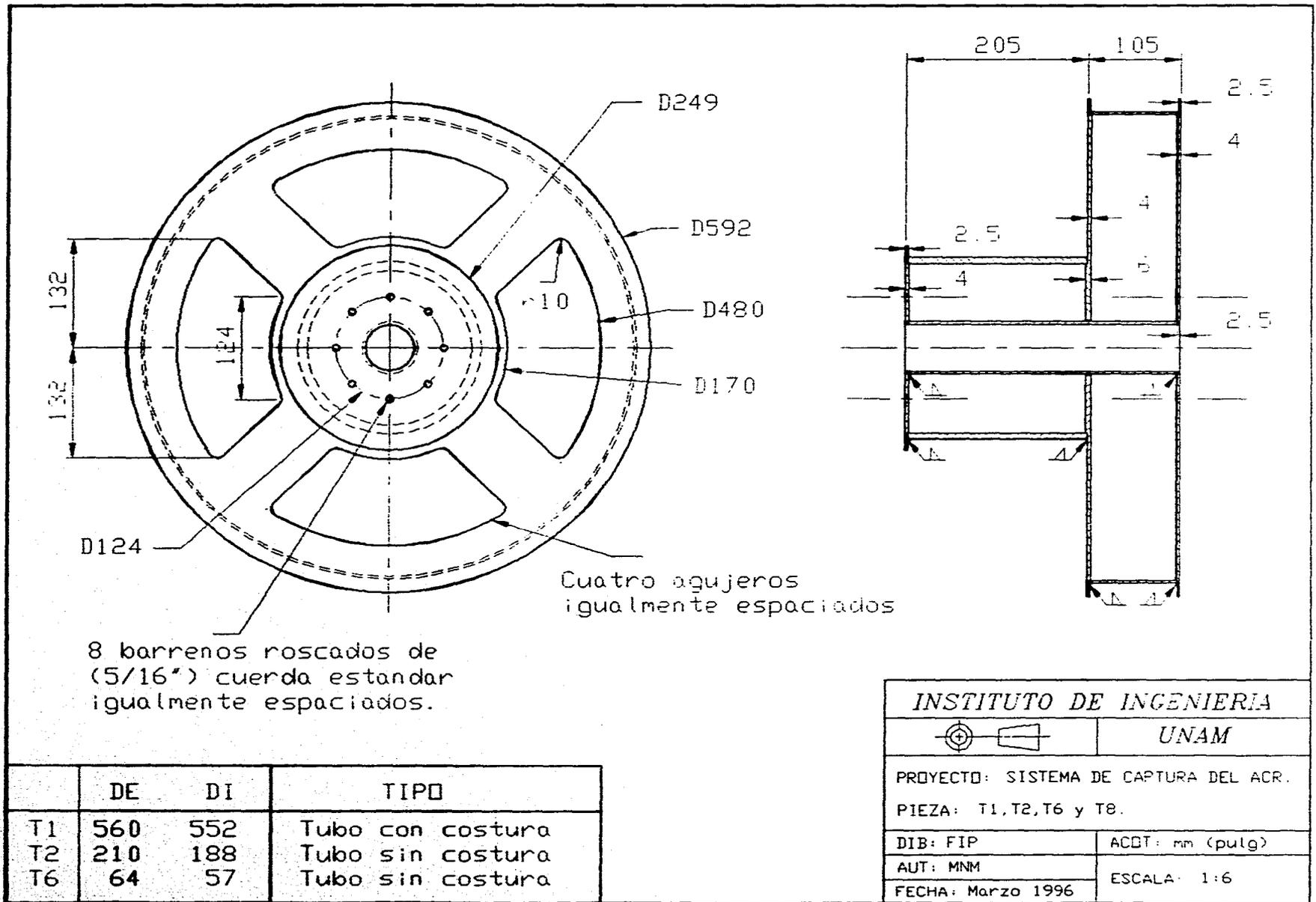
ESCALA: 1:5

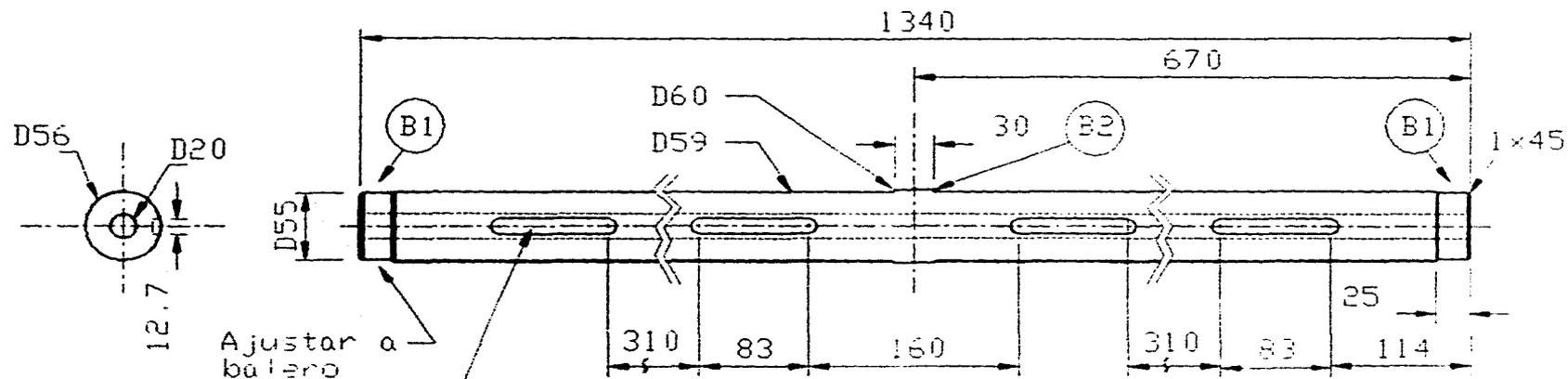
FECHA: Marzo 1996



No.	PIEZA	MATERIAL
T1	TAMBOR Tt1	ACERO 1035 COLD DRAWN
T2	TAMBOR Tt2	ACERO 1040 COLD ROLLED
T3	EJE	ACERO 302 INOXIDABLE
T4	BALEROS	CONSULTAR AL PROVEEDOR
T5	CUÑA	ACERO 1020 COLD ROLLED
T6	TUBO GUIA	ACERO 1040 COLD ROLLED
T7	BRIDA	ACERO 1040 COLD ROLLED

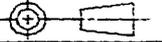
INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: TRANSMISION	
DIB: FIP	ACOT:
AUT: MNM	ESCALA: 1:7
FECHA: Marzo 1996	

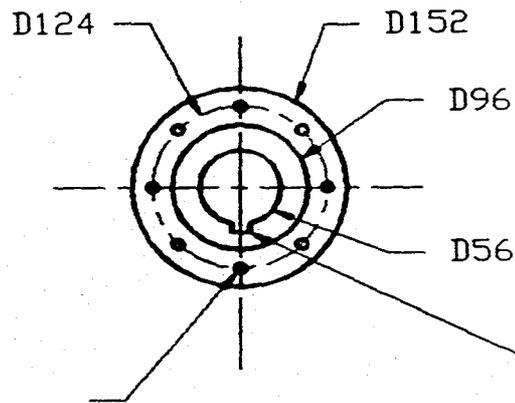




4 cuñeros de
1/2"x83mm de
largo y 6.4 mm
de profundidad.

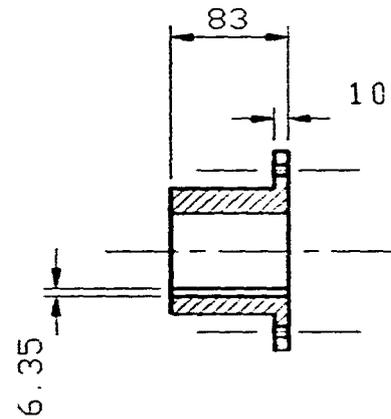
BALERO	DE	DI	ANCHO	RADIO DE FILETE
B1	90	55	18	2
B2	95	60	18	2

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: T3 y T4.	
DIB: FIP	ACOT: mm (pulg)
AUT: MNM	ESCALA: 1:5
FECHA: Marzo 1996	

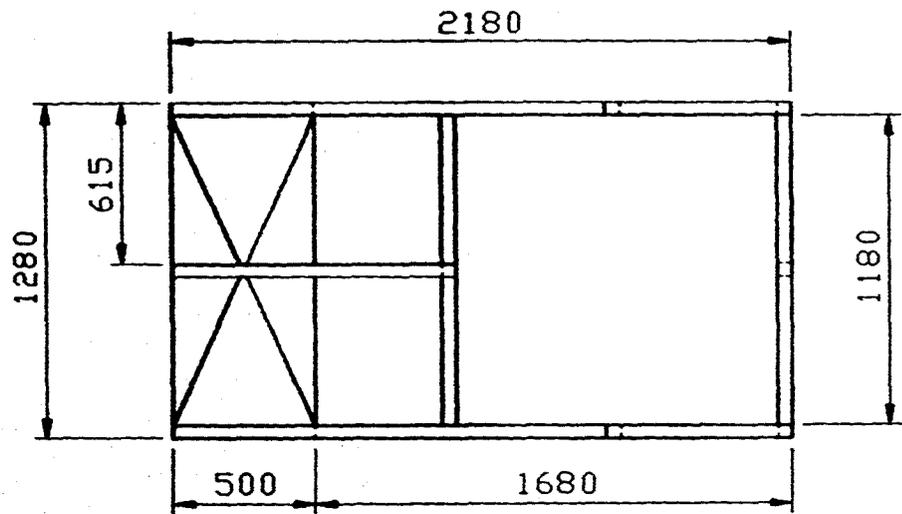


8 barrenos pasados
de 8mm de diámetro
(5/16) igualmente
espaciados

Canal para cuña
12.7 de ancho x 6.35 de
profundidad x 83 de
longitud

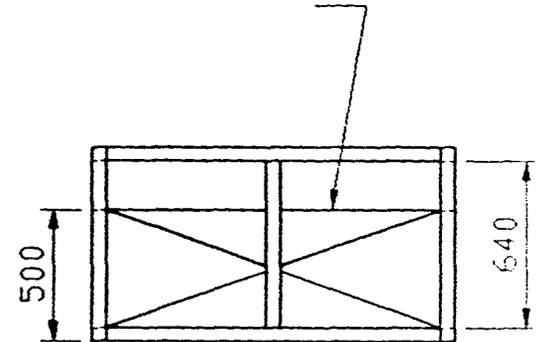
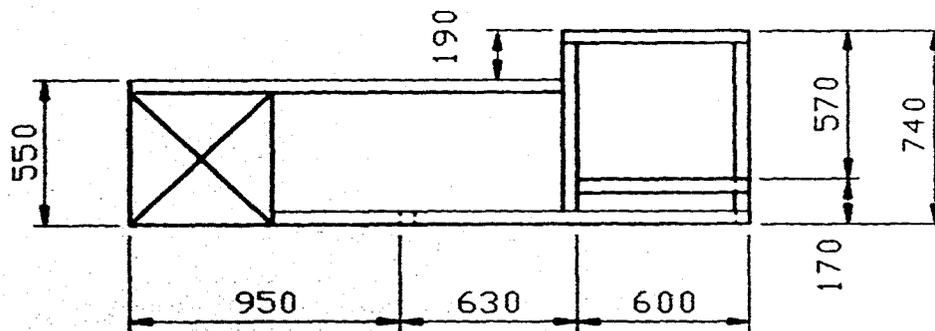


INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: T7	
DIB: FIP	ACOT: mm (pulg)
AUT: MNM	ESCALA: 1:5
FECHA: Marzo 1996	



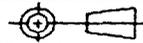
NOTA: Todos los elementos son perfiles estructurales cuadrados huecos (PTR), de 64x64x3 mm

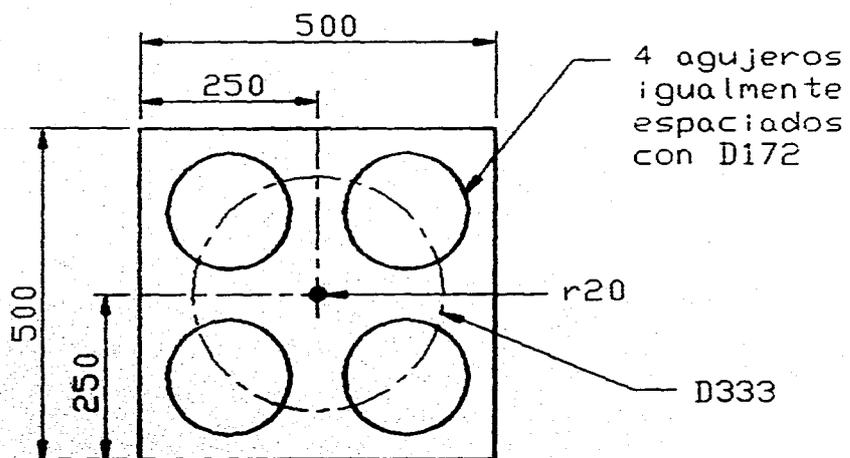
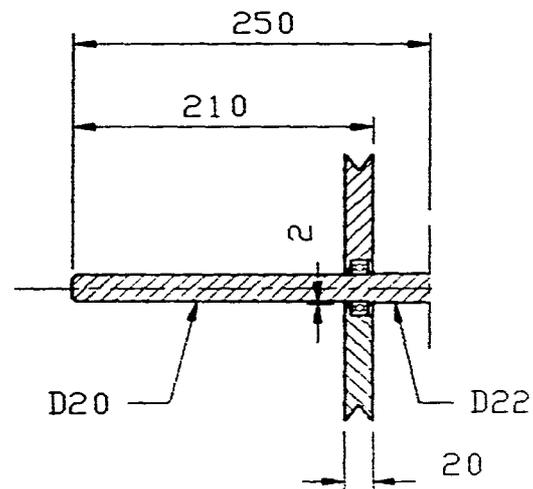
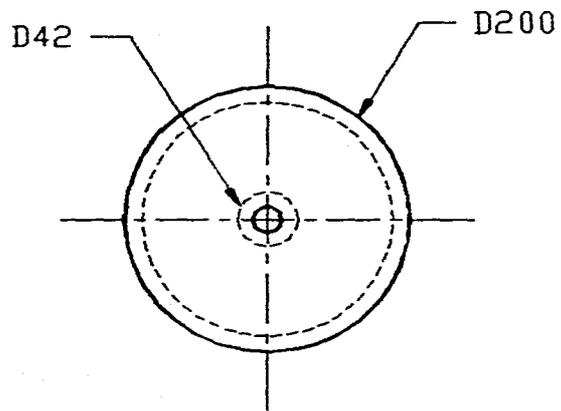
Estructura transversal del sistema de recuperación



Los perfiles cuadrados se unen con placas de acero de 64x128x2 mm y con tornillos de (1/4") de diámetro.

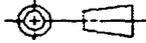
Esc. 1:100

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA REDUCTORES Y TRANSMISION	
DIB: FIP	ACOT: mm
AUT: MNM	ESCALA: 1:25
FECHA: Marzo 1996	



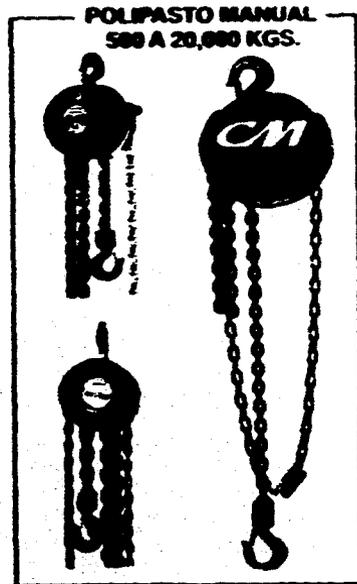
Placa de 3mm de espesor para sujeción de la polea. Acero 1040 cold rolled. Esc 10:1

NOTA: El eje de la polea se solda en la placa con un ángulo de 27° con respecto a la horizontal en la perforación central

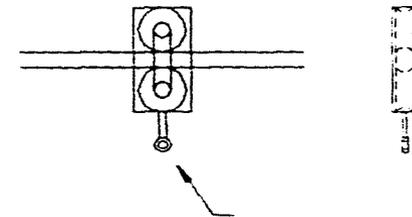
INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: POLEAS	
DIB: FIP	ACOT: mm
AUT: MNM	ESCALA: 1:5
FECHA: Marzo 1996	

DETALLE DE ENSAMBLE

Los cables guía se ensamblan a los postes de 5.50 m por medio de un polipasto.



Pieza 13



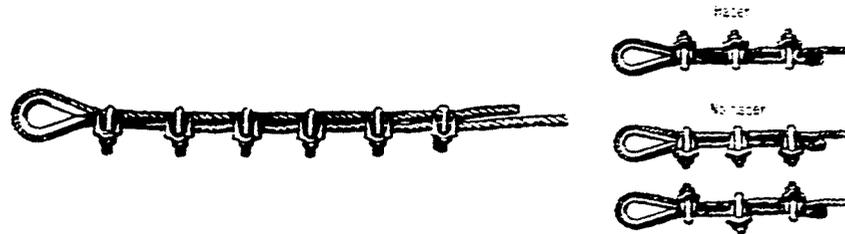
Gancho que sujeta a la red

Nota: Las piezas 13 colocadas en los extremos inferiores de la red deben contar con un dispositivo que les impida el movimiento a su posición inicial.

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Pieza 13	
DIB: Monterrubio	ACDT: mm. (pulg.)
AUT: Navarrete	ESCALA:
FECHA: 6-Mar-96	

DETALLE DE ENSAMBLE

Número de mordazas que deben colocarse



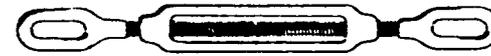
Número de ajustes y características dimensionales

Diámetro del cable		Número de ajustes		Espaciado de las mordazas	Longitud muerta del cable	Observaciones
En pulgadas	En mm	Cables ordinarios de alma vegetal	Cable de alta resistencia sobre alma metálica y anfibrona			
	5 a					En caso de duda sobre la longitud entre ajustes tomar diámetro del cable por 8
	12	3	4			
1/2	12,7	4	5	0,069	0,305	
5/8	15,9	4	5	0,108	0,305	
3/4	19	4	5	0,127	0,457	
7/8	22,2	5	6	0,146	0,457	
1	25,4	5	6	0,165	0,609	
1 1/8	28,6	6	7	0,180	0,609	
1 1/4	31,2	6	7	0,200	0,609	
1 3/8	35,4	6	7	0,220	0,609	
1 1/2	38,1	7	8	0,240	0,609	
	38 a					
	50	7	8			

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Ensamble de los cables	
DIB: Monterrubio	ACOT: mm. (pulq.)
AUT: Navarrete	ESCALA:
FECHA: 6-Mar-96	

DETALLE DE ENSAMBLE

fuera práctica	Diámetro	A	B
Kg	mm	mm	mm
60	6	90	140
75	8	94	200
120	10	115	220
170	12	141	270
230	14	157	340
310	16	178	380
400	18	199	420
500	20	220	460
600	22	241	500
700	24	262	540
900	27	292	600
1 100	30	330	660
150	8	94	210
250	10	115	250
400	12	141	300
600	14	157	350
800	16	178	410
1 000	18	199	450
1 200	20	220	480
1 500	22	241	520
2 000	24	262	560
2 500	27	292	600
3 200	30	330	660
4 000	33	330	710
5 000	36	378	770
7 000	39	420	850



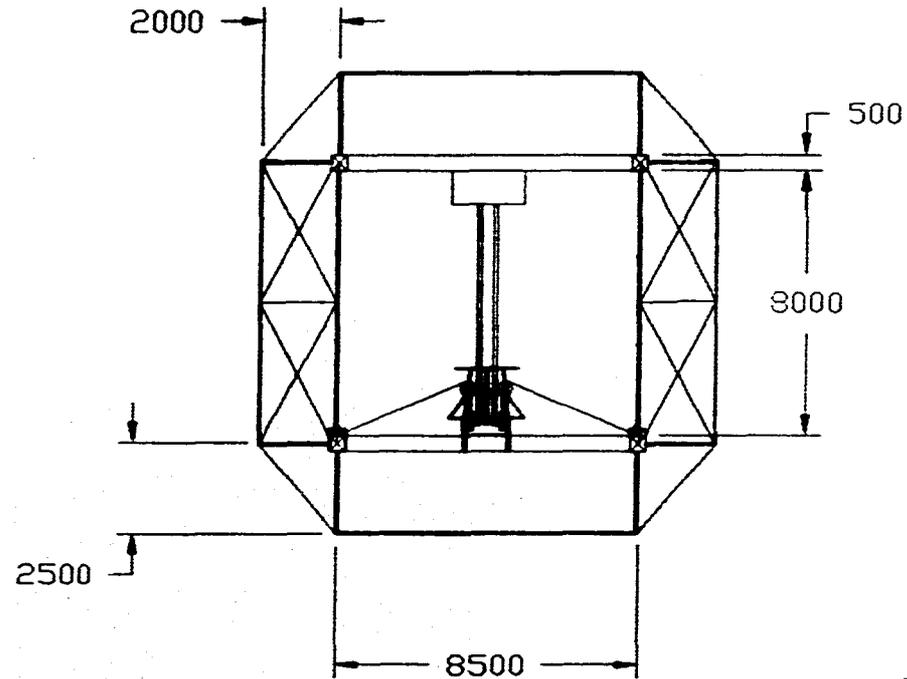
Tensor de dos ojos ovalados

(Clasé FEcole)

Los tensores se sujetan de ganchos soldados a la estructura.

INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Ensamble de los cables	
DIB: Monterrubio	ACOT: mm. (pulg.)
AUT: Navarrete	ESCALA:
FECHA: 6-Mar-96	

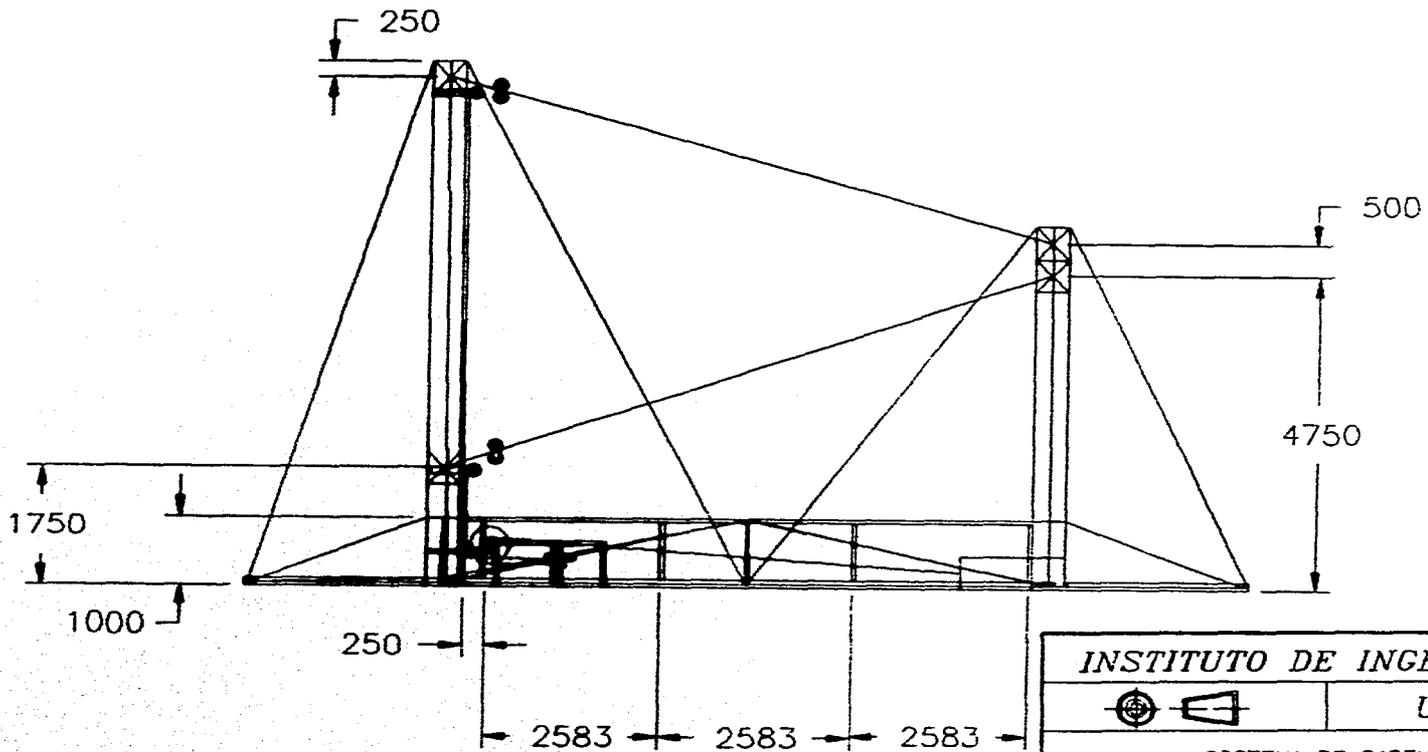
VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA DE RECUPERACION



Las vistas del sistema de recuperación acotadas se utilizan para encontrar las dimensiones de las piezas de la estructura.

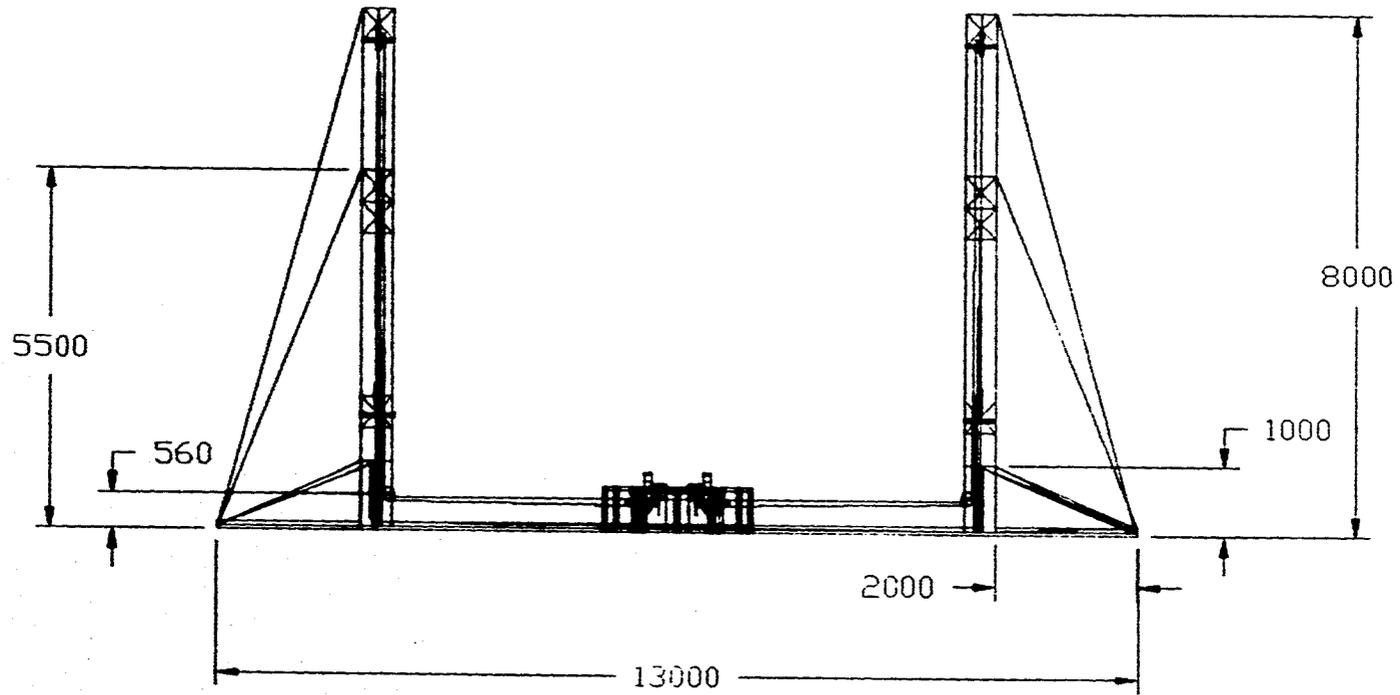
INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Vista superior del S. R.	
DIB: Monterrubio	ACOT: mm.
AUT: Navarrete	ESCALA: 1:300
FECHA: 6-Mar-96	

VISTA LATERAL DEL SISTEMA DE RECUPERACION



INSTITUTO DE INGENIERIA	
	UNAM
PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.	
PIEZA: Vista lateral del S. R.	
DIB: Monterrubio	ACOT: mm.
AUT: Navarrete	ESCALA: 1:100
FECHA: 6-Mar-96	

VISTA FRONTAL DEL SISTEMA DE RECUPERACION



INSTITUTO DE INGENIERIA
UNAM

PROYECTO: SISTEMA DE CAPTURA DEL ACR.
PIEZA: Vista Frontal del S. R.

DIB: Monterrubio ACDT: mm.

AUT: Navarrete

FECHA: 6-Mar-96

ESCALA: 1:100

BIBLIOGRAFIA

1. Aviation Week and Space Technology, USA, (varias publicaciones).
2. Revista Dornier Post, Alemania, (varias publicaciones).
3. Jane's Defense Data, All the world RPV's, Ed. por John W. R. Taylor Jane's Information Group Ltd U.K. 1988-89.
4. Technical Report, UAV Complex based on KAI-112 vehicle, Jharkov Aviation Institute, URSS 1991.
5. Revista RC Modeler, USA, (varias publicaciones).
6. Airborn Systems Marketing. Israel Aircraft Industries Ltd. Ben Gurion International Airport.
7. Foreign Military Review, URSS 1990.
8. Folleto de Aeronaves de Control Remoto para Teledetección. Laboratorio de Ingeniería Aeroespacial UNAM 1984.
9. F. P. Beer y E. R. Johnston, Jr., Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica, 5ta ed. Mc Graw Hill México 1990.
10. F. P. Beer y E. R. Johnston, Jr., Mecánica de Materiales, 1a. ed en español, Mc. Graw Hill, México 1988.
11. J.L. Merlam, Dinámica, 2da. edición, Ed. Reverté S.A. España 1980.
12. E. Oberg, F. D. Jones and H. L. Horton, Machinery's Handbook, 22nd. edition, Industrial Press Inc. New York 1984.
13. J. Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, McGraw Hill, México 1989.
14. Revista Interavia, USA, (varias publicaciones).
15. Airborne Reconnaissance XVII, Proceedings of SPIE, USA vol 2023, 12-14 July 1993. San Diego California.
16. T. Baumeister, E. A. Avallone, T. Baumeister III, Marks Manual del Ingeniero Mecánico., Mc Graw Hill, México 1984.
17. R. J. Roark y W. C. Young, Formulas for Stress and Strain, Fifth edition, Mc. Graw Hill, USA 1975.
18. Programa standard FAG, catálogo 41 500/2 SE, FAG Interamericana Miami, Alemania Oriental 1979.
19. P. H. Black y O. E. Adams, Jr., Machine Design, International Student Edition. Mc. Graw Hill Kogakusha, LTD. 1988.
20. Enciclopedia Salvat de la Ciencia. Como funciona. vol 2 No. 15, 1980.
21. Revista High Technology, p. 38-43. USA, Enero 1987.
22. Martin y Eric Hollmann, ABC'S of Desktop Finite Element Analysis. Editado por Aircraft Designs, Inc. USA 1988.
23. El Acero en la Construcción, Editorial Reverté S. A., España 1972.