

REVISTA ENERGETICA

27

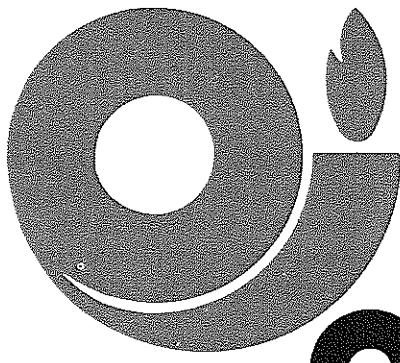
Septiembre - Octubre/82
September - October/82



Organización Latinoamericana de Energía
Latin American Energy Organization

EL DESARROLLO DEL POTENCIAL HIDROELECTRICO DEL RIO CARONI
DEVELOPING THE HYDROELECTRIC POTENTIAL OF THE CARONI RIVER
CARBON, LIGNITO Y TURBA EN BRASIL **olade** COAL, LIGNITE AND PEAT IN BRAZIL
olade CUENCA SEDIMENTARIAS Y POTENCIAL PETROLERO EN GUATEMALA
olade SEDIMENTARY BASINS AND THE OIL POTENTIAL OF GUATEMALA **olade**
MOLINOS DE VIENTO PARA BOMBEO DE AGUA **olade** WINDMILLS FOR PUMPING
WATER

olade
olade



olade

27

SEPTIEMBRE - OCTUBRE/82
SEPTEMBER - OCTOBER/82

ORGANO DE DIVULGACION TECNICA
DE LA ORGANIZACION LATINOAMERICANA
DE ENERGIA (OLADE)

PERIODICAL FOR DISSEMINATION
OF THE LATIN AMERICAN ENERGY ORGANIZATION

EDITORIAL 3

EDITORIAL 83

✓151 EL DESARROLLO DEL POTENCIAL HIDROELECTRICO DEL RIO CARONI 5
maps, tabs

DEVELOPING THE HYDROELECTRIC POTENTIAL
OF THE CARONI RIVER 85

✓152 CARBON, LIGNITO Y TURBA EN BRASIL 17
tabs.

COAL, LIGNITE AND PEAT IN BRAZIL 97

✓153 CUENCA SEDIMENTARIAS Y POTENCIAL PETROLERO EN GUATEMALA 27
maps, tabs, graphs, diagrs

SEDIMENTARY BASINS AND THE OIL POTENTIAL
OF GUATEMALA 107

✓154 MOLINOS DE VIENTO PARA BOMBEO DE AGUA 39
graphs, tabs, diagrs

WINDMILLS FOR PUMPING WATER 119

Los artículos firmados son de la exclusiva responsabilidad de sus autores y no expresan, necesariamente, la posición oficial de la Secretaría Permanente. Toda colaboración deberá ser dirigido a la Coordinación de RR.PP., Información y Difusión de OLADE: Casilla 6413 C. C. I., Quito, Ecuador.

The signed articles are the exclusive responsibility of their authors, and they do not necessarily express the official position of the Permanent Secretariat. Any remarks should be directed to the Office of Diffusion, OLADE, Casilla 6413 C. C. I., Quito, Ecuador.

EDITORIAL

El Programa Latinoamericano de Cooperación Energética —PLACE— puede ser concebido como el instrumento de la región para afrontar la “transición energética”, en la cual se deberá aceptar el doble reto de lograr un adecuado ritmo de desarrollo y conformar una nueva estructura de producción y consumo de energéticos, sustentados en una correcta combinación del empleo de las fuentes de energía disponibles y en el estrechamiento de los lazos de cooperación entre nuestros países.

La Hidroenergía ha sido identificada como una de las fuentes cuya evaluación y desarrollo deberá tener una de las más altas prioridades en el marco del PLACE, dada su abundancia en la región y su aún limitada explotación; para ilustrar esta afirmación, cabe señalar que el potencial hidroenergético instalable en América Latina se estima en 617.550 MW, del cual sólo se aprovecha el 7,16%.

Por otra parte, la explotación de este recurso resulta particularmente importante para la región, por su carácter renovable y no contaminante. Además, su desarrollo es altamente viable considerando que se trata de una tecnología probada y madura y que en Latinoamérica existe una suficiente experiencia acumulada, la cual se refleja en uno de los artículos incluidos en esta revista.

La experiencia y logros de EDELCA (Empresa de Electrificación del Caroní) en el desarrollo hidroenergético de la cuenca del río Caroní en Venezuela, se describe en un artículo preparado por la citada empresa. El potencial hidroeléctrico del Bajo Caroní es del orden de 16.220 MW y si a él agregamos los recursos hídricos disponibles en las cuencas altas del Caroní y del río La Paragua, el potencial disponible se eleva a 25.000 MW. Entre los proyectos del Bajo Caroní destaca la Central Hidroeléctrica “Raúl Leoni”, localizada en El Guri, cuya primera etapa, actualmente en operación, tiene una capacidad instalada de 2.565 MW y su etapa final, que se encuentra en la fase de construcción e instalación de equipos, llevaría la capacidad instalada de la central a 10.000 MW aproximadamente, pasando así a ocupar el segundo lugar en Latinoamérica en cuanto a potencia instalada, después de Itaupú, cuyas obras de embalse fueron recientemente inauguradas, con 12.600 MW.

Ya ha sido claramente identificado en el marco del PLACE, que el desarrollo energético de la región debe responder a un racional aprovechamiento del conjunto de los recursos disponibles, incluyendo aquellos como el carbón, que históricamente ocuparon un lugar marginal en la mayoría de los países de la región, pero cuyo desarrollo podrá contribuir significativamente a reducir la dependencia de los hidrocarburos.

En un artículo preparado por la Empresa CAEEB se presenta un resumen de la situación y perspectivas del desarrollo del carbón, el lignito y la turba en el Brasil. Este país, que cuenta con reservas estimadas en 23 mil millones de toneladas, se ha planteado la meta de producir 16,8 millones de toneladas anuales, lo cual permitirá sustituir 110.000 barriles por día de petróleo importado.

Como una contribución al esfuerzo de evaluación del potencial regional, los ingenieros Carlos Báez y Jaime Rodríguez presentan una descripción de las cuencas sedimentarias de Guatemala y en su artículo hacen una apreciación de su potencial petrolero seguido de una síntesis de la historia geológica, tectonismo y de una ilustración de los rasgos geológicos más importantes del país.

La búsqueda y desarrollo de fuentes de energía que puedan sustituir al petróleo no contradice sino que más bien reafirma el enorme rol que éste debe aún jugar en el panorama energético de la región, por lo que en consecuencia, el desarrollo carbonífero e hidrocarburífero tiene altas prioridades en el progreso de las actividades del Programa Latinoamericano de Cooperación Energética (PLACE).

Enrique Indacochea
Coordinador de Transferencia de Tecnología de
OLADE.

EL DESARROLLO DEL POTENCIAL HIDROELECTRICO DEL RIO CARONI

La urgente necesidad nacional de contar con energía eléctrica en cantidades suficientes para el desarrollo económico y social de Venezuela y que además pudiera generarse a bajo costo y con garantía de provisión a largo plazo, motivó al Estado a investigar las posibilidades de desarrollo hidroeléctrico del río Caroní.

En este sentido la primera central hidroeléctrica construida fue Macagua I, situada muy cerca de la ciudad de Puerto Ordaz que, desde 1960 cuando se concluyó su construcción, tiene una capacidad instalada de 370.000 kilovatios.

Estos proyectos forman parte del Sistema Interconectado Nacional que tiene como objetivo el intercambio de energía entre las principales empresas generadoras del país para superar los déficits en las llamadas horas "pico" o de electricidad mayor demanda y los ocasionados por imprevistos.

El desarrollo hidroeléctrico del río Caroní, y en general de todos los ríos venezolanos con potenciales atractivos, cobra importancia en la medida en que se demuestra el ahorro teórico de barriles de petróleo equivalentes que se hace posible, gracias a la generación de electricidad por medio del agua. Como muestra, la ya mencionada producción de electricidad de Edelca en 1980 los 13.800.000 de kilovatios/hora, generados 42,5 o/o dentro del total nacional fue equivalente a 28.842.000 barriles de petróleo, lo que repre-

sentó un ahorro teórico de 3.720.618.000 bolívares durante ese año, si se toma como referencia un precio ponderado de 129 bolívares por barril de exportación.

Cuando esté terminada la Etapa Final de la Presa de Guri, esa sola central generará el equivalente a 85 millones de barriles al año o casi 233 mil barriles diarios de crudo, lo que teóricamente ahorrará, si se utiliza el mismo precio conservador citado, unos 11.000 millones de bolívares anuales.

La tarea de la empresa de electrificación del Caroní (EDELCA) es la de aprovechar íntegramente el vasto potencial hidroeléctrico del Caroní, y su política es la de promover el agua como fuente alterna de energía en Venezuela, para disminuir el uso de combustibles fósiles en la generación de electricidad, puesto que esos hidrocarburos podrían ser mejor invertidos en la exportación, en la industria petroquímica o sencillamente, dejándolos en el subsuelo como futuras reservas.

EL RIO CARONI

La fuente energética renovable más importante de Venezuela, nace cerca de la frontera con Brasil, y tiene un largo recorrido de sur a norte de aproximadamente 640 kilómetros hasta su desembocadura en el río Orinoco, cerca de Puerto Ordaz, Estado Bolívar.

La parte del río denominado Bajo Caroní, que son los últimos 215 kilómetros de recorrido,

posee un potencial hidroeléctrico de 16.220.000 de kilovatios, característica afortunada y especial que ubica este tramo del río entre uno de los principales del mundo en su género.

Los estudios realizados en la década del 40 y durante la primera mitad de la del 50 confirmaron las apreciaciones iniciales sobre el potencial hidroeléctrico del río Caroní y desde entonces se pensó firmemente en desarrollarlo con fines energéticos, idea cuya realización ha posibilitado la creación del emporio industrial de Guayana, en el Estado Bolívar.

Las características del río Caroní pueden resumirse así:

a) Posee una gran hoyuela hidrográfica que cubre aproximadamente 94.500 kilómetros cuadrados, de los cuales 47.000 corresponden al denominado Alto Caroní desde su nacimiento hasta la confluencia con La Paragua; 32.500 kilómetros cuadrados a la hoyuela de este último río y 15.000 kilómetros cuadrados al llamado Bajo Caroní, entre su unión con La Paragua y su desembocadura con el Orinoco.

b) Cuenta con una gran precipitación media anual en la hoyuela, que de acuerdo con los registros históricos alcanza a 2.561 milímetros al año.

c) Tiene un importante desnivel estimado en 912 metros desde su cabecera hasta su desembocadura en el río Orinoco, con una pendiente de 1,43 metros por kilómetro de recorrido. En la sección de mayor potencial hidroeléctrico, la correspondiente al Bajo Caroní, hay un desnivel de 240 metros en 215 kilómetros, es decir que la pendiente es de 1,12 metros por kilómetro de recorrido.

d) El río tiene numerosas caídas y raudales naturales a lo largo de su curso entre los que se

destacan Merecual, Merecotos, Morocure, Necuima, Cocuiza, Arimagua, Salto del Diablo, Tocoma, Caruachi y Macagua.

e) Cuenta con varios sitios favorables para la construcción de presas, entre los cuales se destacan Guri, Macagua, Tocoma y Caruachi en el Bajo Caroní; y en el Alto Caroní, los sitios de Tayucay, Aripichí, Eutobarima y Carroa.

f) El área drenada por el río está ocupada por un extenso bosque selvático de aproximadamente 62.500 kilómetros cuadrados de extensión, lo que garantiza un caudal natural regular durante todo el año.

g) El río corre por un excelente lecho de roca "gneiss granítico" que lo hace apto para las grandes construcciones de las presas.

h) Existen grandes depósitos de roca, arena y arcilla útiles para la construcción en las cercanías de los sitios de la presa.

i) Para la utilización de la tierra y del agua de la zona, prácticamente no existen restricciones, debido a la escasa población y al escaso desarrollo de la actividad agrícola.

PROYECTOS FUTUROS DE DESARROLLO DEL RÍO CARONÍ

Ya han sido estudiados los posibles sitios de presa existentes en el Bajo Caroní y en las cuencas altas de los ríos Caroní y La Paragua. Los resultados y adelantos de tales investigaciones se ofrecen a continuación:

a) EN EL BAJO CARONÍ

Los llamados proyectos intermedios del río Caroní tienen como objetivo el desarrollo del potencial hidroeléctrico existente entre los actuales

embalses de Guri y Macagua y consisten fundamentalmente en la construcción de presas en los sitios Macagua II, Caruachi y Tocoma, entre las cuales se podrá alcanzar en conjunto una capacidad instalada total de 6.985.000 kilovatios, los cuales, sumados a los kilovatios que ya estarán instalados en Guri y en Macagua I, totalizarán más de 16.000.000 de kilovatios.

La secuencia en la construcción de estos aprovechamientos será Macagua II, Caruachi y Tocoma. Se calcula que la construcción de Macagua II tardaría seis años y se podría obtener energía de sus primeras unidades al cabo de los primeros cinco. Para los proyectos de Caruachi y Tocoma se requeriría aproximadamente un plazo de construcción de ocho años y sus primeras unidades podrían empezar a generar al final de los primeros seis.

Las características principales de estos proyectos intermedios son:

MACAGUA II

Aproximadamente a unos 18 kilómetros por carretera de Puerto Ordaz en el Estado Bolívar y al lado de la actual presa de Macagua I se construirá otra casa de máquinas con trece unidades y una capacidad instalada de 2.300.000 kilovatios en su desarrollo; se le adicionarán tres unidades más para generar una potencia de 2.570.000 kilovatios.

El área máxima de embalse será de 58 kilómetros cuadrados, y el nivel del agua estará a cota 54,5. Esta presa resulta ser la más económica de los proyectos intermedios y por eso se le dará prioridad.

CARUACHI

Cerca del paso de Caruachi y a 43 kilómetros de distancia aguas abajo de la presa hidroeléctrica

de Guri se encuentra el sitio de Caruachi, donde se construirá una presa y una casa de máquinas con dieciocho unidades para generar 2.660.000 kilovatios. El nivel de embalse estará aproximadamente a una cota de 96 metros y el área máxima afectada por este será de 427 kilómetros cuadrados.

TOCOMA

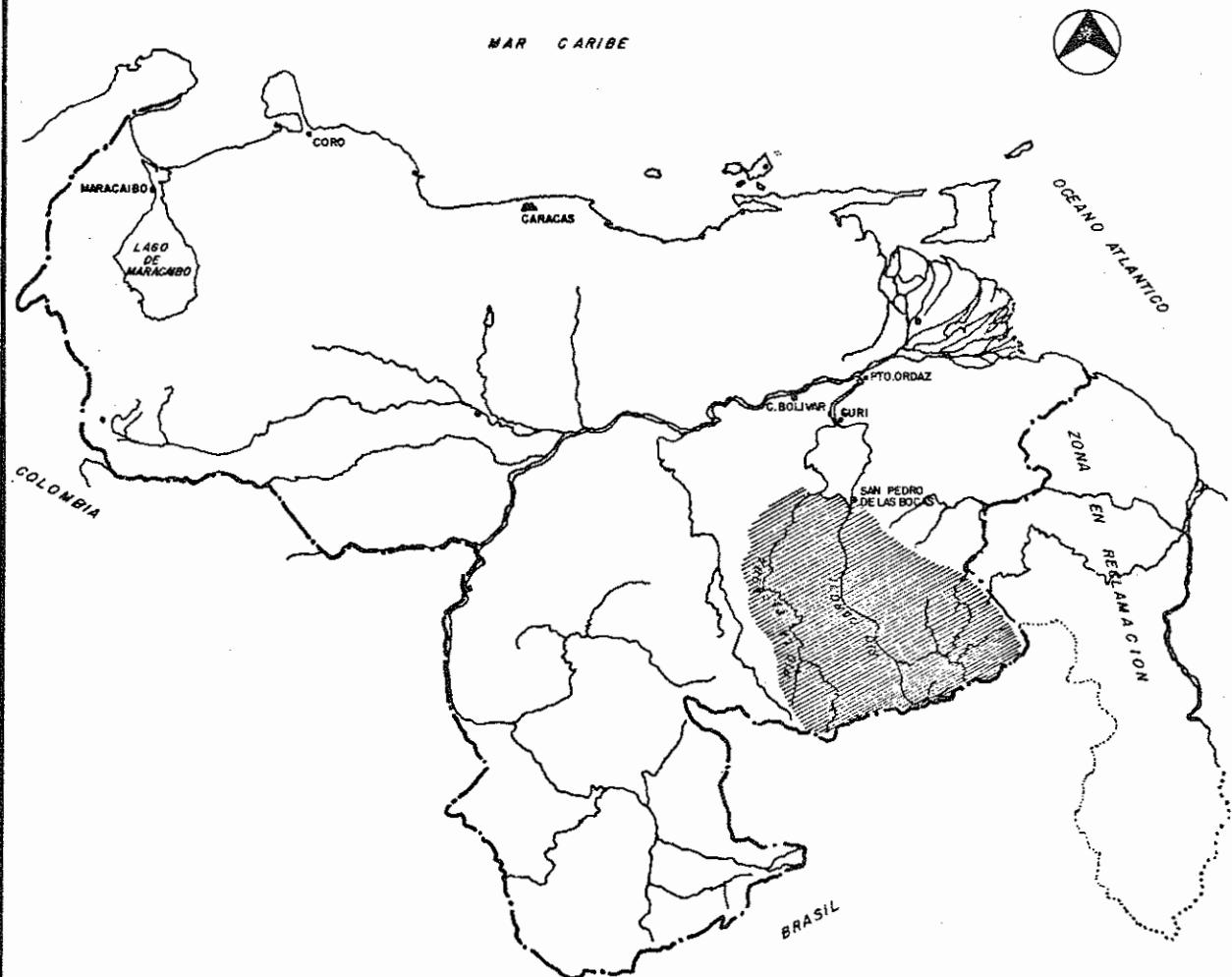
El sitio de Tocoma queda a unos 9 kilómetros de distancia aguas abajo de Guri. Se caracteriza por tener muchos islotes por lo que para embalsar el agua será necesario construir cuatro tapones. La casa de máquinas tendrá nueve unidades de generación en su desarrollo inicial y tres más en el final. La potencia instalada en su primera etapa será de 1.320.000 kilovatios y en la segunda se le sumarán 435.000 kilovatios para un total de 1.755.000 kilovatios. La cota del espejo de agua estará aproximadamente a 125 metros sobre el nivel del mar, y la superficie máxima del área afectada por el embalse será de 88 kilómetros cuadrados.

LAS CUENCAS ALTAS DEL CARONÍ Y LA PARAGUA

El inventario del potencial hidroeléctrico realizado en las cuencas altas de los ríos Caroní y La Paragua arroja como resultado la selección de seis sitios aprovechables cuya potencia instalable total sería de unos 8.900.000 kilovatios. El aprovechamiento hidroeléctrico de estas cuencas constituye los proyectos futuros de desarrollo del río Caroní, que están antecedidos por los proyectos intermedios del Bajo Caroní y por Guri, que es el proyecto en ejecución, los cuales, por razones económicas y prácticas, son prioritarios.

El área ocupada por estas cuencas se ubica políticamente en los distritos Heres, Piar y Roscio del Estado Bolívar y cubre una superficie total de 84.489 kilómetros cuadrados. (Ver gráfico anexo). Su relieve se caracteriza por tener frecuen-

UBICACION DE LAS CUENCAS ALTAS DE LOS RIOS
CARONI Y LA PARAGUA



LEYENDA

CUENCAS ALTAS - RIOS CARONI Y LA PARAGUA.

tes desniveles respecto a los valles circundantes, donde la vegetación es baja y generalmente densa. El clima es templado en las formaciones montañosas y tepuyes en la Gran Sabana, pero el predominante en la cuenca es el clima lluvioso cálido.

Los centros poblados que existen en el área están constituidos por campamentos misioneros, indígenas y mineros.

Las posibilidades de desarrollos agrarios fueron descartadas debido al bajo contenido de nutrientes en el suelo, que como máximo, según un estudio realizado por el Instituto Agrario Nacional en 1971, sirven para permitir una economía de subsistencia.

APROVECHAMIENTOS SELECCIONADOS EN EL ALTO CARONÍ Y LA PARAGUA

Del total de los 34 sitios de posible aprovechamiento incluidos en el inventario, fueron descartados 28 y seleccionados los siguientes: en la subcuenca del Caroní, los sitios escogidos fueron Tayucay, Aripichí, Eutobarima, Carrao No. 1 y Carrao No. 2, y en la subcuenca de La Paragua se seleccionó el sitio de Tonoro.

Una consecuencia importante del desarrollo de estos sitios sería la regulación del caudal que entra a Guri, que hasta entonces sería natural como lo es actualmente. Es decir, que debido a que los futuros embalses estarán situados en el Alto Caroní, los aportes de agua serían regulados a partir de estos aprovechamientos, lo cual aumentaría aproximadamente en un 10 o/o la energía generada en Guri para ese momento.

La construcción de los embalses seleccionados inundaría una extensión de aproximadamente 5.700 kilómetros cuadrados, que constituyen el 6,8 o/o del total de las cuencas de los ríos Caroní y

La Paragua aguas arriba de San Pedro de Las Bocas, por lo tanto, su impacto ambiental deberá ser evaluado paralelo a la etapa de prefactibilidad.

DESCRIPCION DEL PROYECTO DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA "RAÚL LEONI"

El sitio de Guri, donde se está llevando a cabo el proyecto de la presa "Raúl Leoni", está localizado a unos 90 kilómetros aguas arriba de la confluencia del Caroní con el Orinoco en Ciudad Guayana. La ejecución total de este proyecto hará posible regular hasta un 95 o/o del caudal anual del río en beneficio de Macagua I y de las futuras centrales Macagua II, Caruachi y Tocoma que serán los próximos aprovechamientos del Bajo Caroní.

Para poder construir la central hidroeléctrica "Raúl Leoni" fue necesario represar las aguas del río Caroní en el sitio de Guri, embalse que dio origen a un lago de 800 kilómetros cuadrados. Cuando se produjo la inundación por causa del represamiento, se realizó la llamada "Operación Rescate" mediante la cual fueron rescatadas de la zona más de 18.000 animales y una apreciable cantidad de valiosos petroglifos.

Plan Inicial de Desarrollo

Originalmente el Proyecto de Guri fue concebido para construirlo en tres etapas sucesivas, que eran las siguientes:

Primera Etapa: Con este nombre se designó al proyecto de la Presa actualmente en funcionamiento, que tiene una cota de 215 metros y una casa de máquinas que alberga 10 unidades generadoras. Comenzó a construirse en noviembre de 1968 y quedó totalmente en servicio a finales de 1977. La capacidad instalada en esa primera

etapa es la misma que ahora posee, 2.565.000 kilovatios.

Segunda Etapa: Se llamaba de esta manera a la fase de desarrollo del proyecto según la cual se pensaba elevar el nivel del embalse 20 metros más hasta llevarlo a la cota 235. También en esta segunda etapa se proyectaba instalar seis unidades generadoras en una segunda casa de máquinas, con lo que se añadirían 2.200.000 kilovatios.

Tercera Etapa: Sería la última fase del proyecto. Se trazaba como objetivo realizar la presa hasta la cota 265 y adicionar otras ocho unidades generadoras en la Segunda Casa de Máquinas, para completar un total de 6.500.000 kilovatios instalados en Guri.

EL PROYECTO ACTUAL: LA ETAPA FINAL

El Proyecto tal como está concebido actualmente, es diferente al inicial y consiste en el desarrollo continuo de la segunda y tercera etapas previstas anteriormente, con ciertos ajustes en cuanto al nivel del embalse y al tamaño, capacidad y número de unidades.

Razones como el aumento de los precios del petróleo, la conciencia clara de las necesidades energéticas del país y los adelantos tecnológicos ocurridos, modificaron varias pautas del proyecto original, como la elevación de la cota y la potencia de las unidades hidrogeneradoras. La cota máxima del embalse prevista en un principio, decidió elevarse 7 metros más para llevarla a los 270 metros con el fin de generar en el sitio la mayor cantidad posible de energía. Asimismo, las unidades seleccionadas en aquel entonces tenían una capacidad no mayor de 450.000 kilovatios cada una. Ahora, en el proyecto de la Etapa Final está previsto instalar generadores de 700.000 kilovatios de potencia, cambios estos con los cuales

se logrará aumentar la capacidad de generación de Guri aproximadamente hasta unos 10.000.000 kilovatios.

En general, el Proyecto Guri-Etapa Final consiste en:

- a) Realizar la Presa de Gravedad Principal y el Aliviadero existentes hasta la cota 272.
- b) Construir dos nuevas presas de gravedad a la margen derecha e izquierda del río.
- c) Construir una nueva casa de diez máquinas al pie de la nueva Presa de Gravedad, situada en la margen derecha del río.
- d) Construir dos Presas de Tierra y Enrocamiento en los estribos de las Presas de Gravedad.
- e) Construir diques en la margen derecha e izquierda del embalse.

Se calcula que entre todas las estructuras de concreto de la Etapa Final serán colocados unos 6.600.000 metros cúbicos de concreto.

Las compuertas de toma de las unidades 1, 2 y 3 de la primera casa de máquinas serán modificadas para soportar la carga adicional impuesta por los nuevos niveles del embalse y todos los mecanismos de operación de las compuertas serán reubicados para que la construcción de la Etapa Final no interfiera en el funcionamiento de las 10 unidades ya instaladas.

Una vez que todas las estructuras del embalse y control de agua hayan alcanzado el nivel actual de la presa, podrá procederse a la remoción de la Presa de Enrocamiento existente hasta el nivel inferior de las nuevas tomas.

Obras Preliminares

La importancia del proyecto, la magnitud y corto plazo de ejecución de las obras y las necesidades del sitio derivados de su ubicación, obligaron a planificar y subsecuentemente construir una serie de obras preliminares dedicadas a prestar servicio al proyecto durante su ejecución y servir de vías de acceso de mano de obra y suministro de materiales. También se ha juzgado necesario adquirir y montar aquellos equipos y plantas de construcción que requieren extensos plazos de tiempo para entrar en condiciones de operación, tales como una planta de producción de agregados con una capacidad de 2.700 toneladas métricas por hora; una planta de producción de concreto con una capacidad de 500 metros cúbicos por hora; una planta de producción de hielo de 540 toneladas por día para enfriamiento de concreto; y el viaducto de construcción que es una estructura metálica de 11.000 toneladas de acero con un ancho de 14 metros y una longitud de 1.600 metros, por donde se desplazan los trenes que transportan el concreto y 8 grandes grúas para el vaciado.

Se consideró conveniente la construcción de carreteras que, en lo posible, dentro del plan de vialidad regional, enlazaran más directamente los centros poblados de Guayana —como Ciudad Bolívar, Puerto Ordaz y Upata— con Guri. También se efectuó la construcción de accesos temporales y permanentes dentro del sitio, debido a que una vez comenzados los trabajos se perderían los accesos existentes sobre la Presa y las nuevas áreas de construcción.

Además, se requería ampliar las instalaciones y los servicios para dar facilidades a un personal que se estima actualmente cercano a las 20.000 personas. Para ello se construyeron nuevos campamentos para trabajadores y contratistas que en el futuro podrán ser punto de partida de un centro turístico.

Casa de Máquinas No. 2

La nueva Casa de Máquinas, construcción que servirá de albergue a los equipos generadores, tendrá 58 metros de ancho por 280 metros de largo, y en su interior estarán ubicadas 10 unidades, exactamente aguas abajo de la Presa de Gravedad Principal, al este de la Casa de Máquinas existente.

Los vanos para la ubicación de los generadores están aguas abajo de los monolitos 1, 2 y 3 y desde el No. 22 hasta el No. 28. Las galerías para los canales de ventilación, cables y módulos de interruptores están ubicados en la sección inferior de la estructura. Las extensiones verticales de las vigas del techo sirven como sostén de las líneas de transmisión que salen al Patio de Distribución.

La mayoría de las instalaciones de servicio están ubicadas en la nave de montaje que a su vez se divide en dos áreas: la sala de generadores o sección aguas arriba y la sección aguas abajo. La sección aguas arriba se destinará para la estación de bombeo, almacenamiento e instalaciones de purificación de aceite, compresores de aire, estación de baterías, taller y almacén eléctrico, taller mecánico, área de construcción y área de descarga. La sección aguas abajo consta de cuatro pisos e incluye la toma de aire, planta de tratamiento de aguas negras, galería para extensión de cables, oficinas e instalaciones.

Realzamiento del Aliviadero:

El aliviadero actual, que tiene un ancho total de 183,76 metros, está dividido en tres canales, característica que le permite ser realzado progresivamente mediante un adecuado programa de construcción, manteniendo siempre dos canales en operación. La capacidad máxima de descarga de cada canal del aliviadero es de 31.000 metros cúbicos por segundo y la creciente máxima probable establecida del río con un pico de 48.100 m³/seg.

y un volumen en 23 días de 45.400 millones de metros cúbicos, con lo que se garantiza el regular mantenimiento del nivel del embalse, conveniente a los trabajos de construcción.

Cada canal del aliviadero tiene tres "vanos" de 15,24 metros de abertura, y cada vano está equipado con compuertas radiales idénticas de 20,76 metros de altura que son operadas eléctricamente y se abren o cierran de acuerdo a las necesidades de operación del embalse.

El realzamiento de esta estructura se efectuará por etapas: primero se levantarán los muros y las pilas y, sobre estas bases posteriormente serán reubicados los mecanismos de operación de las compuertas.

Otros aspectos del Proyecto

A la salida de las tuberías de la segunda Casa de Máquinas y a la derecha del Canal de Descarga existente, se excavará el Canal de Descarga No. 2, cuyo volumen de excavación en roca será de aproximadamente 15.610.000 metros cúbicos.

Para la segunda Casa de Máquinas se ha previsto un Canal de Descarga separado del primero y ubicado en el lecho seco del río a la derecha del Canal de Descarga existente, al cual se unirá aproximadamente a 2.500 metros aguas abajo de su origen.

El nuevo Canal de Descarga está diseñado para proporcionar, en condiciones operativas de pico, el máximo nivel del agua aprovechable sin intensificar con el nivel de la primera Casa de Máquinas. El suelo, a lo largo de la ruta del canal, está construido por una alta capa de gneiss que alcanza la superficie exterior por lo que la mayorfa de las excavaciones son realizadas en roca.

En los estribos derecho e izquierdo del sitio de la Presa, se requiere construir grandes presas con material de relleno, las cuales para unirlas con las presas de concreto necesitarán una sección de enrocamiento. Es importante ejecutar una excavación considerable para establecer la fundación adecuada de estas estructuras, la cual será preparada, inyectada y drenada dependiendo de la geología del subsuelo y de la topografía de la zona.

El Patio de Distribución actual está ubicado en la margen izquierda del Canal de Descarga No. 1 y para alojar las instalaciones de los circuitos de interconexión entre las nuevas unidades y las Líneas de Transmisión, se ha previsto ampliar el Patio de Distribución aproximadamente 300 metros aguas abajo del patio existente.

DATOS SIGNIFICATIVOS DEL PROYECTO GURI

Embalse	1a. Etapa		Etapa Final	
Area de la Cuenca	85.000	Km ²	85.000	Km ²
Nivel mínimo de operación	195	m	240	m
Nivel normal máximo	215	m	270	m
Nivel máximo de creciente	219,50	m	271,60	m
Area a nivel normal máximo	765	Km ²	4.260	Km ²
Volumen a nivel normal	17.700	MMC	135.000	MMC
Volumen a nivel mínimo	5.900	MMC	5.900	MMC

PRESA DE CONCRETO

Tipo de Presa	Gravedad		Gravedad	
Nivel de la carretera	220	m	272	m
Nivel del parapeto	220,91	m	273,30	m
Altura desde la fundación	110	m	162	m
Altura desde el lecho del río	100	m	152	m
Longitud de la presa de grav. derecha	493	m	996	m
Longitud de la presa de grav. izquierda	179	m	164	m
Pendiente nominal aguas abajo	0,75	H: IV	0,75	H: IV
Ancho de la cresta presa grav. derecha	2,50	m a 16,25 m	2,50	m a 21,00 m
Ancho de la presa de gravedad izquierda	3	m	11,45	m
Profundidad máxima cortina de inyección	75	m	100	m
Volumen de concreto	1.127.000	m ³	5.325.000	m ³

Aliviadero

Tipo	Ojiva	Ojiva
Tipo de Compuertas	Radiales	Radiales
Nivel de la Cresta	195,2	m
Tamaño de las compuertas	15,24 x 20,76	m
Capacidad de carga normal	28.000	m ³ /seg.
Capacidad máxima	40.000	m ³ /seg.
Volumen de concreto	327.000	m ³

**PRESA DE TIERRA Y
ENROCAMIENTO DERECHA**

	1a. Etapa	Etapa Final
Longitud de la cresta	220	m
Altura máxima desde la fundación	90	m
Nivel de la cresta	221,30	m
Ancho de la cresta	12	m
Pendiente aguas arriba	2,50	H: IV
Pendiente aguas abajo	1,75	H: IV
Volumen total	2.089.000	m ³

**PRESA DE TIERRA Y
ENROCAMIENTO IZQUIERDA**

	1a. Etapa	Etapa Final
Longitud de la cresta	—	2.000 m
Altura máxima desde la fundación	—	90 m
Nivel de la cresta	—	276 m
Ancho de la cresta	—	11 m
Pendiente aguas arriba	—	3 H: IV
Pendiente aguas abajo	—	2,50 H: IV
Volumen total	—	18.000.000 m ³



CASA DE MAQUINAS No. 1

Número de unidades	10		---
Separación entre las unidades	23	m	---
Excavación	638.000	m ³	---
Concreto	240.300	m ³	---
Turbina tipo	Francis		---
Capacidad nominal Turbinas			
Unidades 1 a 3	180,2	MW	
Unidades 4 a 6	223	MW	
Unidad 7	340	MW	
Unidades 8 a 10	370	MW	
Capacidad nominal Generadores			
Unidades 1 a 3	185	MVA	
Unidades 4 a 6	230	MVA	
Unidades 7 a 10	360	MVA	
Factor de Potencia			
Unidades 1 a 6	0,95		
Unidades 7 a 10	0,90		
Capacidad de transformadores (1 y 2)	203.500	KVA	
Capacidad de transformador (3)	212.000	KVA	
Capacidad de transformadores (4 y 6)	265.000	KVA	
Capacidad de transformador (5)	255.000	KVA	
Capacidad de transformadores (7 a 10)	420.000	KVA	

CASA DE MAQUINAS No. 2

Número de unidades	---	10	
Separación entre las unidades	---	28	m
Excavación	---	1.006.000	m ³
Concreto	---	614.000	m ³
Turbinas tipo	---	Francis Vertical	
Capacidad nominal Turbinas	---	610	MW
Capacidad nominal generadores	---	700	MVA
Factor de Potencia	---	0,90	
Capacidad de Transformadores (11 a 20)	---	805,50	MVA

GRUAS DE LAS CASAS DE MAQUINAS	1a. Etapa	Etapa Final
Número	1	2
Polipastos	2	4
Capacidad del gancho	325	TM
Capacidad total	650	TM
Fabricante	Nippon, Japón	Hitachi, LTD

TURBINAS FORZADAS CASA DE MAQUINAS No. 1

Material	---	ASTM-A516 Gr 70
Número	---	10
Diámetro (13 y 14)	---	10,5 m a 8,48 m
Diámetro (11, 12, 15 a 20)	---	11,4 m a 8,48 m
Espesor plancha (11 a 20)	---	30 mm a 58 mm
Peso de cada tubería (13 y 14)	---	1.544 TM
Peso de cada tubería (11, 12, 15 a 20)	---	1.776 TM

CANAL DE DESCARGA No. 1

Longitud	1.500	m	---
Ancho del fondo	70	m	---
Volumen de excavación	2.350.000	m^3	---

CANAL DE DESCARGA No. 2

Longitud ----- 2.637 m
 Ancho de Fondo ----- 180 m
 Volumen de Excavación ----- 15.610.000 m³

DIOQUES MARGINALES

Longitud de la cresta	32.000	m
Altura máxima desde la fundación	45	m
Nivel de la cresta	275	m
Ancho de la cresta	7	m
Pendiente aguas arriba	3	H = IV
Pendiente aguas abajo	2,5	H = IV
Volumen total	13.000.000	m ³

RESUMEN DEL CONTRATO

RESUMEN DE LOS CONSEJOS DE CONSTRUCCIÓN

1a. Etapa

Etapa Final

Excavación total

Presas de tierra y enrocamiento

3.130.000 m³

16,616,000 m³

Presas de tierra y enrocamiento 2,089,000 m³ 76,000,000 m³

CARBON, LIGNITO Y TURBA EN EL BRASIL

Dirección Técnica
Compañía Auxiliar de
Empresas Eléctricas Brasileñas
(CAEEB)

Resumen de la Situación del Carbón en Brasil

El programa brasileño del Carbón Energético es parte del modelo energético brasileño y tiene como objetivo la producción de 16,800,000 toneladas a partir de 1985. El programa fue establecido para el periodo de 1979 a 1985 por el gobierno del General Figuereido.

La responsabilidad y realización del programa de carbón es del Ministerio de Minas y Energía, cuyo Ministro es el Senador César Cals de Oliveira. Básicamente, la meta de producir 16,800,000 toneladas al año fue establecido para sustituir los derivados de petróleo importado (o combustible mineral), equivalente a 110,000 barriles de petróleo por día.

Las reservas de carbón brasileño están situadas en el Sur del país y se estiman en 23 mil millones de toneladas.

Se precisan producir 6,290,000 toneladas de carbón energético en 1982.

Teniendo en vista las dificultades para implantar este programa alternativo de energía, el gobierno brasileño estableció una serie de políticas de incentivos a la producción y al consumo de carbón mineral que se puede resumir en la forma siguiente:

1. La producción de nuevos proyectos de minas recibe 80 o/o de financiamiento con tasa

de interés fija de 5 o/o al año y un límite de corrección inflacionaria hasta del 50 o/o y un plazo de amortización de 12 años con 4 años de gracia.

2. La producción de carbón es adquirida por la Empresa CAEEB del Ministerio de Minas y Energía, que realizará la distribución a los consumidores asegurando al productor la venta de los productos y al usuario la garantía del suministro.

3. Un sistema de precios que asegura al productor el costo real más una ganancia y venta al usuario a un precio 30 o/o inferior al equivalente del derivado del petróleo.

4. Para asegurar la producción y utilización de carbón, el gobierno establece protocolos entre el Ministerio de Minas y Energía productor, y el Ministerio de Industria y Comercio consumidor del aceite combustible, la industria del cemento, la industria siderúrgica, la de la celulosa y papel, quienes reciben financiamiento para sustituir la quema de petróleo por carbón.

5. Además de los protocolos internos, el Ministerio de Minas y Energía, establece protocolos internacionales que permitan la absorción de nuevos procesos, financiamientos especiales, formación y entrenamiento de personal.

6. Es firme propósito del Ministerio de Minas y Energía cultivar e intercambiar la información tecnológica y formación de personal con

otros países latinoamericanos directamente y por intermedio de OLADE.

Legislación Vigente

Los depósitos, minas y demás recursos minerales y potenciales hidroenergéticos disponibles para su explotación o aprovechamiento industrial, no constituyen propiedad individual. Sin embargo, al propietario se le asegura una participación en los resultados de la explotación y una décima parte del impuesto sobre minerales (Constitución del Brasil).

Las investigaciones geológicas de cualquier mineral brasileño deben ser enmarcadas dentro de las disposiciones del Código de Minería.

La autorización de las investigaciones minerales sólo puede ser otorgada a una persona brasileña, natural o jurídica, o a una empresa minera ya constituida en Brasil, mediante la expresa autorización del Ministerio de Minas y Energía luego de haberse realizado un proceso de examen e informes realizado por el Departamento Nacional de Producción Mineral (DNPM).

Solicitado y obtenido un permiso de investigación, el interesado dispone de un plazo de tres años, prorrogables, para presentar un informe sobre la investigación realizada, inclusive cuando el interesado es la Empresa Gubernamental de Pesquisas de Recursos Minerales (CPRM).

La autorización para el trabajo sólo se conoce a personas jurídicas. Una vez aprobado el informe de la investigación, el interesado dispone del plazo de 1 año para presentar los siguientes documentos al DNPM:

- a) un plan de trabajo y
- b) pruebas de la constitución de una empresa minera, si fuera del caso.

Pasado el plazo de 1 año sin haberse atendido los requisitos arriba mencionados, el interesado pierde su derecho a la concesión de trabajo, la cual puede ser solicitada por otros interesados.

Asimismo, cuando el Gobierno (CPRM) realiza una investigación detallada de un depósito, no tiene derecho al trabajo, otra parte interesada en obtener la autorización de mismo trabajo puede reembolsarle por los gastos incurridos por la investigación.

Respecto a la programación de investigaciones concedidas a DNPM-CPRM por el Gobierno, los recursos financieros se consideran fondos perdidos, sin posibilidad de reembolso futuro.

Para las investigaciones y trabajos relativos al carbón mineral, el Gobierno, a través del Ministerio de Minas y Energía (MME) o de la Secretaría de Planificación (SEPLAN), concede financiamiento del Plan de Movilización Energética de acuerdo con las siguientes condiciones:

Valor	80 o/o de la inversión
Corrección monetaria	50 o/o de la variación de la ORTN*
Intereses	5 o/o anuales
Período de gracia	4 años
Amortización	8 años, después del período de gracia

* Obligaciones Reajustables del Tesoro Nacional

CARBON

1. Reservas: definiciones

Lecho de carbón: estrato que contiene un espesor total de carbón mayor de 1 centímetro hasta 19 centímetros.

Veta de carbón (veta total): conjunto de lechos

de carbón, que contiene intercalaciones estériles, con 20 centímetros, por lo menos, de espesor de carbón, correspondientes al 40 o/o, aproximadamente, del carbón contenido en la veta, con relación al espesor total.

Banco de carbón: estrato de carbón con más de 20 centímetros de carbón y pocas intercalaciones estériles dentro de la veta.

Carbón en la veta: suma de los espesores de las diversas intercalaciones de carbón, lechos y bancos contenidos en la veta.

2. Criterios y evaluaciones

El espesor mínimo de carbón económicamente explotable depende del costo de producción (el cual es variable como función de los métodos mineros, el tamaño de la mina, las condiciones del techo, la estructura y profundidad del yacimiento, la perspectiva minera de capas económicas superpuestas, el proceso de enriquecimiento y la recuperación de fracciones utilizables con relación al carbón bruto), así como de los valores de las fracciones y comerciales que se obtengan.

El cambio del espesor mínimo hacia un valor menor, en función de la crisis energética, obviamente ampliará las reservas.

Tomando en consideración la experiencia actual del Brasil en cuanto al trabajo en las minas operativas, el espesor generalmente adoptado en el país varía de 0,50 a 1,0 metro de carbón en la veta.

La delimitación de zonas para calcular las tres clases de reservas (medidas, indicadas e inferidas), se basa en los límites adoptados por la United States Geological Survey (USGS), con millas convertidas en metros y algunas pequeñas aproximaciones.

Reservas medidas: son aquellas reservas continuas a los hoyos sondeados, en un radio de 400 metros y un área de 0,50 km². Las fajas estrechas entre círculos de influencia de los hoyos positivos son incluidas como zonas de reservas medidas, siempre y cuando los centros de las fajas no queden a una distancia mayor de 600 metros de cualquier de los hoyos.

Nota: la faja que esté a más de 600 metros de cualquier hoyo constituirá una zona de reservas indicadas.

Reservas indicadas: son aquellas reservas de las zonas fuera de las reservas medidas, que se encuentran en un radio de 1.200 metros, correspondientes a una corona circular de 4,02 km². Así, como en el caso anterior, se incluyen en las reservas indicadas las estrechas fajas entre hoyos positivos, debido a que el centro de ellas no se encuentra a una distancia de más de 1.500 metros de cualquier hoyo.

Reservas inferidas: son aquellas reservas situadas dentro de la zona de las reservas indicadas, además con el espesor del carbón en la capa superior al mínimo establecido, hasta a una distancia máxima de 4.800 metros de los hoyos.

Las reservas, anteriormente definidas, deben considerarse reservas geológicas *in situ* y no confundirse con las reservas recuperables del yacimiento, las cuales son sólo una parte del total debido a pérdidas provocadas por los procesos de minería y de enriquecimiento, problemas geológicos locales como fallas, intrusiones diabásicas, inviabilidad del trabajo de 2 capas o más superpuestas, entre otras.

La reserva (medida, indicada o inferida) del carbón que yace entre curvas isopacas. Se obtiene de multiplicar la zona entre isopacas, por el espesor medio y el peso específico del carbón flotado.

La suma de los valores correspondientes entre isopacas arroja la reserva global.

Por medio de la planimetría, se determinan las zonas entre curvas isopacas contiguas, y los espesores medios correspondientes.

El peso específico del carbón se determina a través del carbón contenido en los testigos sacados de los sondeos y flotados en un medio denso (densidad del corte: 1,85).

Para el lignito y la turba los criterios y cálculos son aproximadamente los mismos que para el carbón, pudiendo existir un detalle mayor con relación a la turba.

3. Reservas: características

Las principales reservas de carbón en el Brasil, hasta hoy conocidas, están ubicadas en la parte sur del país, en la frontera occidental de la Cuenca Sedimentaria de Paraná, cubriendo los estados de Paraná, Santa Catarina y Rio Grande do Sul.

En el Estado de Rio Grande do Sul, la presencia de carbón se da en forma de cuencas, siendo las principales de ellas:

Candiota, Irui, Leao-Butiá, Charqueadas, y Gravataí-Morungava

El carbón de Rio Grande do Sul generalmente es del tipo energético o vapor, mientras que los yacimientos de carbón de la región Gravataí-Morungava presentan fracciones de carbón metalúrgico destinado a la producción de coque siderúrgico o a la fundición.

En el Estado de Santa Catarina, los depósitos de carbón están situados dentro de una faja de 20 kilómetros de largo (este-oeste) y 100 kilómetros de ancho (norte-sur), entre la Serra do Mar y la Serra Geral.

Existen vetas de carbón en 10 sitios de la Formación Bonito pero solamente 3 de ellas son económicamente explotables.

- Barro Branco
- Itaipú
- Bonito

La veta de carbón de Barro Branco presenta una buena continuidad y de ella se extrae carbón bruto que es sometido a un pre-enriquecimiento, resultando así en un producto denominado carbón pre-lavado (CPL). De este proceso se deriva una

RESERVAS DE CARBON 10⁶ toneladas

ESTADO	MEDIDAS	INDICADAS	INFERIDAS	GLOBALES
Paraná	32,04	57,74	5,00	94,78
Santa Catarina	369,31	859,07	712,86	1.941,24
Rio Grande do Sul	1.796,41	3.579,06	15.392,53	20.768,00
Total	2.197,76	4.495,87	16.110,39	22.804,02

fracción metalúrgica (30 o/o) con el 16,5 o/o de ceniza, destinada a la producción de coque siderúrgico, en mezclas con carbones importados.

Las otras fracciones, con un contenido más alto de ceniza, se utilizan en plantas termoeléctricas y en la producción de cemento.

La veta de carbón de Irapuá es discontinua pero su composición se asemeja a la veta de carbón de Barro Branco.

La veta de carbón de Bonito, con una magnitud de reservas iguales a la de Barro Branco, cerca de 800 millones de toneladas, presenta una reducida fracción metalúrgica.

En el Estado de Paraná, parte de las reservas de carbón, están asociadas con uranio. Una tecnología especial, ya desarrollada, está siendo aplicada en aquellas reservas para aprovechar los dos recursos minerales, e inclusive el molibdeno como subproducto.

LIGNITO

La única área detectada con recursos de lignito en cantidades significativas, del orden de 36,4 billones de toneladas, fue la de Alto del Río Solimoes, en el Estado de Amazonas. Esta zona potencial cubre aproximadamente 90 km². Un levantamiento detallado realizado en la región de Benjamín Constant, parte de la zona de Alto del Río Solimoes, con perforaciones en redes de 2 por 2 km., condujo a estimar una reserva de unos 35,5 millones de toneladas de lignito.

Otras reservas detectadas son:

SITIO	ESTADO	TOTAL	EXPLOTABLES
Hacienda Gabela	Minas Gerais	2.800.000	1.700.000
Capapava	Sao Paulo	152.000	--

Se ha verificado la presencia de lignito en los Estados de Paraná, Amapá, Maranhao, Pernambuco, Bahía y Río de Janeiro.

TURBA

Los trabajos de prospección de turba se están desarrollando en los Estados de São Paulo (región del Valle de Paraíba), Río de Janeiro (cuena de Campos), Espíritu Santo (Valle del Río Dulce) y en toda la faja litoral, desde el sur del Estado de Bahía hasta el Estado del Río Grande do Norte.

Las reservas estimadas hasta la fecha en las regiones arriba mencionadas son enumeradas en el cuadro a continuación:

REGION	ESTADO	RESERVAS ESTIMADAS	
		TOTAL 10 ⁶ ton.	PROFUNDIDAD m
Vale Paraíba do Sul	São Paulo	680,0	---
Vale Rio Doce	Espírito Santo	500,0	---
Bacia de Campos	Rio de Janeiro	60,0	---
Litoral Base	Bahía-Sergipe	1.310,0	---
Litoral Noreste	AL-PE-PB-RN	291,7	1m
TOTAL		2.941,7	---

Se reconoce que de las reservas del Vale de Paraíba del Sur (Río de Janeiro) el 20 o/o son de turba energética (PC 3.500 Kcal/kg).

Para las zonas de turba del litoral Bahía-Sergipe y el litoral nororiental, se estima que existe un 30 o/o de turba energética.

Investigaciones Geológicas

1. Ejecutores

En términos amplios, las investigaciones geológicas realizadas en nuevas áreas potenciales para los recursos de carbón, lignito y turba, se están llevando a cabo a través de DNPM-CPRM,

siendo el primero el órgano programador contratante y el segundo la empresa ejecutora del programa.

La CPRM también realiza investigaciones por su propia cuenta en áreas concesionarias solicitadas por ella.

Con miras a agilizar la apertura de nuevas minas y para atender las metas de producción de carbón establecidas por el Ministerio de Minas y Energía, el DNPM, a través de la CPRM, viene ejecutando un intenso programa de investigaciones detalladas, a fin de proveer a las empresas mineras los subsidios necesarios para ampliar el proyecto de extracción en las minas existentes o en otras por abrir.

Además, la CPRM está desarrollando programas de investigación detallada en sus áreas concesionarias, con el objeto de conocer geológicamente los yacimientos y después colocar en licitación los datos necesarios para el trabajo del proyecto por parte de empresas privadas.

Para la ejecución del programa del DNPM, o sea, sus investigaciones propias, la CPRM puede contratar los servicios de empresas privadas que trabajen en los campos de investigación o perforación.

La capacidad brasileña de perforación, incluyendo la de la CPRM y la de las empresas privadas, es de 230.000 metros por año, pero debido a la limitada disponibilidad de recursos financieros para ejecutar un programa de investigación más amplio, los sondeos han llegado solamente a unos 130,000 metros por año. Por esta razón, existe interés en exportar los servicios de sondeo para investigaciones geológicas, en una magnitud de aproximadamente 100,000 metros por año y para estos efectos ya se han hecho gestiones en este

sentido con los gobiernos de Mozambique, Paraguay y otros.

2. Programas realizados

De 1970 a 1981 se ejecutaron, dentro del convenio DNPM-CPRM, 274,334,30 metros de sondeos, representando 1.426 hoyos y cubriendo, parcialmente, las cuencas de Paraná, Amazonas (Alto Solimoes) Parnaiba (Maranhao y Piauí), Reconcavo (Bahía) y el Vale de Pmenta Bueno (Rondonía).

En la región del Río Fresco, Pará, fue posible conocer los recursos carbonosos, del orden de los 4 billones de toneladas. En el Alto Amazonas se definieron recursos de lignito del orden de $36,4 \times 10^9$ toneladas. En la Cuenca de Paraná, donde hubo la mayor concentración de esfuerzos, las reservas geológicas posibles sobrepasaron de $2,7 \times 10^9$ a $22,8 \times 10^9$ toneladas.

En la faja costeña del Noroeste, los trabajos preliminares detectaron recursos razonables de turba.

En las cuencas de Reconcavo y de Parnaiba, los resultados obtenidos para el carbón fueron desalentadores.

3. Programas futuros

La programación de los próximos años tiene los siguientes objetivos:

- a) Transformar las reservas indicadas e inferidas en reservas medidas.
- b) Continuar los trabajos de prospección en zonas potenciales de carbón, lignito y turba, a fin de determinar las fuentes energéticas alternas disponibles para el uso regional.

c) Desarrollar nuevos métodos de investigación, con miras a elaborar parámetros que definen los depósitos y a obtener resultados con una inversión menor.

d) Desarrollar estudios sobre la realización del trabajo, la recuperación y enriquecimiento del carbón, de tal manera que no se vea afectado el medio ambiente.

Tipos de Depósitos

En el Estado de Santa Catarina, las minas de carbón operativas alcanzan una profundidad hasta de 150 metros, referida a la veta de carbón de Barro Branco. La veta de carbón de Bonito es subyacente a Barro Branco, generalmente a unos 50 metros.

Los depósitos de carbón son bastante limitados para la minería a cielo abierto en Santa Catarina.

En el Estado de Río Grande do Sul, la mina más profunda es la de Charqueadas (Pozo Otávio Reis), propiedad de la COPELMI. Alcanza una profundidad de 300 metros.

El depósito de carbón de la región Gravatí-Moringava tiene una profundidad variable, permitiendo, en el futuro, procesos mineros incluyendo desde cielo abierto, con profundidades hasta de 600 y 800 metros.

Los principales yacimientos de carbón que permitan minería a cielo abierto están en Río Grande do Sul. En Candiota, de los 8 billones de toneladas de reserva, 3 billones podrán ser extraídos a cielo abierto, considerando una cobertura de hasta 30-40 metros.

La reserva explotable a cielo abierto aumenta.

Para los equipos que posibilitan la minería

a una mayor profundidad, como a 50, 100 ó 120 metros.

Otros depósitos carboníferos adecuados para la minería a cielo abierto, en el Estado de Río Grande del Sur, son: Irui, Faxinal, Recreio.

Las minas actualmente activas pueden discriminarse por Estado y según el proceso de minería:

ESTADO	A CIELO ABIERTO	SUBTERRANEA
Paraná	—	3
Santa Catarina	7	26
Río Grande do Sul	3	2
Total	10	31

Etapas y Métodos de Investigación

1. Zonas con evidencia de presencia de yacimientos

- a) Compilación bibliográfica (libros, fotos, etc.)
- b) Mapas geológicos
- c) Foto-interpretación adicional,
- d) Chequeos rápidos de campo.

2. Zonas sin evidencia de presencia de yacimientos

- a) Mapas preliminares (escala de 1: 50.000 y 1:25.000), basado en fotos aéreas, reconocimientos geológicos de campo. Ejecución de secciones geológicas a lo largo de la zona baja estudio.
- b) Determinación de límites de la roca gondwana.
- c) Determinación de cuerpos diabásicos (silllos, diques)

- d) Apertura de trincheras, pozos y hoyos con barrena
- e) Preparación de mapas de las facies (ambiente de depósitos de esquistos).
- f) Mapa o carta geológica.

3. Investigaciones geofísicas

Se utilizan en las zonas de sedimentación reciente, planicies aluviales o regiones muy secas y planas, así como también en zonas con problemas estructurales.

Los métodos geofísicos empleados en el Brasil son los siguientes:

—Magnetría: en rocas de propiedades magnéticas y cuerpos diabásicos.

—Resistividad eléctrica: para detectar depósitos de material y la estructura tectónica del yacimiento.

—Sísmica de refracción: para detectar estructuras de basamento cristalino.

—Sísmica de alta resolución: método sofisticado que utiliza explosiones para detectar la presencia y espesor de las vetas de carbón mayores de 5 m.

4. Ejecutores

En el caso de la sísmica de alta resolución se contratan empresas especializadas extranjeras ligadas a empresas brasileñas, para ejecutar los estudios y procesar los datos, debido al alto grado de sofisticación y altos costos de los equipos involucrados.

Sin embargo, la CPRM ha desarrollado un método original de interpretar las secciones sísmicas con gran éxito.

Los demás métodos investigativos son ejecutados por empresas brasileñas (mapas, sondeos con testigos, perfiles geofísicos y otros).

El perfil geofísico comprende:

- potencial espontáneo
- resistividad (eléctrica)
- registros gamma (radioactividad).

5. Equipos de sondeo

- a) Sondas rotativas (3 ruedas dentadas cónicas)
- b) Sondas rotativas a diamante (corona de diamantes)

La sonda rotativa se usa para obtener muestras del canal, por medio de una barrena tricónica.

La sonda rotativa a diamante se usa para obtener testigos de perforación con barrenas de coronas diamantadas o de carborundum.

Características

1. Carbón mineral

El concepto básico del carbón energético es de aquel carbón cuyo material carbonoso no tiene propiedades aglutinantes cuando se expone a temperatura de 1.000°C o más. Este no se presta para la producción de coque metalúrgico o de fundición. Por extensión, se denominó "carbón energético" a las fracciones resultantes de Capivari (Santa Catarina), con altos contenidos de ceniza (35-40 o/o). Es el tradicional carbón vapor.

En el Brasil, el carbón metalúrgico es la fracción resultante del enriquecimiento del carbón pre-lavado en el lavador de Capivari, con un contenido de ceniza entre 16 y 18,5 o/o. Es un carbón cuya densidad fluctúa en 1,50.



El carbón metalúrgico producido en el lavador de Capivari se utiliza mezclado con otros carbones importados (80 o/o) para producir coque siderúrgico.

En las plantas termoeléctricas, basadas en carbón, se emplean estos con un contenido de ceniza de alrededor de:

- 20 o/o COPEL (PR)
- 40 o/o ELETROSUL (SC)
- SAN JERONIMO (RS)
- 50 o/o P. MEDICI (RS)
- ELETROSUL (RS)

El consumo específico de carbón varía entre 1 y 0,6 kg/kW.

Para la producción de cemento se utilizan carbones con un contenido de ceniza de aproximadamente:

- 20 o/o MATARAZZO (caso especial)
- 33 o/o tipo patrón adoptado para la industria del cemento.

Como promedio, se requiere de 2,5 toneladas de carbón, con un contenido del 35 o/o de ceniza (PC+ 5.000 Kcal/kg) para sustituir una tonelada de combustóleo.

El protocolo suscrito entre el Gobierno y los sindicatos de las industrias de cemento y carbón establece etapas para la sustitución total del combustóleo utilizado en la producción de cemento, tanto en las torres de pre-calentamiento (vía seca) y la pasta cruda (vía húmeda) como en los trabajos de soldadura. El programa de sustitución está indicada en el cuadro a continuación:

ETAPA	PLAZO	REDUCCION DE CONSUMO DE CARBON COMBUSTOLEO	CONSUMO DE CARBON 10 ³ ton./año
1a	Hasta Dic. 80	640	1.280 (30 o/o)
2a	Hasta Dic. 82	2.140	4.280 (50 o/o)
3a	Hasta Dic. 84	2.780	5.560 (100 o/o)

Además, con los sectores siderúrgico, papel y celulosa se han suscrito protocolos con miras a sustituir los derivados de petróleo por fuentes energéticas alternativas nacionales.

El carbón energético, con un contenido de ceniza de 20, 30 ó 40 o/o, también se utiliza en calderas y para otros fines industriales como secaderos de granos, cerámica, etc.

Para la producción de hierro-esponja a través de la reducción directa del mineral de hierro, se utiliza el carbón energético llamado "carbón reductor", con un contenido de ceniza del 33 al 35 o/o.

2. Lignito

Los análisis de lignito, incluidos el de Alto Solimoes, arrojan valores comprendidos en los siguientes intervalos:

Unidad hidroscópica	8 – 10 o/o
Ceniza	25 – 35 o/o
Material volátil	30 – 50 o/o
Carbón fijo	20 – 30 o/o
Azufre	3 – 4 o/o
Poder calorífico	4.000 – 5.000 Kcal/kg
FSI	0
Peso específico	1,6 – 2,0 g/cm ³

Dentro de la clasificación ASTM estas características sitúan el material carbonoso en el límite superior de la turba y el inferior del lignito.

3. Turba

Las características medias de los depósitos de turba que merecen mayores estudios son las siguientes:



PROYECTOS	TAMANO MEDIO (Ha)	ESPESOR MEDIO (m)	COBERTURA MEDIA (m)	VALORES MEDIOS		
				CENIZA o/ob.s	AZUFRE o/ob.s	PODER CAL. Kcal/kg
Litoral BA-SE	1.600	204	0	22	0,85	4.400
Litoral Norocc. AL-RN	600	0,8 a 3,60	1	44	1,30	2.430

Los depósitos de turba brasileña en general se presentan en una tercera parte en forma de turba energética, y las dos terceras partes restantes en forma de turba agrícola.

Se clasifica como turba energética aquella cuyo poder calorífico superior es mayor a 3.500 Kcal/kg, en base seca y correspondiendo a un contenido de ceniza menor del 35 o/o.

Se clasifica como turba agrícola aquella cuyo poder calorífico superior es menor a 3.500 Kcal/kg, en base seca, correspondiendo a un contenido de ceniza mayor del 35 o/o.

CUENCAS SEDIMENTARIAS Y POTENCIAL PETROLERO EN GUATEMALA

Ing. Carlos Paiz Ramírez
Ing. Jaime Rodríguez

Departamento de Investigaciones y Servicios Técnicos
Secretaría de Minería, Hidrocarburos y Energía Nuclear

HISTORIA GEOLOGICA Y TECNONISMO

La historia geológica, antes del Paleozóico y durante este, es poco conocida. Se cree que durante el Paleozóico Superior fueron erosionadas y deformadas las rocas del geosinclinal de Guatemala, ampliando el área de la plataforma que se extendía del norte. Posiblemente por movimientos post-orogénicos consecuentes, se formaron las islas al sur del mismo geosinclinal (Fig. No. 1). También se depositó, discordantemente, una secuencia de rocas clásticas durante el Pensilvánico Superior seguida por rocas carbonáticas del Pérmico Inferior (Grupo Santa Rosa).

Las rocas del Paleozóico Superior han sido interpretadas por Dengo y Bonennberger (1967) como una cuña clástica; es decir, como una fase de sedimentación que siguió al metamorfismo de las rocas del geosinclinal (Orogenésis del Paleozóico Superior).

Después de la sedimentación del Pérmico tanto las rocas originales del geosinclinal como de la cuña clástica, fueron severamente plegadas y afalladas correspondiendo esta deformación con la orogenésis Apalachina. La única intrusión que ha sido fechada es la de Bladen en los Montes Mayas de Belice que parecen ser del Pérmico Medio y anterior al Cretácico.

A finales del Paleozóico antiguo y posiblemente en el Triásico se dio el horst de Villa Hermosa en México que, como veremos más tarde, sirvió a las eras posteriores, como lugar que permitió la

formación de bancos arrecifales de grandes depósitos de petróleo. (Fig. No. 2).

La Orogenésis que se inició en el Pérmico dio fin al Paleozoico.

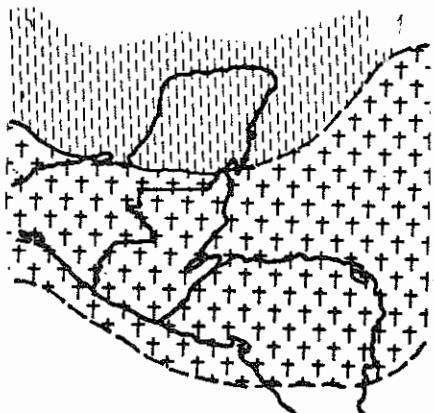
Manifestaciones de esta orogenésis fueron plegamientos en las zonas móviles especialmente aquellas en medio de dos plataformas. Allí la sección Paleozóica sufrió un leve metamorfismo así como intrusiones graníticas. El levantamiento general de zonas móviles como de las plataformas y cratones adyacentes tuvo lugar después de la actividad orogénica.

Durante el Triásico ocurrieron dos fenómenos: erosión y fallamiento. El primero, se inició durante el Triásico temprano y medio, exponiendo la mayor parte de las áreas compuestas por corteza continental. El segundo, se inició durante el Triásico tardío y continuó hasta el inicio del Jurásico.

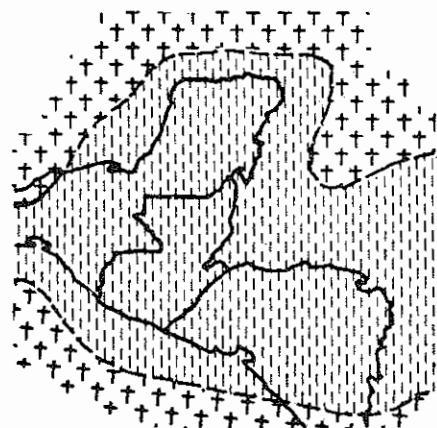
La Sedimentación ocurrió en grábenes y semi-grábenes en el área continental.

Los movimientos tectónicos cesaron al iniciarse el Jurásico y la erosión comenzó su ataque a las montañas excepcionalmente altas. Al principio del Jurásico tardío, las condiciones marinas se hacen presentes en las márgenes continentales del Golfo de México y el oeste de Sur América. Posteriormente el Golfo de México inicia hundi-

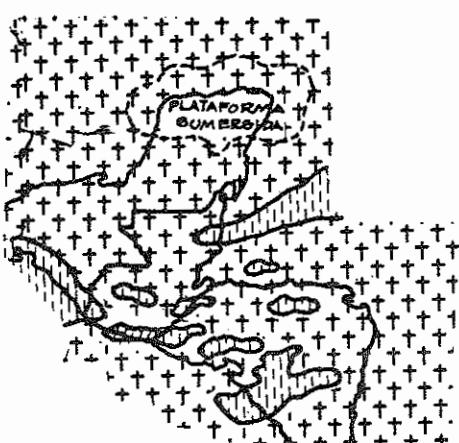
Fig. No. 1
 "ESQUEMAS PALEOGRAFICOS"



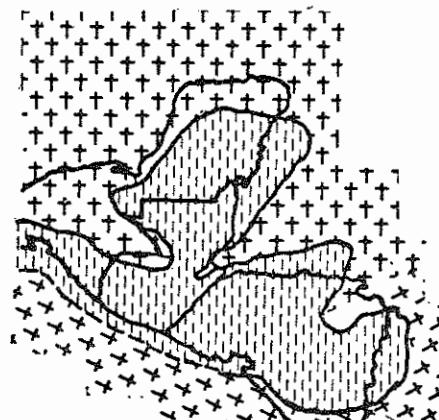
GEOINCLINAL PALEOZOICO



EMERSION MESOZOICO INFERIOR



GEOINCLINAL MESOZOICO



EMERSION TERCIARIO MEDIO



AREA TERRESTRE



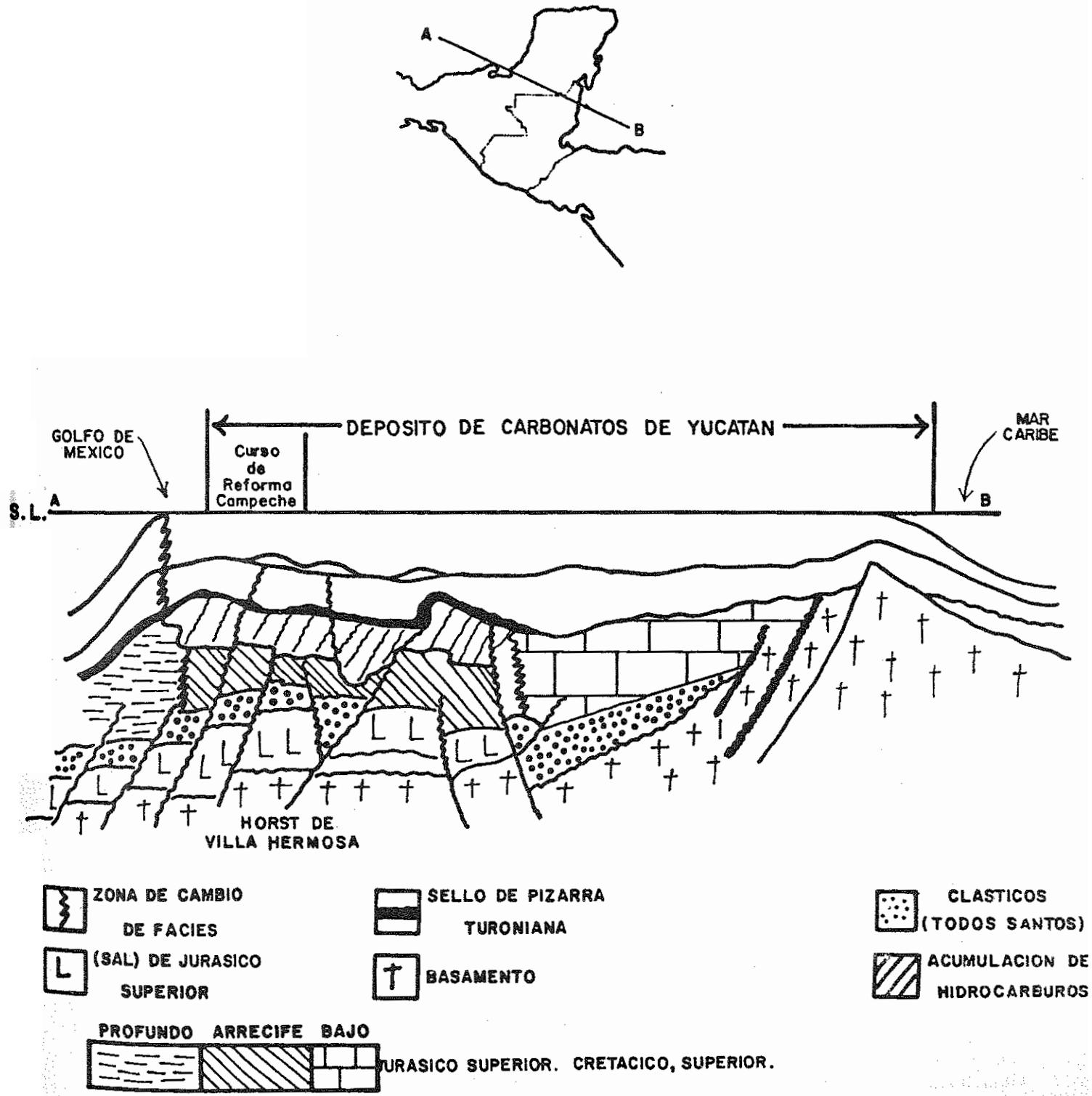
AREA MARINA DE
SEDIMENTACION

AREA DE MAR
ABIERTA



NOTA: seg\xfcre DENG\xc3\x93 Y BOHNENBERGER (1967)

Figura N° 2



Sección de Perfil inferido de la plataforma de Yucatán.

miento constante con predominio de condiciones marinas; resultado de lo anterior, es el inicio de un nuevo ciclo ortogeosinclinal en la región Caribe-Golfo de México que tiene lugar hasta mediados del Eoceno. En general, las rocas del Triásico y Jurásico inferior a medio, no constituyen objetivos generales para exploración petrolera. Sin embargo las rocas del Jurásico Superior sí constituyen un buen objetivo especialmente alrededor del Golfo de México. Esto es consecuencia de una mayor estabilidad tectónica.

También ocurrieron depósitos de sal (Triásicos y Jurásicos) que crearon domos salinos productores de petróleo y gas. Esta sal lubricó los cabalgamientos, especialmente en la Cuenca Chapayal. Como por ejemplo tenemos los depósitos de sal que dieron origen a las estructuras del sur de esta Cuenca en los campos petrolíferos de Rubelsanto y Tortugas. Al este de estos campos se puede inferir observaciones estructurales y posiblemente podríamos encontrar el mismo fenómeno en los anticlinales al norte de Quinché y Huehuetenango.

Al final del Triásico y Jurásico inferior hubo una sucesión de capas rojas intercaladas con rocas volcánicas. En el sur de México y en Guatemala no se encuentran secciones equivalentes, excepto en el área de Trinitaria en el Estado de Chiapas, México.

A finales del Jurásico superior, la península de Yucatán estaba parcialmente expuesta; durante el Cretácico, las montañas Mayas ya estaban emergentes, la bahía de Amatique, a principios del Cretácico, era una área de deposición salobre y de sedimentos de sabkha.

En el pozo de Manabique 1-C, el Cretácico revela ambientes de baja energía. Yucatán, Belice, Guatemala y Costa Afuera en Guatemala, comprendían un filón de roca evaporítica poco profunda. La península de Yucatán, a principios del

Cretácico, estaba parcialmente expuesta y se convirtió en un lugar de deposición de carbonatos marinos reducidos y evaporitas. En el sureste estaba emergente Honduras. Uno de los factores interesantes de esta era fue la deposición de una de las secciones evaporíticas más grandes que se conocen en el mundo (probablemente excede los 20,000 pies de espesor). En Rubelsanto, encontramos que la roca sello es de anhidritas de 15 a 20 pies de espesor sobre los carbonatos, revelando así esta serie una secuencia evaporítica entremezclada con carbonatos. (Fig. No. 3)

Aspectos y rasgos geológicos más importantes de la República de Guatemala

Los rasgos tectónicos más importantes en Guatemala incluyen la plataforma de Yucatán al norte del Petén, al sur de la cual el Arco de la Libertad atraviesa con su estructura anticlinal, el departamento del Petén, que se pierde en dirección oeste en México. Este arco sirvió como barrera estructural protectora a todos los esfuerzos tectónicos provenientes del sur y sureste que se manifiestan en el borde sur de la cuenca de Chapayal (Fig. No. 4)

Más hacia el sur, encontramos la Sierra Madre; núcleo del geoanticlinal centroamericano con rocas Paleozóicas y una serie de afloramientos que incluyen una variedad de eras más recientes y posiblemente pre-Paleozoicas.

Esta cadena montañosa, sirvió como factor estructural que controló en parte los movimientos orogénicos y la distribución de esfuerzos en las capas sedimentarias del Terciario en la Cuenca de Chapayal. Más al sur vemos la planicie costera progradacional de origen Terciario y Cuaternario manifestándose allí claramente la actividad volcánica en esas eras.

También al noreste vemos las montañas Mayas interrumpiendo las rocas sedimentarias del Tercia-

Norte America.

Columna litologica y mayores periodos orogenicos de

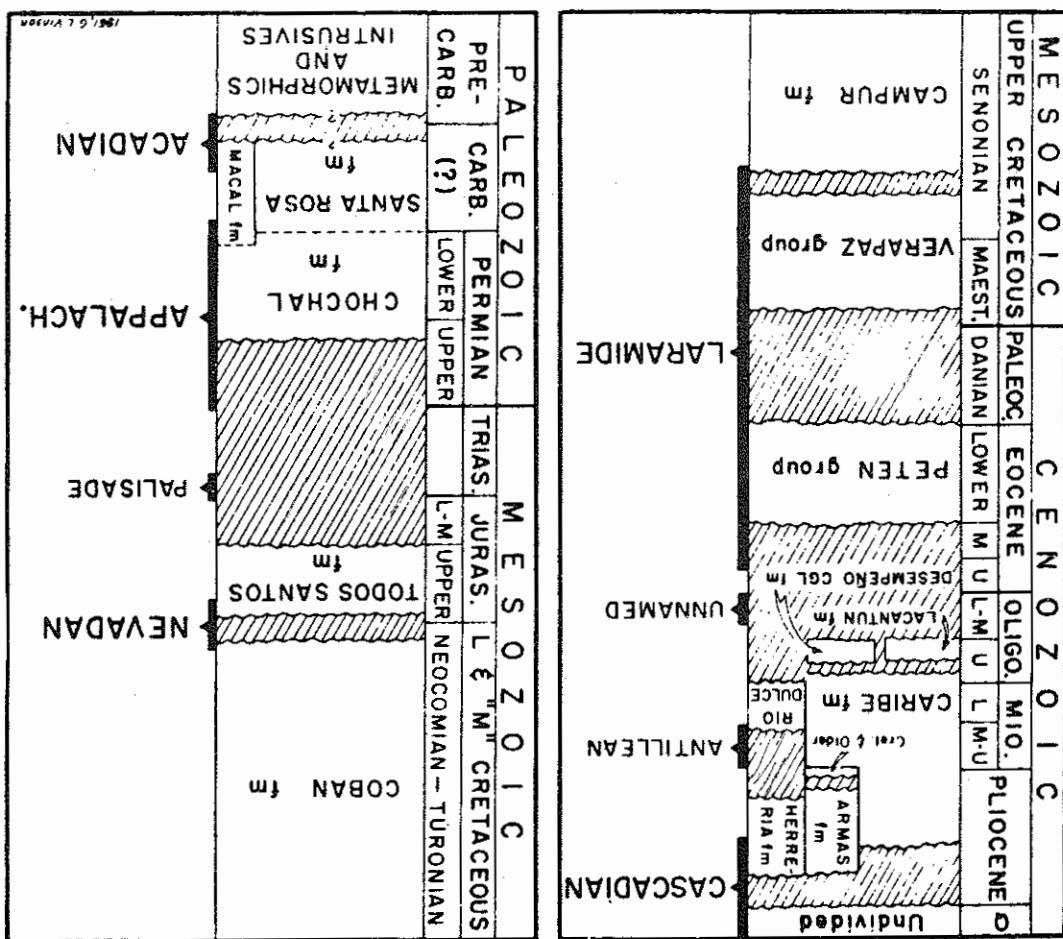
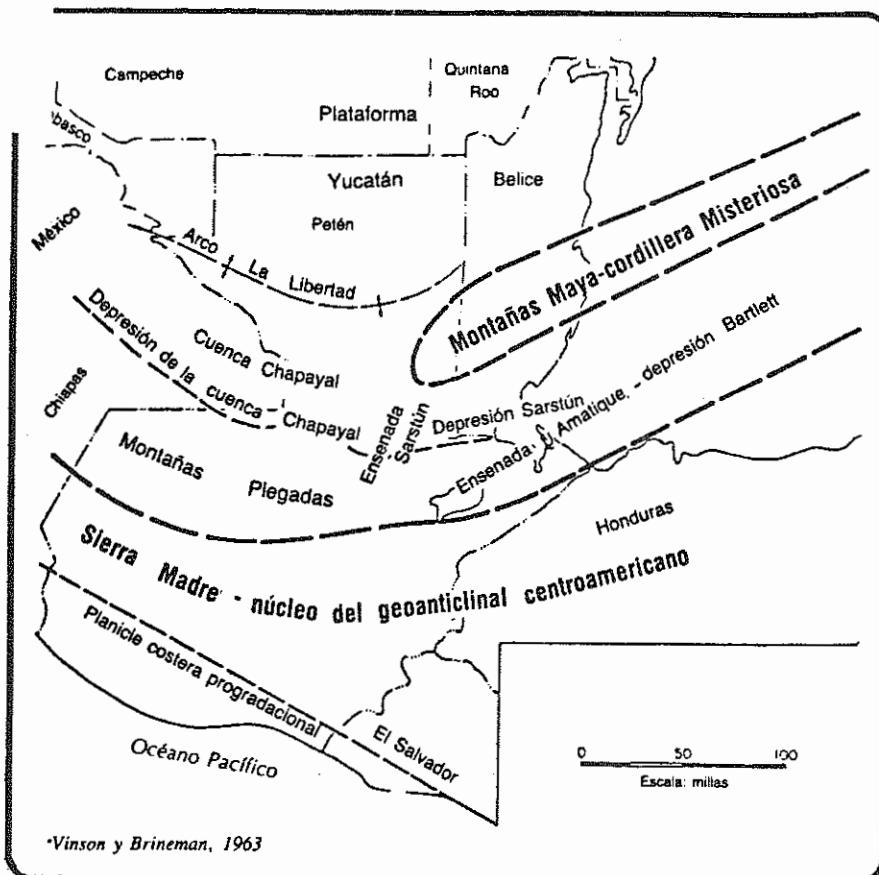


Figura N° 3

Figura N° 4



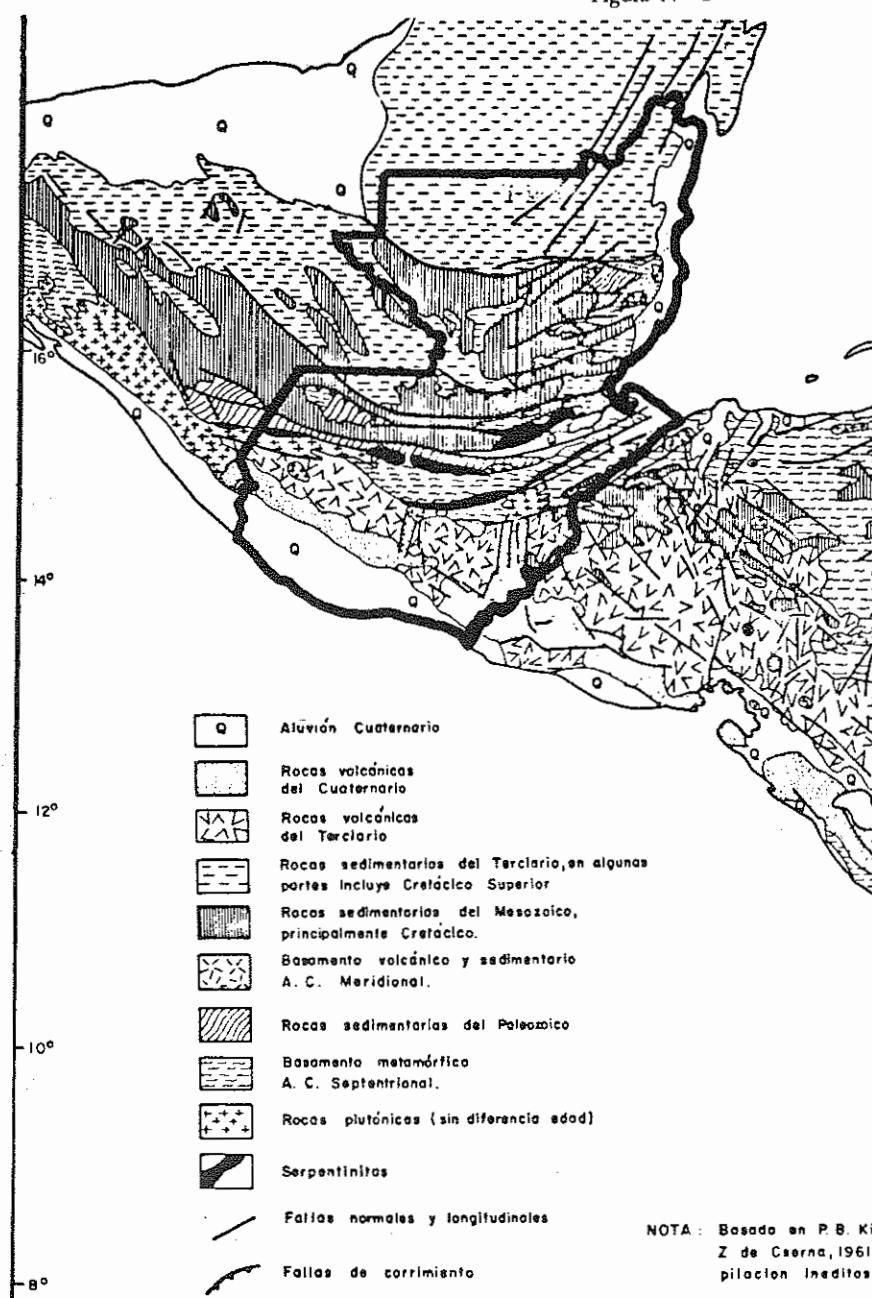
Elementos Tectónicos más importantes de Guatemala.

rio y limitando en parte la ensenada Sarstún, la depresión Sarstún y la ensenada de Amatique-depresión Barlette, al encontrarse geográficamente al norte de las montañas plegadas del centro del país (Fig. No. 4)

En la República de Guatemala se distingue, al observar un mapa geológico (Fig. No. 5), que las rocas están distribuidas homogéneamente siguiendo la historia geológica: Al norte tenemos depósitos Terciarios y Cuaternarios con algunos afloramientos

tos del Cretácico. En la parte montañosa central y en las montañas Mayas, encontramos rocas Paleozoicas y algunas otras de edades más antiguas. Posiblemente al sur de este arco montañoso y de las fallas que atraviesan el país, encontramos depósitos más recientes del Terciario y Cuaternario, provenientes de actividad volcánica y producto de la erosión de rocas más antiguas; por último, al sur, en el océano Pacífico está ubicada una zona de subducción que crea una fosa profunda mar abierto (Fig. No. 5).

Figura N° 5



Mapa Geológico de Guatemala.

Las cuencas sedimentarias en Guatemala y su potencial petrolero

Existen características indispensables para la generación de petróleo en cualquier parte del mundo y así mismo, subsecuentemente, hay que agregar otros factores para que se den las condiciones de una acumulación comercial.

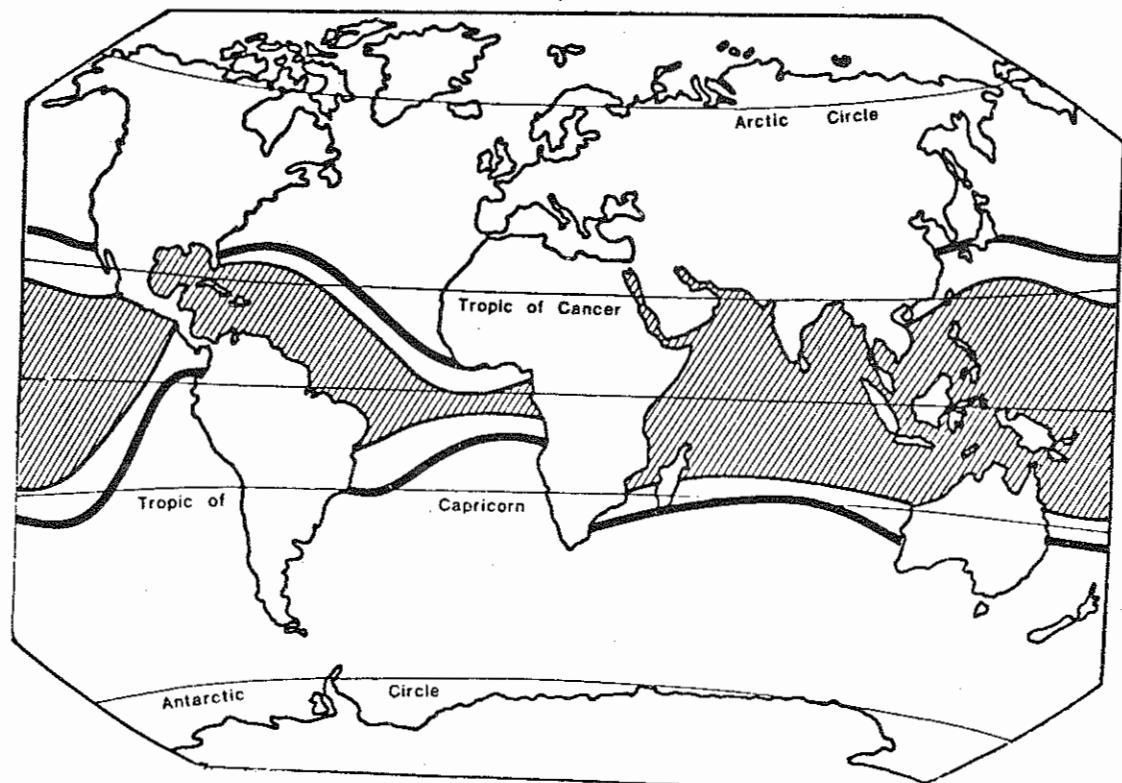
La teoría orgánica de la generación del petróleo dice que la materia principal que dio origen al petróleo fue una gran cantidad de plantas microscópicas y pequeñas formas de vida animal que llegaron al mar por medio de los ríos con lodos y sedi-

mentos, y que a través del tiempo y por medio de procesos de presión, temperatura y reacciones químicas causaron que esos desechos orgánicos se transformaran en hidrocarburos posteriormente.

El área donde se forma o se acumula petróleo o gas debe tener suficiente permeabilidad para que existan migraciones, permitiendo así acumulaciones en las distintas trampas impermeables.

Durante la generación del petróleo es necesario que la roca sea capaz de retenerlo permitiéndose que este llegue al grado de madurez necesario y

Figura N° 6



Zonas con mayor abundancia de arrecifes de coral en nuestros días (según Schwarzbach 1961).

crear grandes cantidades indispensables para un reservorio comercial. Condiciones de temperatura, presión y factores de permeabilidad y porosidad son indispensables en estos casos.

En Guatemala, en la formación Cobán C. todas estas condiciones se dieron y están entre las zonas típicas productoras en las Cuencas del Petén. Allí la formación Cobán (Cretácico) en su fase intermedia con anhidritas intercaladas de niveles de dolomías y calizas, es la zona que en la actualidad está produciendo el petróleo de los campos petroleros del área de Rubelsanto.

Más abajo en el Jurásico también hay formaciones con potencial para producir hidrocarburos como el caso de la formación Macal (Paleozóico Superior) y los niveles bajos de Todos Santos (Jurásico).

Existen también ambientes característicos que permiten la formación de reservorios ideales; el caso de los arrecifes es un buen ejemplo. En Guatemala a través de las épocas generadoras de petróleo y las posteriores se dieron latitudes que pudieron haber permitido la formación de estos ambientales siempre y cuando el tectonismo lo haya permitido. En la Fig. No. 6, vemos la distribución de arrecifes de coral en nuestros días. Un arrecife de coral necesita temperaturas que se mantengan por encima de los 21°C; esto lo limita teóricamente a un área aproximadamente entre 30°N y 30°S de latitud. (Fig. No. 6). En base a los modelos compilados por Habicht (1979) se puede ver que Guatemala, ha estado en este rango, lo cual nos deja abierta la puerta de tener arrecifes de coral presentes en las áreas en donde las condiciones geográficas lo permitieran. (Fig. No. 7).

CUENCAS SEDIMENTARIAS

Las cuencas sedimentarias en Guatemala son las siguientes:

- 1— Cuenca de Chapayal
- 2— Cuenca de Amatique

Además encontramos otros puntos de interés que son:

- 3— Plataforma de Yucatán
- 4— Área del Pacífico (Fig. No. 8)

1— Cuenca de Chapayal:

Esta cuenca de origen Mezosóico-Cenozoico produce petróleo comercial de los horizontes de la formación Cobán (Cretácico) aproximadamente de 9,000 BPD a 10,000 BPD con reservas de 31.46×10^6 barriles en sitio. El tipo de control de trampa en esta cuenca es una mezcla de compresiones y tensiones estructurales así como de la migración de capas de sal de niveles más bajos creando así los típicos anticlinales asimétricos de esa área en donde las fallas de cabalgamiento son tan conocidas.

Possiblemente los depósitos de sal que se depositaron en México en el Jurásico se extienden en Guatemala y esto ha creado las estructuras características de esta cuenca, donde los pozos de Rubelsanto y Tortugas son un ejemplo de los domos salinos causados por la migración de la sal a las capas superiores en busca de estabilidad, implicando así una fracturación y porosidad secundaria en los carbonatos.

En esta cuenca tenemos aproximadamente de 40 a 50 estructuras, hasta el momento se ha perforado aproximadamente 45 pozos, de los cuales la mayoría han tenido manifestaciones de petróleo en diferentes intervalos. De ellos, hay 10 pozos productores de petróleo, 11 abandonos, 6 secos, 3 de inyección de agua, y el resto han sido tapados o abandonados por diferentes circunstancias.

Si analizamos la cantidad de estructuras en esta

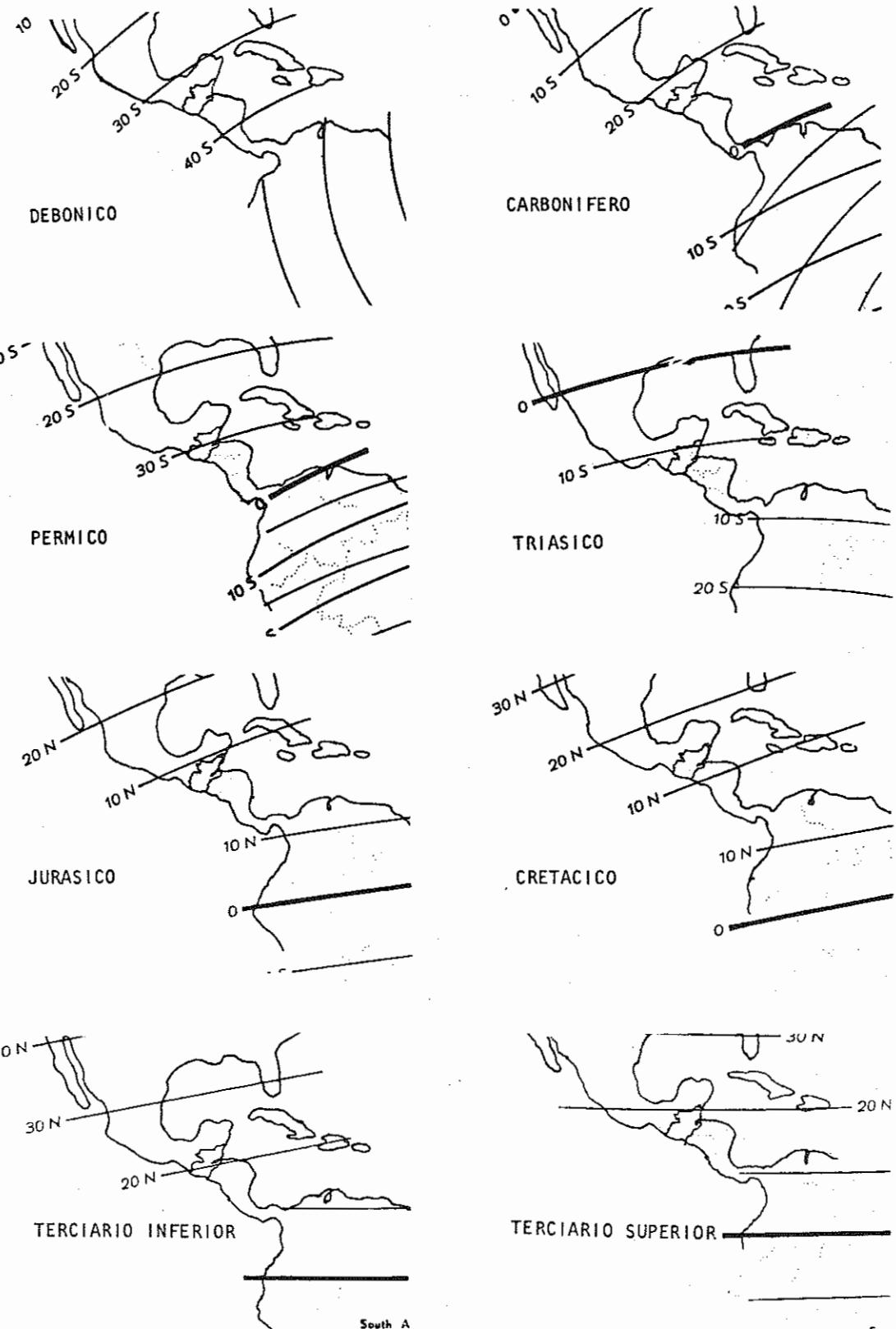


Fig. No. 7
Cambio de las latitudes a través del tiempo según modelos compilados por Habantch (1979).

cuenca, tamaño y número de ellas que han sido perforadas, nos damos cuenta que sólo un porcentaje mínimo de estas han sido estudiadas por perforación directa.

Las probabilidades de que exista petróleo en esta cuenca son altas y aumentan cada día más en que conocemos los aspectos y los procesos de deposición de esta área.

2— Cuenca de Amatique:

En esta cuenca, al sureste del país, existieron rocas generadoras y condiciones favorables para la generación de hidrocarburos. El área es particularmente interesante desde el punto de vista de que pudieron haber existido arrecifes en el pasado junto con varias estructuras favorables las cuales han sido escasamente perforadas.

Sólo un pozo, El Manabique C., ha sido perforado y dio con capas del Permiano a una profundidad total de 4,230 mts. A más de 2,096 mts. debajo de la Caliza Cobán de edad Cretácica inferior a media, se encontró petróleo en fracturas, pero el pozo nunca se sometió a pruebas del contenido de la formación debido a problemas técnicos y el pozo fue abandonado. Según Meyerhoff (1980) la localización del pozo fue incorrecta pues fue localizado a un lado de la cresta anticlinal, y además opinó que la cuenca de Amatique tiene un buen potencial por su localización y características propias.

3— Plataforma de Yucatán:

En la Plataforma de Yucatán vemos un ambiente totalmente distinto al que observamos al sur en Chapayal ya que no existen cambios en el relieve y nos encontramos con depósitos de sabkha con grandes depósitos evaporíticos con presencia de diferentes tramos con una porosidad primaria mayor y mejor desarrollada.

Vemos aquí ambientes supramareales en donde normalmente ocurre una mayor dolomitización que origina una mayor porosidad secundaria correspondiente. Así se puede predecir que los tramos de roca almacén se deben a porosidad desarrollada y no a fracturación como en el caso de la Cuenca Chapayal.

Otro aspecto interesante de esta área es la presencia de trampas estatigráficas que son de gran extensión pues no estuvo sometida a tanto esfuerzo estructural.

Sólo 6 perforaciones se han hecho en esta área de las cuales una es productora de petróleo con una producción aproximada de 3.000 barriles al día; las demás tuvieron manifestaciones de petróleo en diferentes intervalos.

Se especula que existen de 15 a 20 estructuras pequeñas y medianas, además de mayores estructuras regionales de cientos de kilómetros, las cuales han sido escasamente estudiadas.

4— Área del Pacífico:

El área menos estudiada en Guatemala es la del Pacífico ya que la actividad volcánica Terciaria y Cuaternaria fue intensa; sin embargo más al sur y costa afuera existen estructuras atractivas que podrían ser productoras de petróleo. Recientemente expediciones científicas estudiaron el tectonismo de las placas, y encontraron clatratos (gas) en el lecho marino, lo cual además de tener un valor científico, debido a su espesor tan grande, nos incentiva a pensar que en capas más profundas puedan existir hidrocarburos, ya que en adhesión a esto, existen estructuras atractivas y grandes, incrementando esto el potencial del área.

Hay que agregar también que en el centro del departamento del Petén al oeste, y a lo largo de

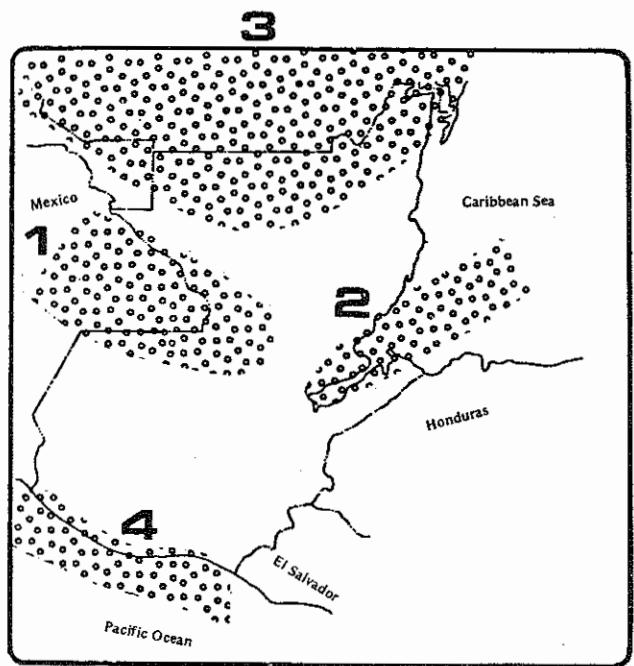


Fig. No. 8
Cuenca y puntos potenciales petroleros en Guatemala.

la frontera con México hay estructuras anticlinales con información bastante alentadora sobre pozos con indicios de petróleo.

En general las cuencas petroleras de Guatemala son bastante atractivas desde el punto de vista petrolero, ya que el petróleo ha sido descubierto y se está produciendo actualmente en cantidades comerciales. Guatemala todavía está en su infancia petrolera y cada perforación ha servido para ir acumulando más y más información y seguir aprendiendo del potencial en el subsuelo nacional.



Fig. No. 9
Cuenca Petroleras de América.

MOLINOS DE VIENTO PARA BOMBEO DE AGUA

2^a entrega

CAPITULO 2 – DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO DE EJE HORIZONTAL

2.1 CALCULO DEL ROTOR

Existen diversas configuraciones de palas, como se puede observar en la Figura 37. En este documento sólo nos referimos al tipo plancha de acero (letra e de la figura); sin embargo en las referencias bibliográficas 2.5, 2.6 y 2.7 se podrá encontrar información sobre molinos de viento construidos con rotores tipo CRETA (letra a de la figura), el que presenta una geometría sencilla y tiene interesantes características técnicas que lo hacen especialmente atractivo en aplicaciones de riego.

2.1.1 Geometría del Rotor

Cuando la pala de una aerobomba está bajo el efecto de una corriente de aire experimenta una fuerza. Si tomamos un elemento de pala esta fuerza se puede descomponer en la dirección del viento relativa y perpendicular a este, según se muestra en la Figura 38.

Los componentes en las direcciones relativa (d_D) y perpendicular (d_L) a la dirección del viento pueden ser expresados por las siguientes relaciones matemáticas:

$$d_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 dA \quad (2 - 1)$$

$$d_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 dA \quad (2 - 2)$$

Donde:

d_L = fuerza de sustentación, N

d_D = fuerza de arrastre, N

ρ = densidad del aire, (1,23 kg/m³ (*))

C_L = coeficiente de sustentación, adim.

C_D = coeficiente de arrastre, adim.

dA = área elemental (cuerda x longitud diferencial de pala)

V_∞ = velocidad del viento, m/seg

(*) La densidad del aire a nivel del mar es más o menos 1,23 Kg./m³. Cada mil metros de altura se reduce un 10 o/o. A 4000 metros de altura $\rho \cong 0,8$ Kg./m³.

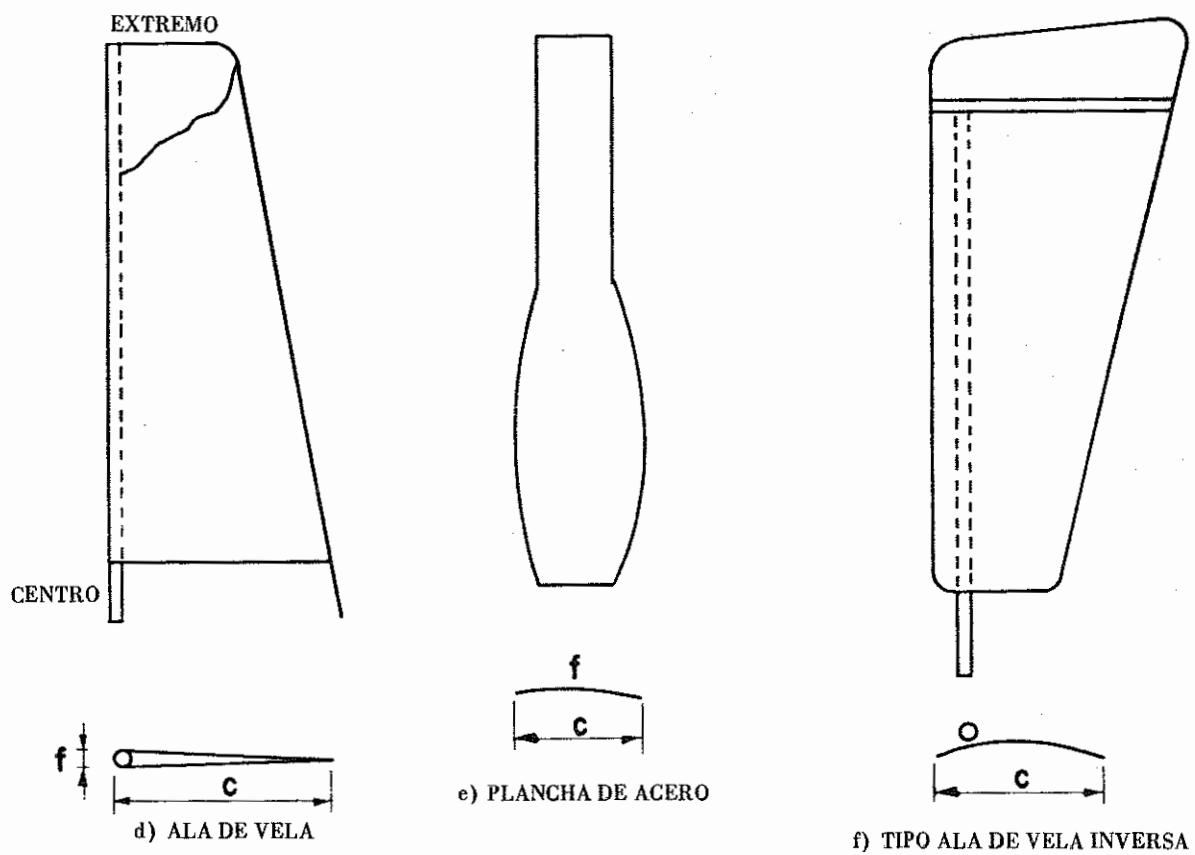
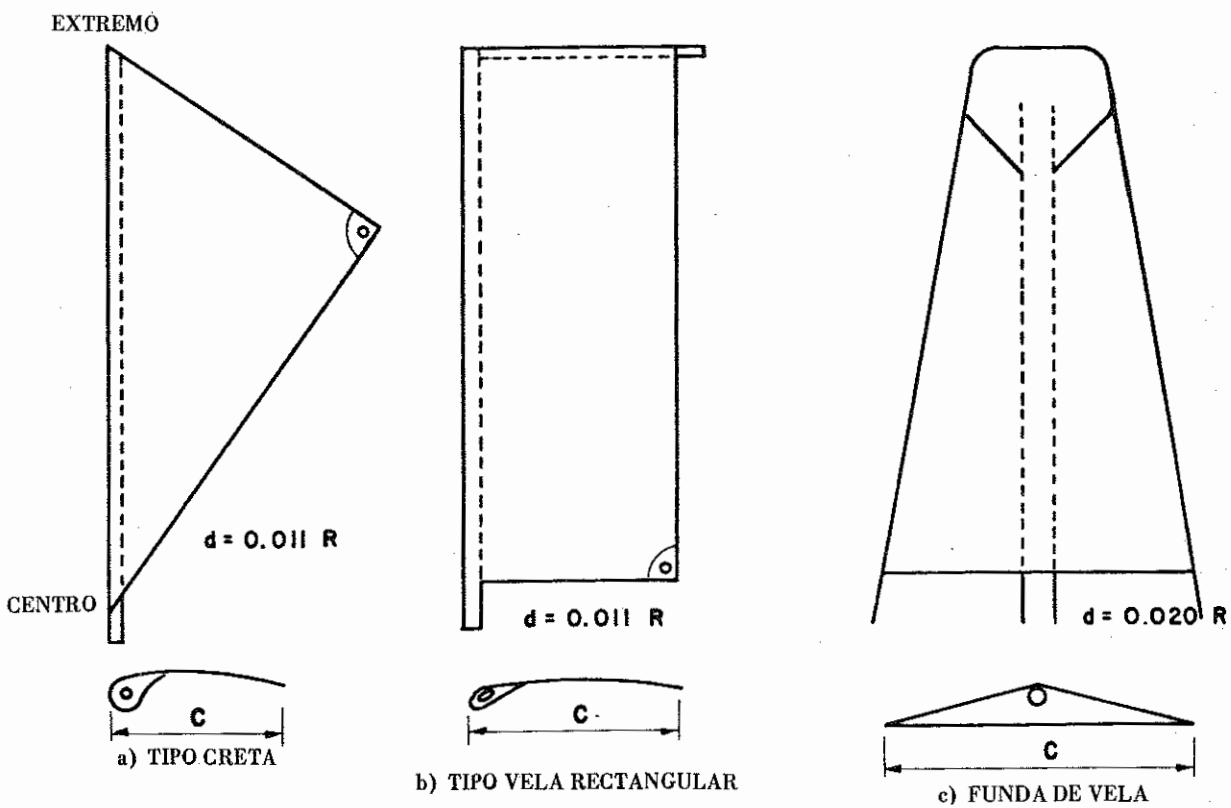


Figura 37 — Algunos Tipos de Geometría de Palas Utilizados

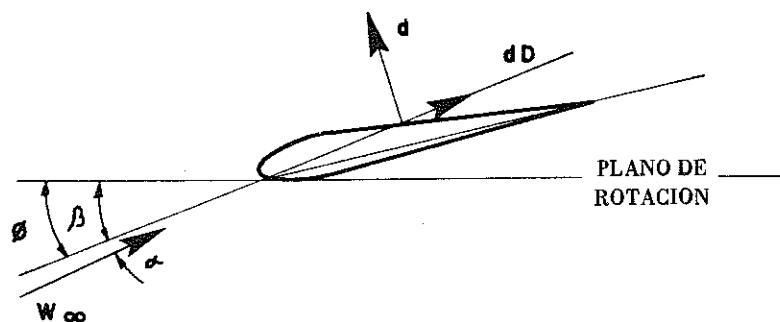


Figura 38 — Efecto del Viento sobre un Elemento de Pala

Aplicando la teoría del momentum y la ecuación de la energía a un elemento de pala e integrando a lo largo de la longitud de esta, se puede demostrar que para lograr la máxima transformación de la energía cinética del aire en mecánica de la pala, ésta debe tener una torsión tal que permita la presentación de un ángulo ϕ del viento relativo dada en la Fig. 39 y una longitud de cuerda que se ajuste a la función ψ , ver Fig. 40, dada por:

$$\psi = \frac{N.C.C_D.W}{2 V_D} \quad (2 - 3)$$

Donde:

- N = número de palas
- C = longitud de la cuerda (ver Fig. 37), m
- C_D = coeficiente de arrastre, adim.
- W = velocidad angular del rotor, rpm
- V_D = velocidad de diseño, m/seg.

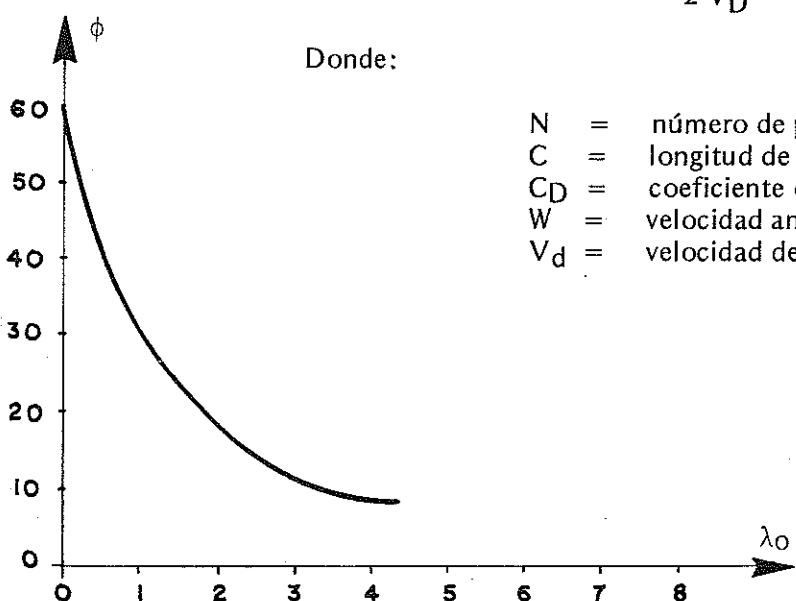


Figura 39 — Variación del Ángulo Óptimo de la Velocidad Relativa (ϕ) con la Relación de Velocidades en el Extremo de la Pala (λ_0)

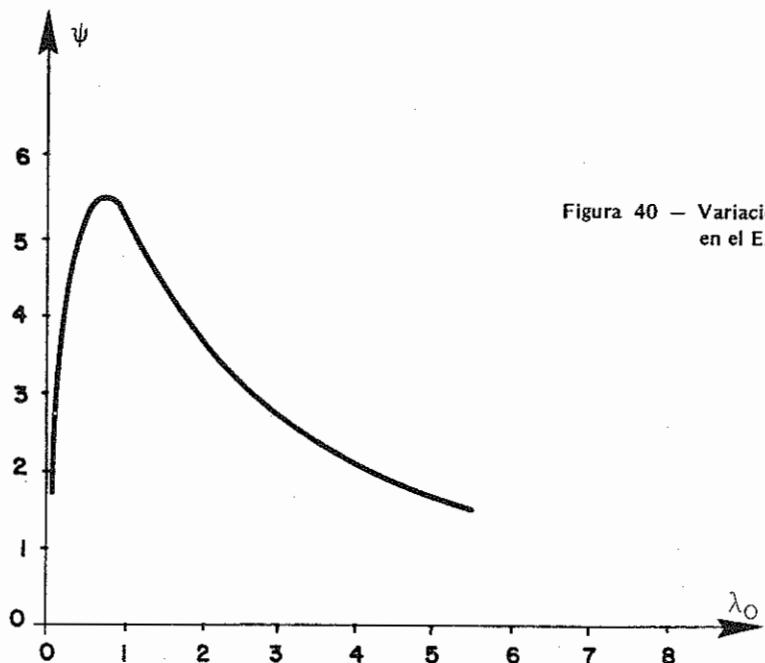


Figura 40 — Variación de la Función ψ con la Relación de Velocidades en el Extremo de la Pala (λ_0)

De la Figura 39 se deduce que la pala es muy abierta en la raíz y que este ángulo disminuye conforme nos acercamos a la punta, ya que según la Figura 38:

$$\beta = \phi - \alpha \quad (2-4)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \beta &= \text{ángulo de la pala} \\ \phi &= \text{ángulo de la velocidad relativa} \\ \alpha &= \text{ángulo de ataque del perfil} \end{aligned}$$

En la ecuación (2-4), $\alpha = \text{cte}$ pues se toma aquel para el cual la relación (CD/CL) es mínima.

De la Figura 40 se deduce que la longitud de la cuerda aumenta hasta un máximo, cerca de $\lambda_0 = 1$, y luego disminuye hacia el extremo de la misma.

Para el rotor que nos interesa, consideramos por razones de construcción y costo, que vamos a usar planchas metálicas — curvadas, con una sección como la que aparece en la Figura 41.

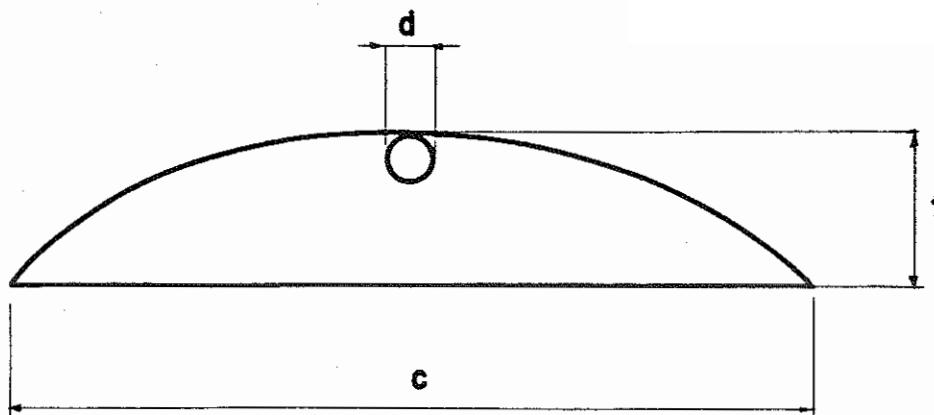


Figura 41 — Sección de la Pala a ser Dimensionada

Para la sección mostrada en la Figura 41, $(C_D/C_L) = 0,05$ y $C_L = 1,1$ para $f/c = 0,1$.

Si escogemos un valor de λ_0 moderado, por ejemplo $\lambda_0 = 2$, para $W = 35$ rpm, se puede lograr el valor de $(C_D/C_L) = 0,05$.

El número de palas a ser escogido, en función de las disponibilidades del mercado, es $N = 12$ con lo que se podrá lograr un buen aprovechamiento de ellas, ya que las dimensiones disponibles son para planchas de 1,0m x 2,0m.

Teniendo en cuenta estas consideraciones y realizando los cálculos indicados en la Tabla 13, podemos llegar a establecer la geometría óptima de la pala.

TABLA 13

GEOMETRIA OPTIMA DE LA PALA

λ_0	r (m)	ϕ ($^{\circ}$)	β ($^{\circ}$)	ψ	C (m)
0.1	.125	56.2	52.2	.17715	.1035
0.2	.250	52.4	48.4	.31128	.1819
0.4	.500	45.5	41.5	.47730	.2789
0.6	.750	39.4	35.4	.54406	.3179
0.8	1.000	34.5	30.5	.55430	.3239
1.0	1.250	30.5	26.5	.53657	.3135
1.2	1.500	28.0	24.0	.5000	.2922
1.4	1.750	23.5	19.5	.4600	.2688
1.5	1.875	22.5	18.5	.45568	.2663
1.8	2.250	19.0	15.0	.4000	.2337
2.0	2.500	17.8	13.8	.38072	.2224

Como el 75 o/o de la potencia se obtiene de la mitad exterior de la pala y la eficiencia en la punta de estas es muy baja (1), se puede por razones constructivas, linearizar la pala en geometría y torsión entre 0.5R y 0.9R. Para nuestro caso presentamos en la Tabla 14 los resultados de tales cálculos.

TABLA 14
LINEARIZACION DE LA PALA

r (m)	C (m)	β ($^{\circ}$)
0.505	.2789	25.06
0.985	.3379	29.88
1.250	.3146	26.49
1.500	.2949	23.62
2.500	.2160	12.12

2.1.2 Cálculo del Soporte

Si escogemos una unión tipo poste para conectar la pala con el cubo, ver Figura 42, vemos que durante la operación del rotor aparecen dos fuerzas, una del viento F_A que trata de doblar el soporte y otra la centrípeta (F_C) que trata de arrancar el soporte del cubo (asumiendo una unión perfecta entre pala y soporte). Asimismo, una otra fuerza actúa en el plano de rotación (la que produce el torque).

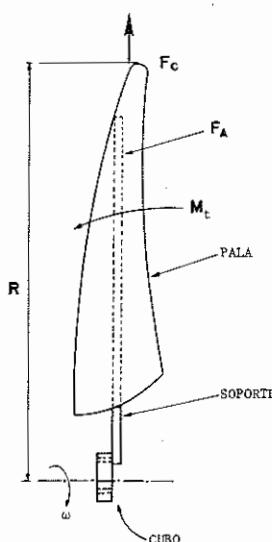


Figura 42 — Esquema de las Fuerzas actuando sobre una Pala

Considerando la fuerza del viento aplicada en el extremo de la pala y la centrífuga a la mitad del radio, tenemos las siguientes cargas:

$$M_f = C_A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho V_f^2 \cdot A \cdot R \quad (2 - 5)$$

$$F_c = \frac{m U^2}{(R/2)} \quad (2 - 6)$$

$$M_t = \frac{P_v}{N \cdot W} \quad (2 - 7)$$

Donde:

- M_f = momento de la fuerza aerodinámica, N-m
- C_A = coeficiente de fuerza axial
- ρ = densidad del aire, kg/m³
- V_f = velocidad de corte del aire (a esta velocidad el equipo deja de operar), m/seg
- A = área barrida por el rotor, m²
- R = radio del rotor, m
- F_c = fuerza centrípeta, N
- m = masa de la pala, kg
- U = velocidad tangencial de la pala a $R/2$ del centro de giro
- M_t = contribución de 1 pala al torque total.

Se define el Momento Combinado (M_i) como:

$$M_i = 0,35 M_f + 0,65 \sqrt{M_f^2 + M_t^2} \quad (2 - 8)$$

De esta manera se obtiene el diámetro del soporte a través de la expresión:

$$d = \sqrt[3]{\frac{1000 M_i}{\sigma_p}} \quad (2 - 9)$$

donde:

$$\sigma_p = \text{esfuerzo permisible, kg/cm}^2$$

2.2 CALCULO DE LA TRANSMISION

Este es el mecanismo usado para llevar la potencia desde el rotor hacia la bomba.

2.2.1 Tipos de Transmisión

2.2.1.1 Transmisión indirecta

Existe una reducción de la velocidad y luego se cambia el movimiento circular en uno alternativo mediante un juego de planetarios, siguiendo el esquema mostrado en la Figura 43.



W = velocidad angular del rotor

W_E = velocidad angular del engranaje

W_T = velocidad de la transmisión

W_B = velocidad de la bomba

Y se cumple:

$$W_B = W_T = W_E = \frac{W}{r'} \quad (2-10)$$

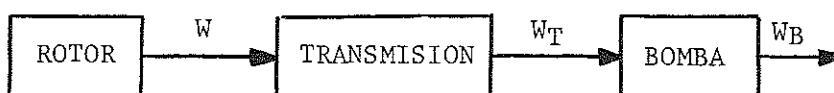
Donde:

r' = factor de reducción

Figura 43 – Esquema de Transmisión Indirecta

2.2.1.2 Transmisión directa

En este caso, la transmisión será de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 44.



Y se cumple:

$$W = W_T = W_B \quad (2-11)$$

Figura 44 – Esquema de Transmisión Directa

2.2.2 Selección del Tipo de Transmisión

Para seleccionar el tipo de transmisión a usar hay que tener en cuenta la celeridad λ_0 y el diámetro del rotor D.

En la Figura 45 se han graficado la velocidad angular (W) en función del diámetro del rotor para $\lambda_0 = 1$ y $\lambda_0 = 2$, basados en las cifras que aparecen en las Tablas Nos. 15 y 16.

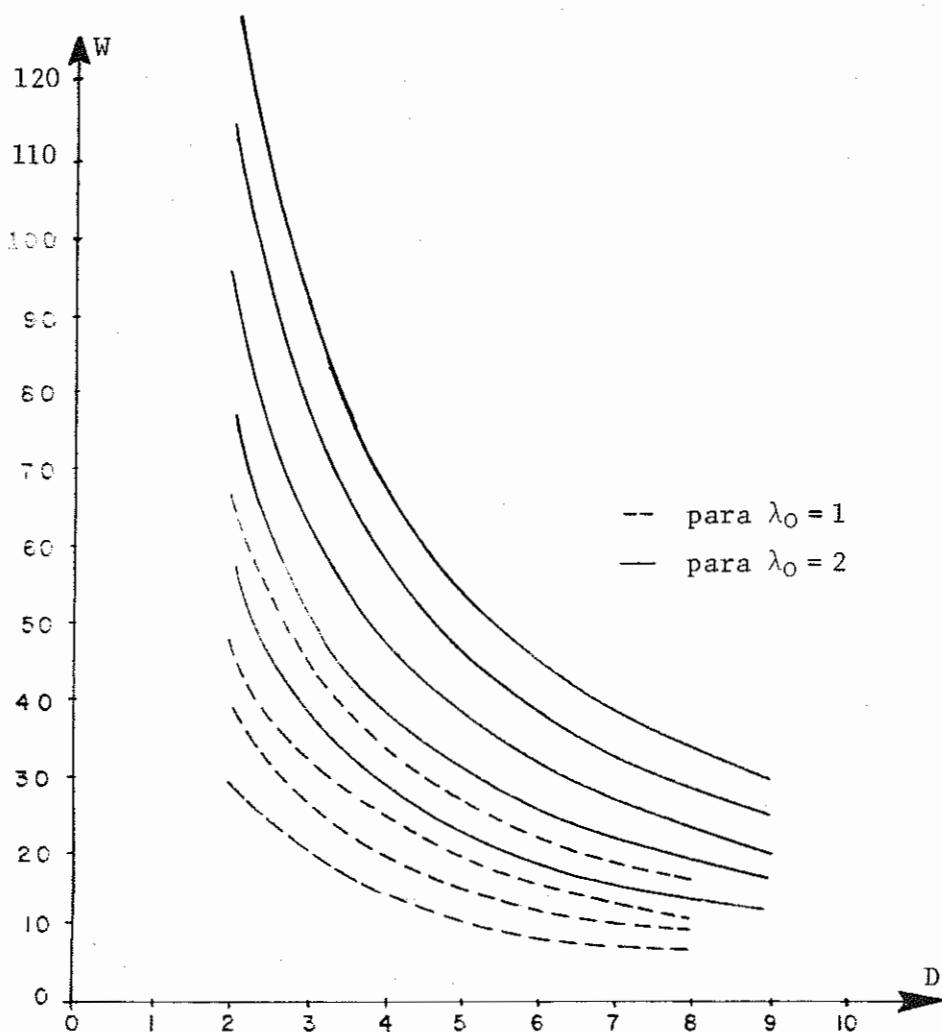


Figura 45 – Variación de la Velocidad Angular del Rotor en Función de su Diámetro

En la Figura 46 se muestra la variación de la celeridad (λ_0) en la función del diámetro del rotor (D) para distintos valores de la velocidad angular (N).

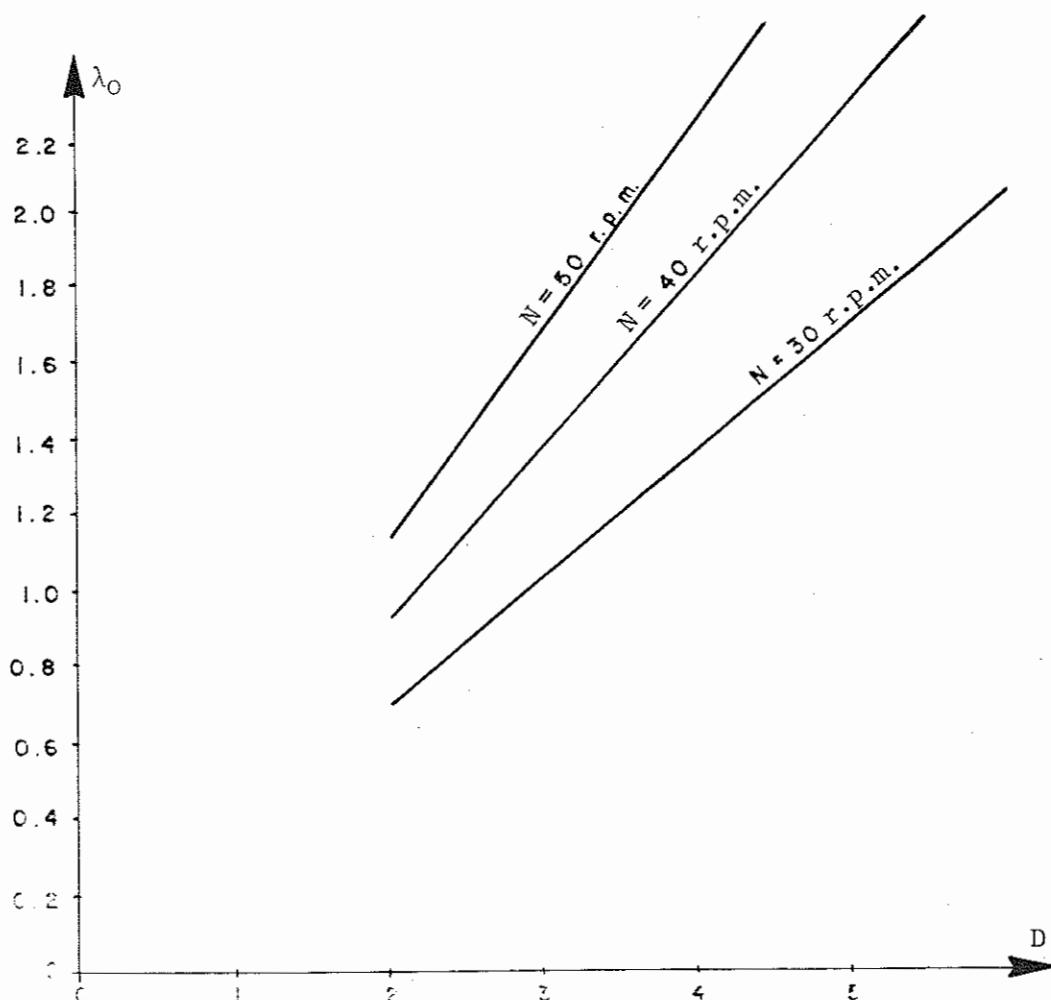


Figura 46 -- Variación de la Celeridad λ_0 en Función del Diámetro del Rotor y de su RPM

TABLA 15
VALORES DE LA VELOCIDAD ANGULAR (W) PARA $\lambda_0 = 1$

D (m)\V (m/seg)	3	4	5	6	7
2	28.64	38.19	47.74	57.29	66.84
3	19.09	25.46	31.83	38.19	44.56
4	14.32	19.09	23.87	28.64	33.42
5	11.45	15.27	19.09	22.91	26.73
6	9.54	12.73	15.91	19.09	22.28
7	8.18	10.91	13.64	16.37	19.09
8	7.16	9.54	11.93	14.32	16.71
9	6.36	8.48	10.61	12.73	14.85
10	5.72	7.63	9.54	11.45	13.36

TABLA 16
VALORES DE LA VELOCIDAD ANGULAR (W) PARA $\lambda_0 = 2$

D (m)\V (m/seg)	3	4	5	6	7
2	57.28	76.38	95.48	114.58	133.68
3	38.18	50.92	63.66	76.38	89.12
4	28.64	38.19	47.74	57.28	66.84
5	22.90	30.54	38.18	45.82	53.46
6	19.08	25.46	31.82	38.19	44.56
7	16.36	21.82	27.28	32.74	38.18
8	14.32	19.09	23.86	28.64	33.41
9	12.72	16.96	21.22	25.43	29.70
10	11.44	15.26	19.08	22.90	26.72

Según la experiencia, un sistema eólico funciona bien entre 30 - 50 rpm. Si queremos un rotor con λ_0 moderado (entre 1 y 2), aquí tenemos el criterio para variar la celeridad y decidir en que caso es necesario hacer una reducción o multiplicación de la velocidad angular para que el sistema funcione en condiciones óptimas.

2.2.3 Mecanismo Biela-Manivela

El mecanismo biela-manivela es una opción a ser utilizada en la transmisión, en casos en que pueda evitarse el costoso sistema de transmisión indirecta.

Para cálculos más precisos de la dinámica del sistema biela-manivela, así como las vibraciones que entran en juego, puede consultarse la referencia 2 - 8.

2.2.3.1 Relación r/L óptima

El cálculo de la relación entre el radio de la manivela (r) y la longitud de la biela (L) es realizado en base a las ecuaciones de potencia (P) y torque (Q):

$$P = \rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot W (\operatorname{sen} \alpha + \frac{a}{2} \operatorname{sen} 2\alpha) \quad (2 - 12)$$

$$Q = \rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot r (\operatorname{sen} \alpha + \frac{a}{2} \operatorname{sen} 2\alpha) \quad (2 - 13)$$

donde:

- ρw = densidad del agua, kg/m^3
 g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/seg^2
 H = altura de bombeo, m
 A_p = área del pistón, m^2
 W = velocidad angular, rad/seg
 a = $\frac{r}{L}$, adimensional
 α = ángulo de ataque del perfil

Haciendo $f(a) = (\operatorname{sen} \alpha + \frac{a}{2} \operatorname{sen} 2\alpha)$, las ecuaciones (2 - 12) y 2 - 13) pueden ser escritas por:

$$P = \rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot W \cdot f(a) \quad (2 - 14)$$

$$Q = \rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot r \cdot f(a) \quad (2 - 15)$$

La potencia (P) y el torque (Q) serán máximos cuando $f(a)$ es máxima.

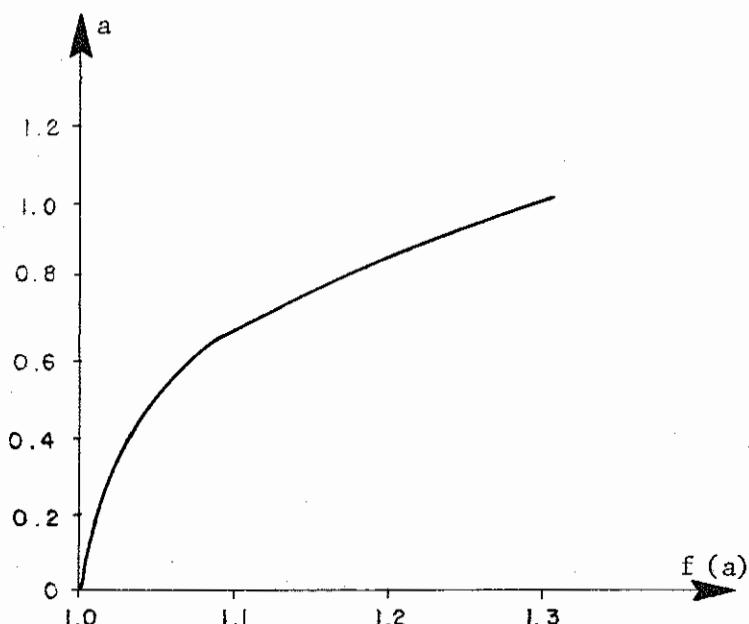
En la Tabla 17 se ha calculado el valor de la función $f(a)$ para diversos valores de la relación r/L . Con estos datos se ha dibujado la Figura 47 en la que se observa que valores interesantes de "a" se encuentran entre 0,2 – 0,4, considerándose como límite 0,5, lo que corresponde a $f(a)$ entre 1,02 – 1,06.

TABLA 17

VALORES DE $f(a)$

a	α	β	$f(a)$
.10	84.17	5.71	1.0049
.20	79.27	11.33	1.019
.25	77.01	14.10	1.029
.30	74.95	16.84	1.040
.40	71.41	22.28	1.060
.50	68.55	27.73	1.101
.60	66.16	33.29	1.130
.80	62.57	45.24	1.210
1.0	60.00	60.00	1.290
1.2	58.10		1.380

Estos valores de $f(a)$, además de fijar los valores óptimos de la relación r/L , servirán para definir valores del diámetro de la garganta de la tornamesa.

Figura 47 — Gráfico de "a" en Función de $f(a)$

2.2.3.2 Cálculo de la sección de la biela

Si consideramos la biela como una columna delgada sometida a compresión podemos usar, para el cálculo de la sección de ella, las siguientes expresiones:

$$f \cdot P_c = n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I / L^2 \quad (2 - 16)$$

$$P_c = 0,15 F^{(*)} \quad (2 - 17)$$

donde:

f = factor de seguridad (hasta 20 para condiciones inseguras según Hütte — bibliografía 2 - 14)

P_c = fuerza de compresión sobre la biela

F = fuerza de tracción sobre la biela

E = módulo de elasticidad (2.1×10^6 Kg/m² para el acero).

I = momento de inercia

L = longitud de la biela

n = factor debido a la distribución de la carga ($n = 1$ para carga uniformemente distribuida).

(*) para efectos de cálculo se considera la fuerza de compresión como un 15 o/o de la fuerza de tracción.

La Figura 48 muestra el diagrama de fuerzas que actúan sobre la biela.

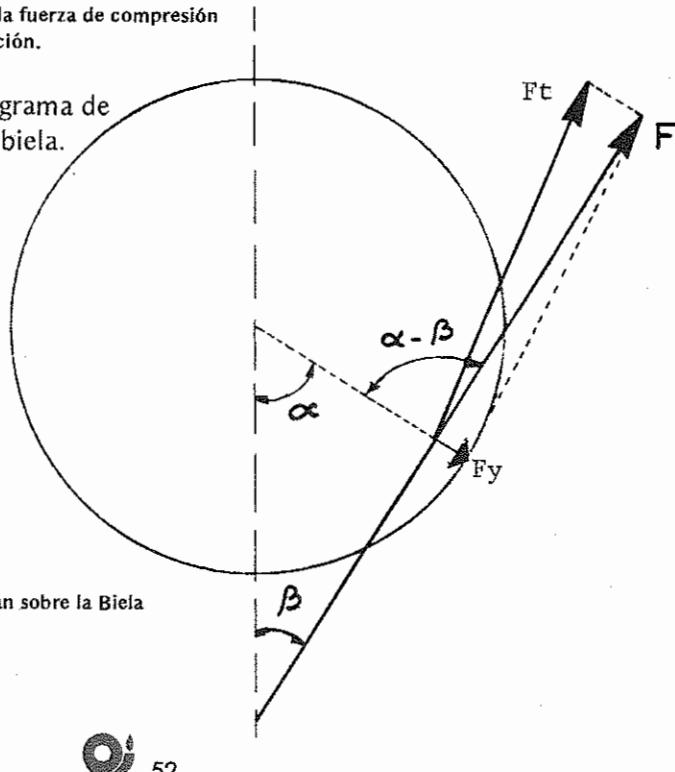


Figura 48 — Diagrama de Fuerzas que actúan sobre la Biela

Como se desprende de la Figura 48, F es la componente de F_t que produce el torque máximo, o sea:

$$F_t = \frac{\text{TORQUE MAXIMO}}{r} = \frac{Q_{\max}}{r} \quad (2 - 18)$$

$$\text{y} \quad F = \frac{F_t}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2 - 19)$$

Sustituyendo (2 - 15) en (2 - 18), tenemos:

$$F_t = \rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max} \quad (2 - 20)$$

Luego, sustituyendo (2 - 20) en 2 - 19):

$$F = \frac{\rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max}}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2 - 21)$$

Ahora, reemplazando (2 - 21) en (2 - 17)

$$P_c = 0,15 \cdot \frac{\rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max}}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2 - 22)$$

Con el valor de P_c encontrado en la expresión (2 - 22), volvemos a la expresión (2 - 16) para calcular la longitud (diámetro) de biela:

$$f \cdot \frac{0,15 \rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max}}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (2 - 23)$$

De la expresión (2 - 23) se obtiene el valor del diámetro L de la biela.

2.2.3.3 Cálculo de la sección del vástago

El vástago es un elemento muy esbelto, por lo que es necesario establecer guías intermedias (Ver Figura 49).

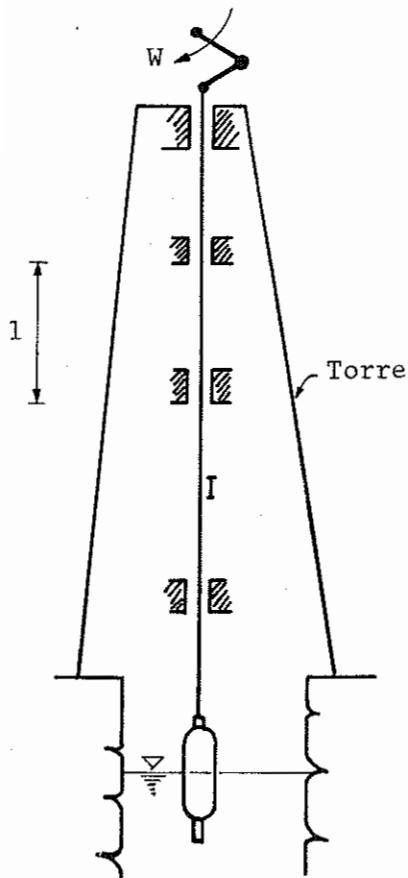


Figura 49 — Cálculo de la Sección del Vástago

La fuerza actuante sobre el vástago es una fuerza de tracción (F_y), dada por:

$$F_y = F \cdot \cos \beta \quad (2 - 24)$$

Reemplazando (2 - 21) en (2 - 24)

$$F_y = \frac{\rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max} \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2 - 25)$$

Considerando el esfuerzo de compresión como siendo el 15 o/o del esfuerzo de tracción, tenemos:

$$P_c = 0,15 F_y = 0,15 \frac{\rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max} \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2 - 26)$$

Ahora, usando la expresión (2 - 16) para un longitud (I) entre guías del vástago y reemplazando en ella el valor de P_c encontrado en (2-26), obtenemos:

$$f \cdot \frac{0,15 \cdot \rho w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max} \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad (2 - 27)$$

Luego, resolviendo la ecuación (2 - 27) se puede encontrar el valor de l para una determinada sección (barra o tubo), cuando usamos un material de característica E conocido y $f = 10$ conforme se ilustra a continuación.

Considerando las posibilidades de usar hierro liso o tubo standar, se han elaborado las Tablas Nos. 18 y 19.

TABLA 18

**DIFFERENTES DIAMETROS (d) DE HIERRO LISO POSIBLES DE USAR
PARA EL VASTAGO CON GUIAS A UNA LONGITUD (l)**

<i>l</i> (m)	0.5	1.0	1.5	2	2.5	3.0
d (cm)	1.4	1.6	1.85	1.98	2.10	2.20
peso (Kg/m)	4.21	1.57	2.11	2.41	2.72	2.98

TABLA 19

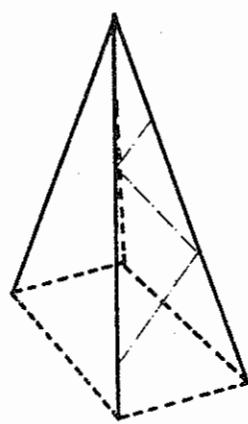
**DIFFERENTES DIAMETROS (d) DE TUBO ESTANDAR POSIBLES DE USAR
PARA EL VASTAGO CON GUIAS A UNA LONGITUD (l)**

d (plg)	1/2	3/4	1
<i>l</i> (m)	1.30	1.92	2.74
peso (Kg/m)	1.27	1.68	2.49

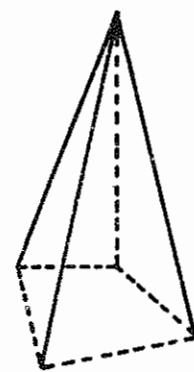
De las Tablas 18 y 19 se obtiene el diámetro (d) del vástago en función de la longitud entre guías (*l*).

2.3 CALCULO DE LA TORRE

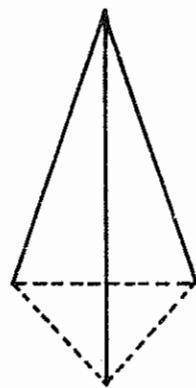
Existe una variedad de tipos, conforme se aprecia en la Figura 50, cada una de las cuales tiene rango de aplicaciones típicas con sus respectivas ventajas e inconvenientes. En esta sección sólo trataremos con las del tipo a y b.



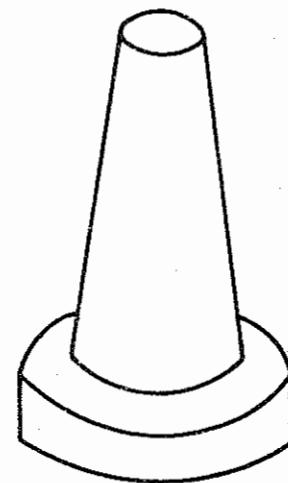
a) TORRE DE CUATRO PATAS



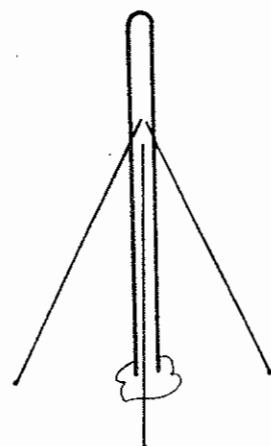
b) TORRE DE CUATRO PATAS CON TUBO



c) TORRE TIPO TRIPODE



d) TORRE DE LADRILLO



e) TORRE TIPO MASTIL CON CUERDAS TENSORAS

Figura 50 – Variedades Típicas de Torres

2.3.1 Altura de la Torre

En caso de no existir obstrucciones, este parámetro puede quedar definido en función de la distribución de la velocidad del viento con la altura. En general, esta distribución está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{V_h}{V_o} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^k \quad (2 - 28)$$

Donde:

V_h = velocidad del viento a una altura h

V_o = velocidad del viento a una altura h_0

h = altura

h_0 = altura de referencia

k = exponente, cuyo valor es:

$k = 1/2$ para $V_o = 8$ Km/hr

$k = 1/5$ para $8 < V_o < 56$ Km/hr

$k = 1/7$ para $V_o > 56$ Km/hr

La Figura 51 ilustra la expresión (2 - 28).

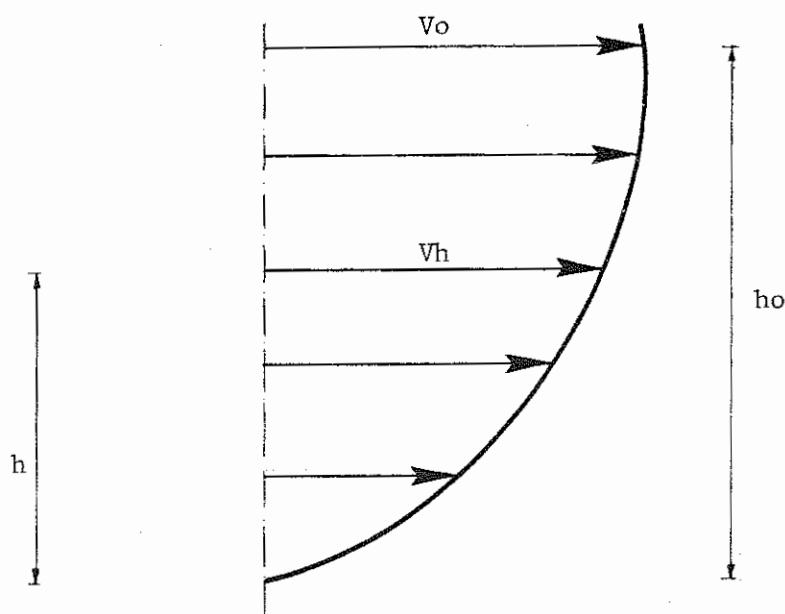
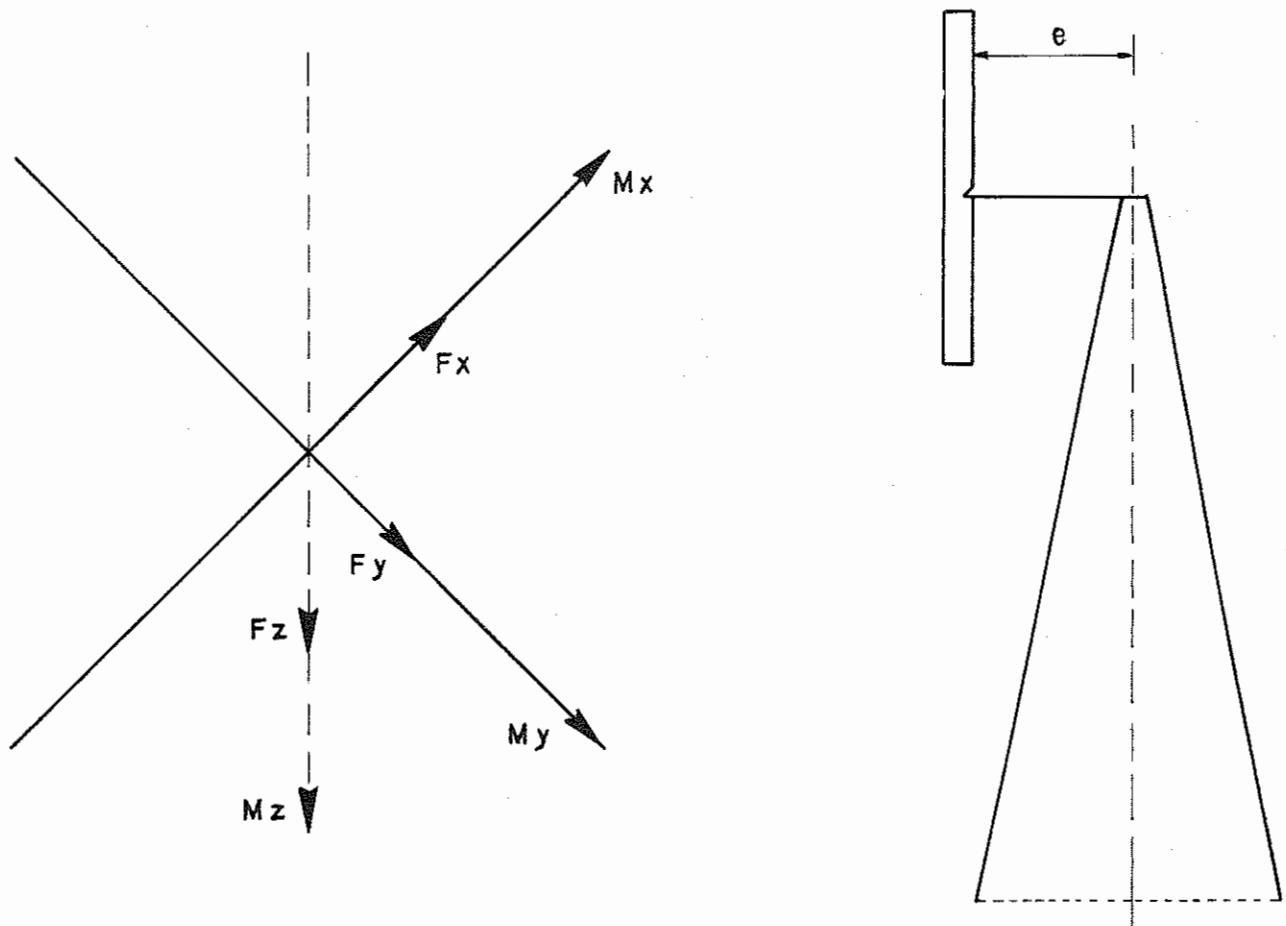


Figura 51 — Variación de la Velocidad con la Altura

2.3.2 Cálculo de la Apertura de las Patas

2.3.2.1 Análisis en condiciones normales

Tomando como referencia un sistema tri-ortogonal, podemos definir las fuerzas que actúan sobre la torre conforme se ilustra en la Figura 52.



Figuras 52 – Esquema de las Fuerzas Actuantes en la Torre

2.3.2.1.1 Fuerzas

- Fuerzas en la dirección X: F_x (Vea Figura 53)

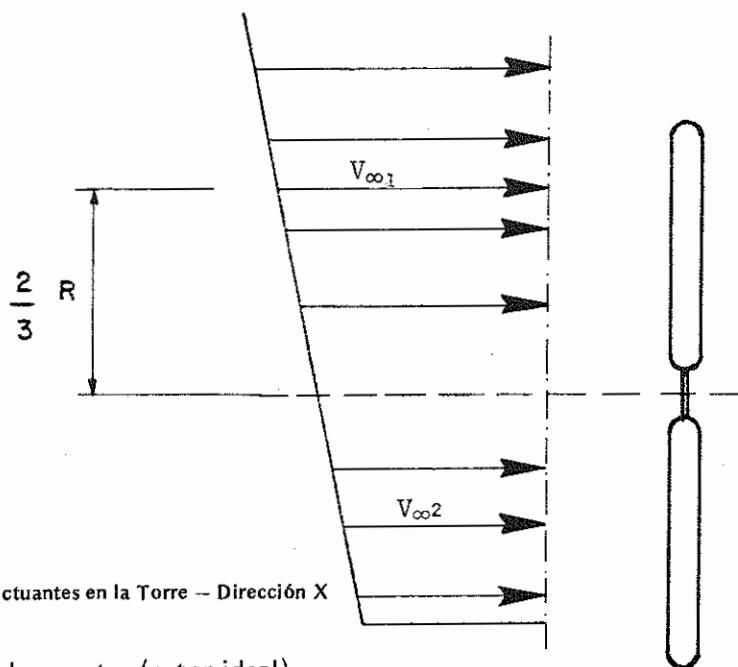


Figura 53 — Fuerzas Actuantes en la Torre — Dirección X

—fuerza de arrastre (rotor ideal)

$$F_{1x} = \frac{4}{9} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot \pi \cdot R^2$$

—fuerza de arrastre fluctuante (debido a la distribución no uniforme del viento)

$$F_{2x} = \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{N} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot (V_1 - V_2)^2$$

—fuerza giroscópica en la dirección X

$$F_{3x} = -C \cdot W \cdot mt$$

Siendo:

N = número de palas

ρ = densidad del aire

V_{∞} = velocidad del viento

R = radio del rotor

e = distancia del rotor al eje vertical

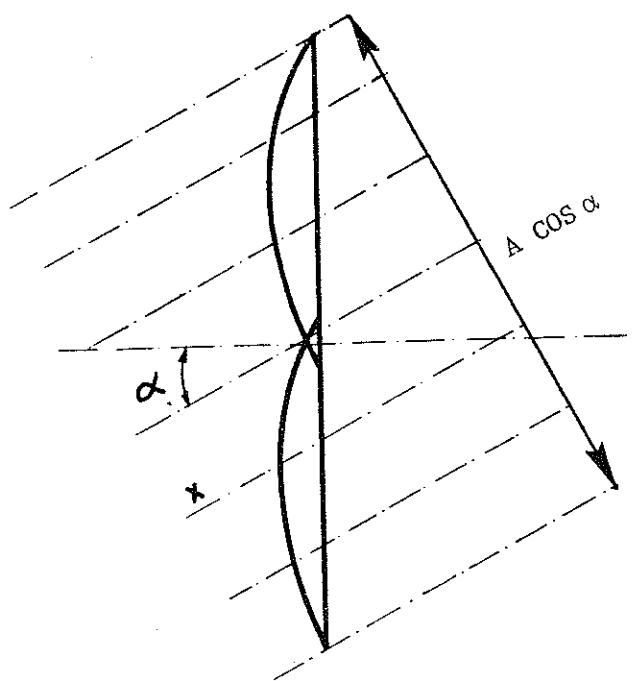
C = longitud de la cuerda

W = velocidad angular del rotor

mt = masa total en rotación

b. Fuerzas en la dirección Y: F_y

—fuerza debido a la variación de la velocidad del viento (Ver Figura 54)



$$F_{1Y} = F_x \cos \alpha \cdot \sin \alpha$$

Figura 54 — Fuerzas Actuantes en la Torre — Dirección Y (I)

—fuerza debido al desbalance producido por el rotor
(Ver Figura 55)

c. Fuerzas en la dirección Z: F_Z

—fuerza debido a la masa (m) del rotor

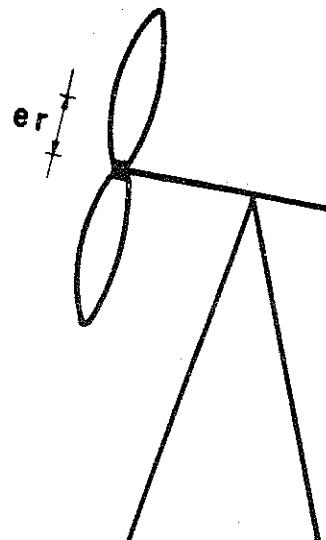
$$F_{1Z} = m \cdot g$$

g = aceleración de la gravedad

—fuerza debido al desbalance del rotor (Vea Figura 55)

$$F_{aZ} = \pm m_r e_r \cdot W^2$$

e_r = excentricidad del rotor



$$F_{2Y} = \pm m \cdot e_r \cdot w^2$$

Figura 55 — Fuerzas Actuantes
en la Torre — Dirección Y (II)

2.3.2.1.2 Momentos

a. Momento en la dirección X: M_x

—momento debido al torque

$$M_x = \frac{8}{28} \cdot \frac{V_\infty^2 \cdot \pi \cdot R^3}{\lambda_{od}}$$

λ_{od} = celeridad de diseño

b. Momentos en la dirección Y: M_y

—momento debido a la distribución no uniforme del viento (cuasiestático)

$$M_{1y} = \frac{8}{27} \cdot \frac{\rho}{N} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{cuasiestático})$$

$$M_{2y} = \frac{4}{27} \cdot \frac{\rho}{N} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{fluctuante})$$

—momento debido a la gravedad

$$M_{3y} = m \cdot g \cdot e$$

—momento debido a las fuerzas giroscópicas

$$M_{4y} = -W^2 \cdot I$$

I = momento de inercia del rotor

c. Momento en la dirección Z: M_z

—momento debido a la fricción

$$M_z = \frac{m_y}{2} \cdot f_w \cdot \frac{4}{9} \cdot V_\infty^2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot e_r \cdot \sin \alpha$$

f_w = coeficiente de fricción alrededor del eje del rotor

m_y = masa del rotor en la dirección y

2.3.2.2 Análisis en condiciones de tormenta

a. Arrastre

$$F_x = C_t \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \right) \cdot A_{\text{proy.}}$$

C_t = coeficiente de presión del viento ($C_t \approx 1.6$)

A_{proy} = área proyectada del rotor;

b. Fuerza sobre la torre

$$F_w = C_t \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \right) A_{t \text{ proy.}}$$

$A_{t \text{ proy}}$ = área proyectada de la torre sobre el plano perpendicular a la dirección del viento.

c. Momentos (torque)

$$M_x = \frac{0,6}{\lambda_o^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot \pi \cdot R^3$$

$$M_z \leq C_t \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot \right) A_{\text{proy}} \cdot e \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

2.3.2.3 Criterios para valorar los parámetros

a. Condiciones normales

V_∞ = la más alta velocidad de trabajo normal

α = 30°

g = $9,8 \text{ m/seg}^2$

W = $0,5 - 1 \text{ rad/seg}$

ρ = $1,25 \text{ Kg/m}^3$

b. Condiciones de tormenta (huracanes)

V_∞ = velocidad pico de la zona (huracanes)

α = 30°

Ejemplo: Dimensionamiento de la Torre.

Datos

R	=	2,5 m
H	=	10 m
V_{corte}	=	10 m/seg
λ_0	=	2,0
A_{proy}	=	$0,4 \pi R^2$ (solidez $\sigma = 0,4$)
$V_{tormenta}$	=	30 m/seg
W	=	0,5 rad/seg
α	=	30°
ρ	=	1,25 Kg/m³
N	=	12
C	=	0,8 m. (distancia del rotor al eje vertical)
e_r	=	0,05 excentricidad del rotor
m_{total}	=	1500 N

Aplicando la metodología mostrada, obtenemos los siguientes resultados: (Vea Figura 56).

Condición Normal

$F_X = 1090$ N	$F_X = 7068$ N
$F_Y = 750$ N	$F_Y = 0$
$K_Z = 1500$ N	$F_Z = 1500$ N
$M_X = 909$ N.m	$M_X = 2650$ N.m
$M_Y = 843$ N.m	$M_Y = 0$
$M_Z = 377$ N.m	$M_Z = 3060$ N.m

Condición de tormenta

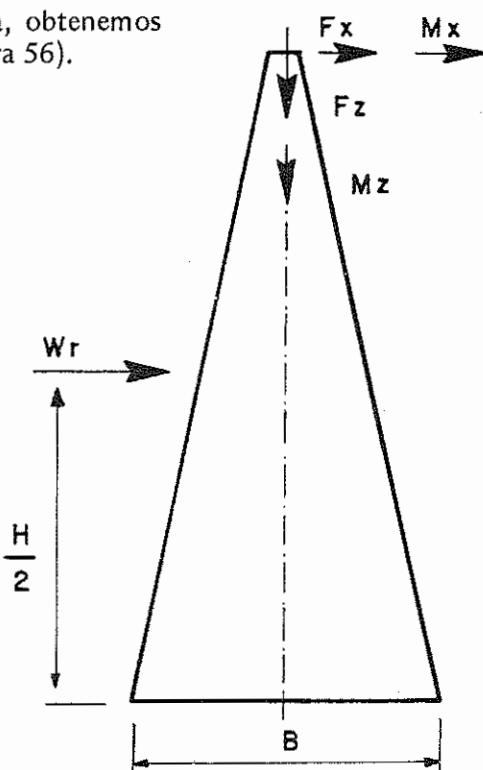


Figura 56 -- Esfuerzos sobre la Torre

Para condición de tormenta:

$$T = \frac{-W}{4} + \frac{F_X \cdot H}{2N} + \frac{M_X}{2N} + \frac{W_T (H/2)}{2N}$$

$$D = \frac{-W}{4} - \frac{F_X \cdot H}{2N} - \frac{M_X}{2N} - \frac{W_T (H/2)}{2N}$$

Asumiendo un área de 8 m^2 . como área proyectada de la torre tenemos (para $V_\infty = 30 \text{ m/seg}$) $W_T = 5000 \text{ N}$ (peso total del sistema). Se pueden calcular las cargas que aparecen en la Tabla 20.

TABLA 20
CARGAS SOBRE LA TORRE

B (m)	WT MAX (N)	MAX (N)	MIN (N)
2.000	7200	26,078	- 26,832
2.50	7200	20,641	- 23,091
3.00	7200	16,996	- 19,471
3.50	7200	14,369	- 16,868
4.00	7200	14.166	- 14,916

Como último paso, con los valores del cuadro anterior se puede pasar a dimensionar el perfil para diversas aberturas de las patas, escogiendo aquella que resulte la más conveniente.

2.4 CALCULO DEL TORNAMESA

Es el elemento del molino que sirve de eslabón entre el movimiento giratorio del propulsor y el accionamiento alternativo de la bomba; sostiene el rotor y mecanismos de transmisión así como a la veleta, posibilitando la orientación del rotor en la dirección del viento. La Figura 57 muestra los elementos principales de tornamesa.

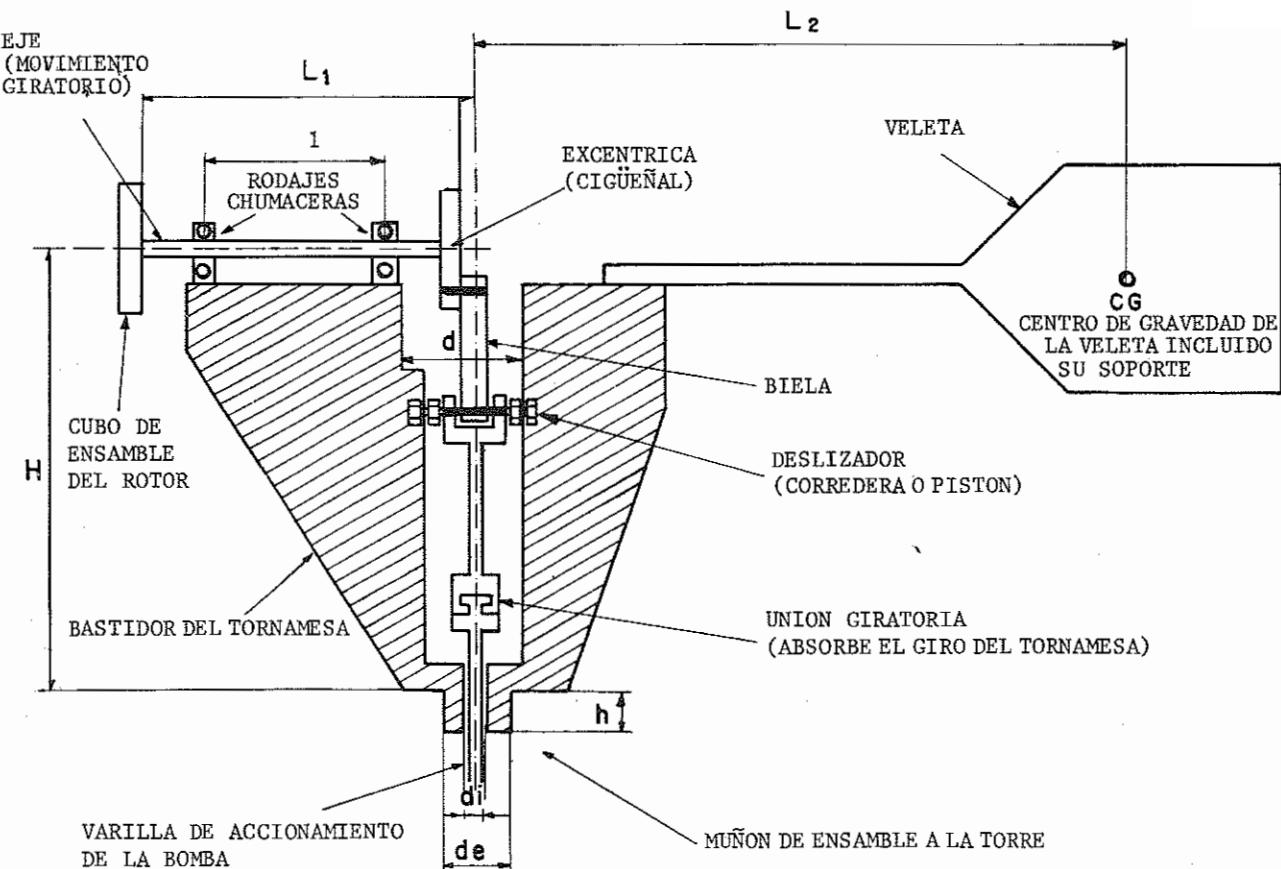


Figura 57 — Esquema General del Tornamesa

Además de los elementos mostrados, se accionan mecanismos de seguridad, que actúan sobre la veleta a fin de proteger el equipo de los vientos demasiado fuertes y de freno para detener el equipo a voluntad durante los períodos de descanso o mantenimiento.

En la Figura 58 se presenta el esquema de un tornamesa diseñado por ITINTEC para una aerobomba artesanal de baja potencia, mientras que en la Figura 57 se mues-

tra en corte el tornamesa de un molino industrial convencional con reducción de velocidad por engranajes; en ambos casos puede apreciarse que los elementos principales se equivalen.

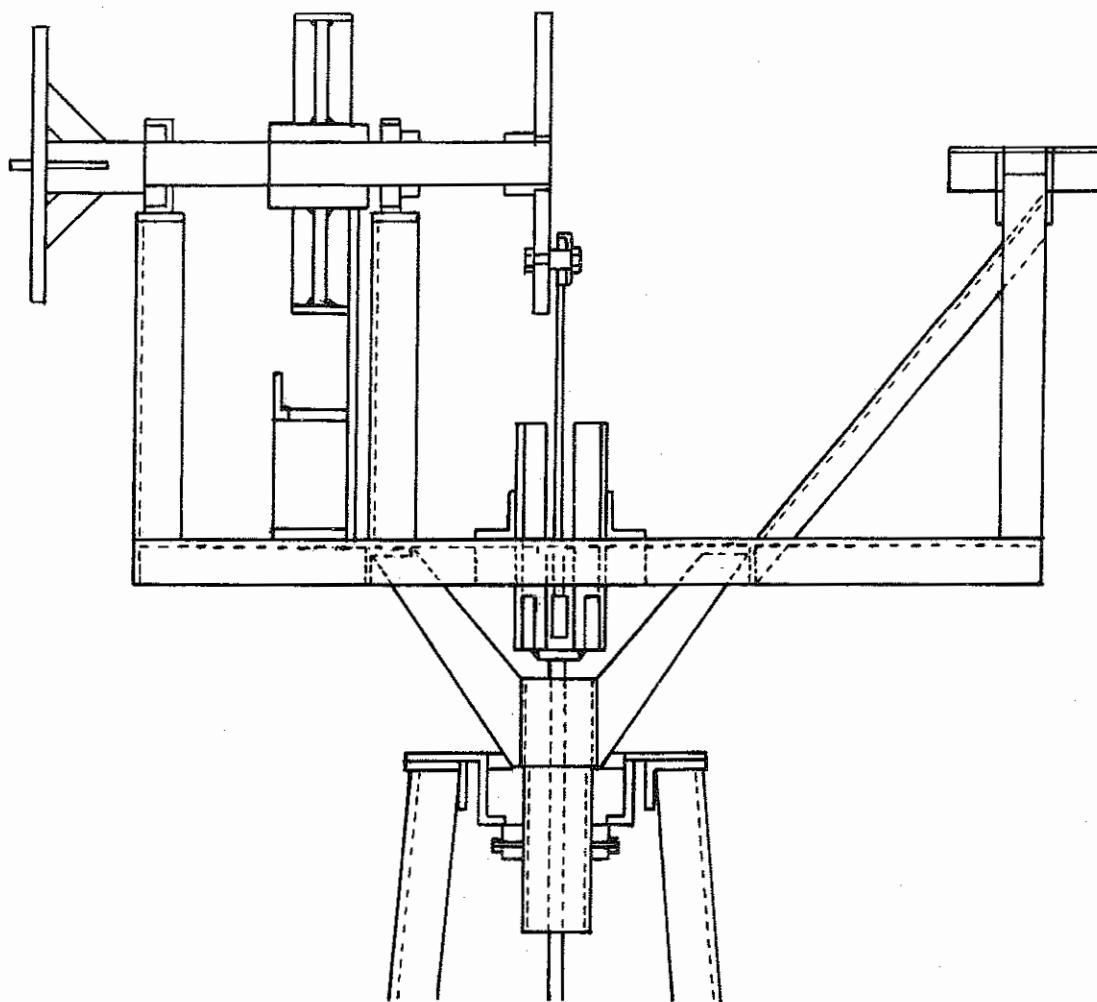


Figura 58 — Tornamesa Diseñado por el ITINTEC/PERU

El dimensionamiento general del tornamesa está relacionado con las características principales del propulsor, la bomba, la transmisión y la torre.

Así, la longitud L_1 mostrada en la Figura 57 debe ser la mínima posible, pero teniendo cuidado que los álabes del propulsor durante su giro no choquen con la estructura de la torre; una vez definida L_1 queda definida también la longitud del

eje así como la distancia entre los rodamientos que debe ser la máxima posible a fin de sostener adecuadamente al rotor. (Vea Figura 57).

La longitud L_2 (distancia desde el centro del tornamesa al centro de gravedad de la veleta y su soporte) se estima como $2/3$ del diámetro del rotor, el área de la veleta puede asumirse como de $1/8$ del área del rotor. Los materiales que conformen la veleta y su soporte respectivo se seleccionarán en forma tal que su momento sobre el tornamesa (peso de veleta incluyendo soporte XL_2) equilibre el momento por el peso del rotor (peso del rotor XL_1).

La altura H será necesariamente mayor que la suma del radio de la excéntrica más la longitud de la biela; siendo el radio de la excéntrica igual a la mitad de la carrera de la bomba.

El muñón de ensamble a la torre tendrá un diámetro interior "di" mayor que el diámetro de la varilla de accionamiento de la bomba. Asumiéndose una distancia h de ensamble a la torre la estructura del bastidor deberá calcularse para que soporte las fuerzas mostradas en la Figura 59.

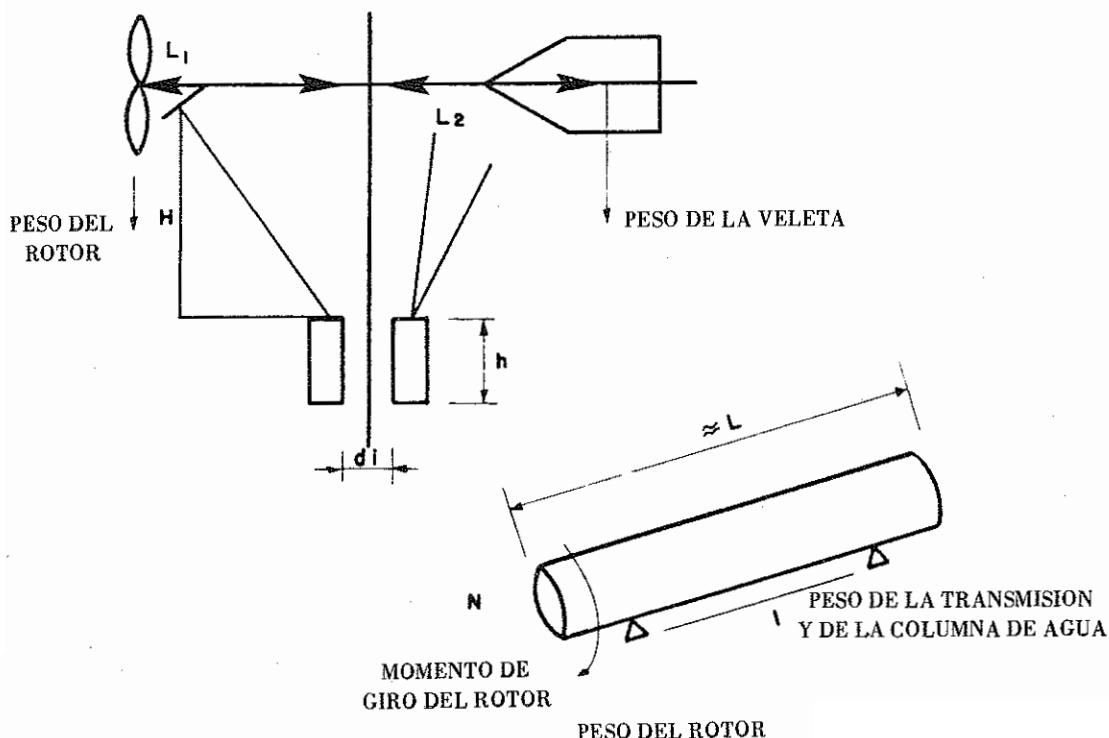


Figura 59 — Fuerzas Actuantes sobre Tornamesa

2.5 SISTEMA DE SEGURIDAD

Como se ha visto en acápitres anteriores, la turbina eólica se diseña para una velocidad de viento V_∞ la cual deberá trabajar en condiciones óptimas, a su vez la bomba se diseña bajo el mismo concepto con el objeto de conseguir un acoplamiento que produzca el mejor rendimiento. Sin embargo, y como se ha visto también, la velocidad del viento es muy variable, pudiendo tener valores muy altos con respecto a V_∞ .

El trabajo del sistema eólico a altas velocidades es peligroso para la bomba, y a su vez produce un trabajo del rotor a condiciones deficientes, produciendo un trabajo deficiente del sistema.

Por las razones antes mencionadas, se hace necesario bloquear el sistema a la velocidad de apertura V_f , cuyo valor se puede considerar entre 1,5 y 2,5 veces la velocidad de diseño.

2.5.1 Tipos de Sistemas de Seguridad

Existen diferentes tipos; Ver Figuras 60, 61, 62 y 63

- Sistema de rotor de peso variable
- Plegado manual de la veleta
- Plegado automático
- Tipo holandés de veleta articulada con pala lateral.

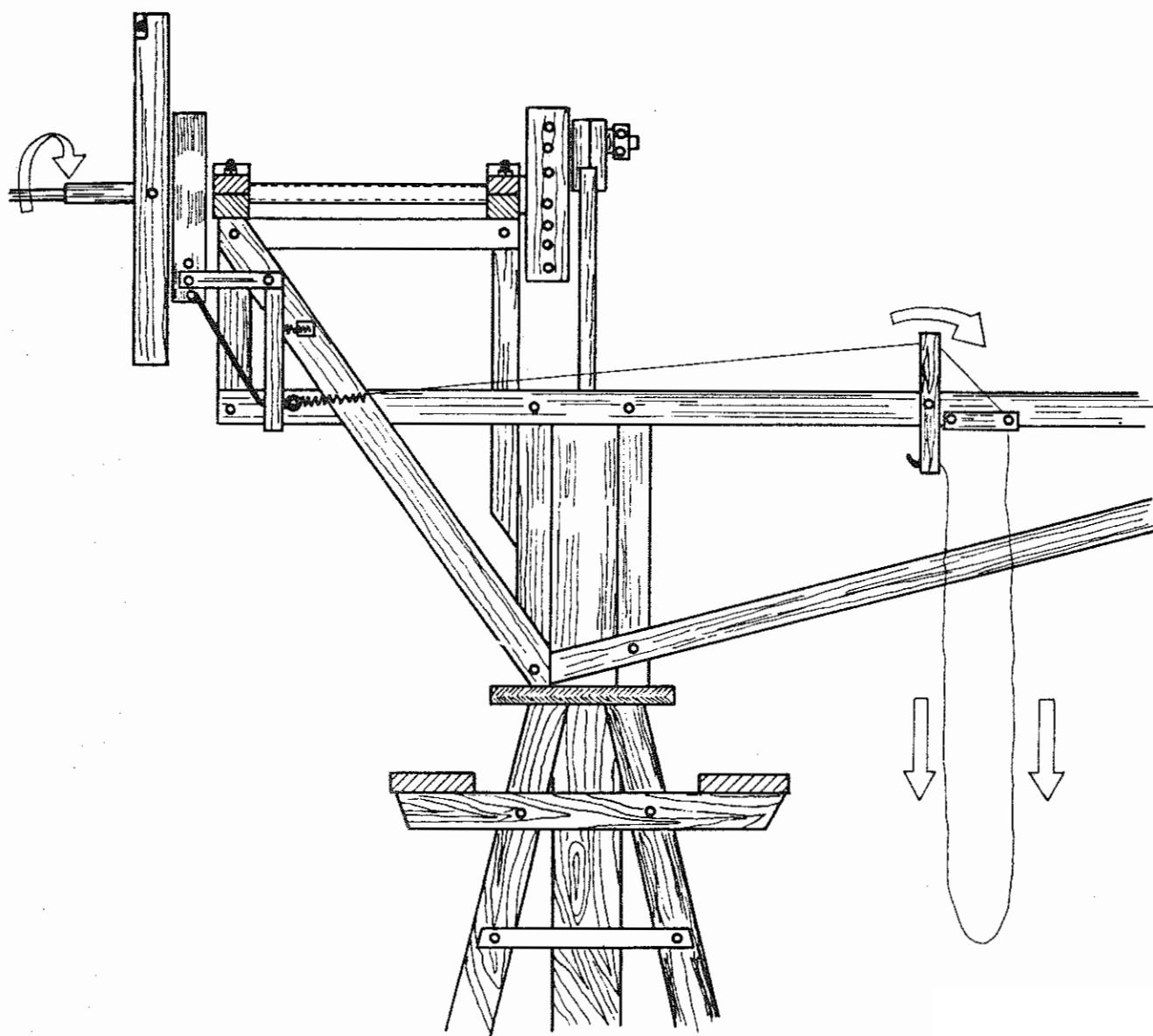


Figura 60 – Sistema de Seguridad -- Tipo Rotor de Peso Variable

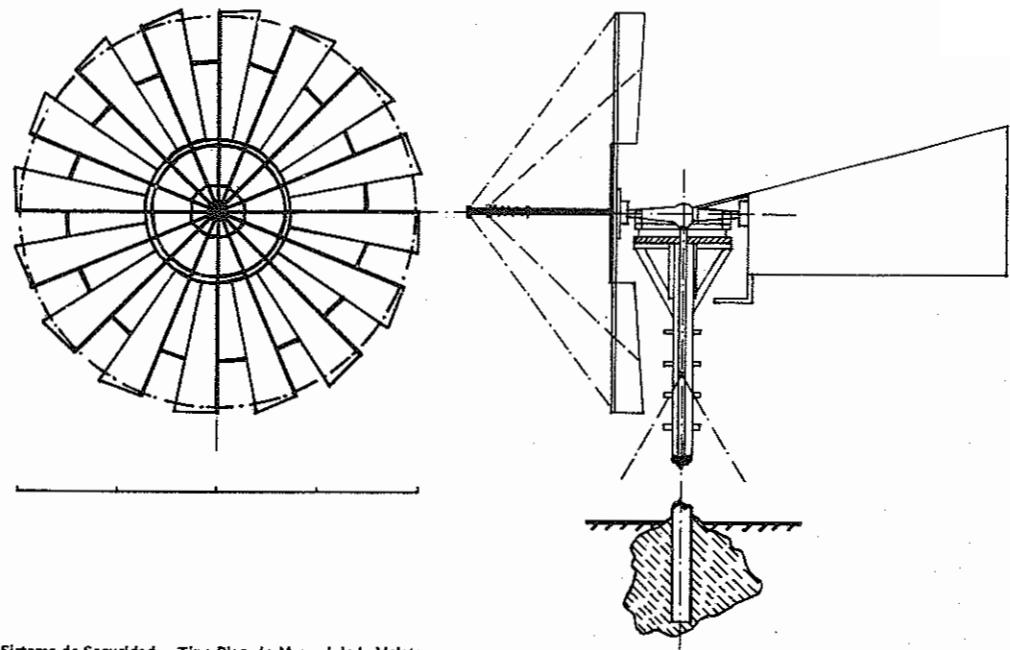


Figura 61 — Sistema de Seguridad — Tipo Plegado Manual de la Veleta

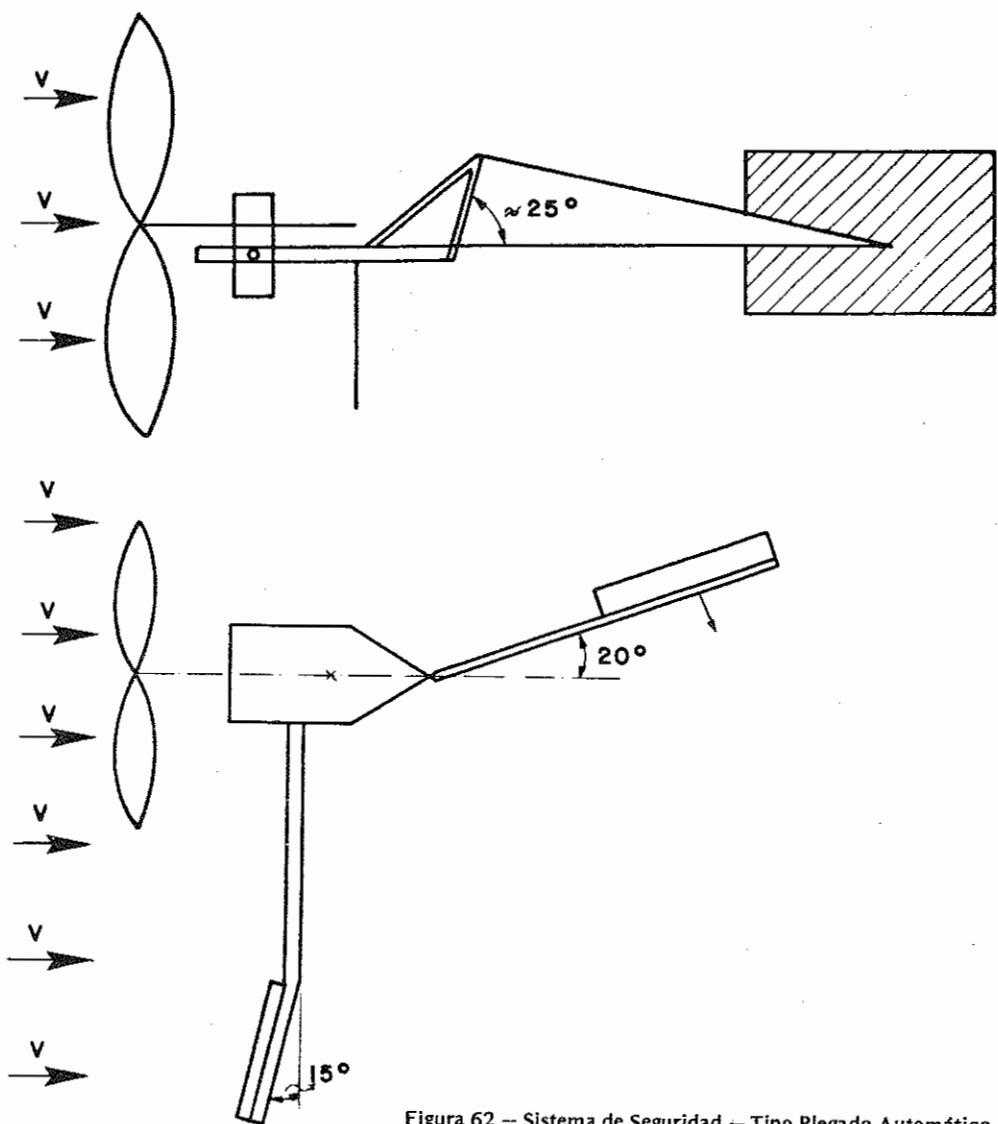


Figura 62 — Sistema de Seguridad — Tipo Plegado Automático

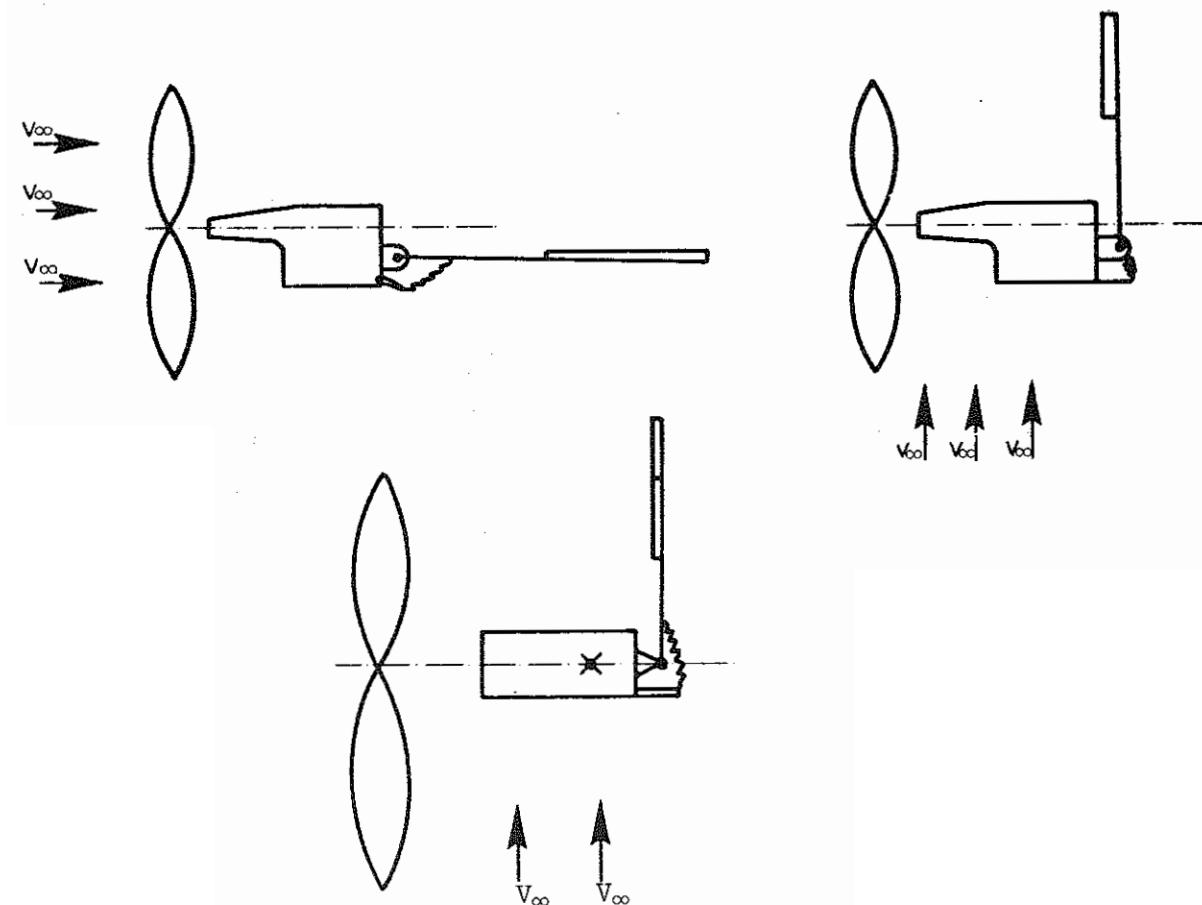


Figura 63 — Sistema de Seguridad — Tipo Holandés de Veleta Articulada con Pala Lateral

CAPITULO 3 – COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS EOLICOS PARA BOMBEO DE EJE HORIZONTAL

3.1 INTRODUCCION

El comportamiento característico de rotores eólicos (en condiciones estacionarias) puede ser descrito por las siguientes expresiones:

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^3 \cdot (\pi R^2) \quad (3 - 1)$$

$$Q = C_q \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot (\pi R^2)R \quad (3 - 2)$$

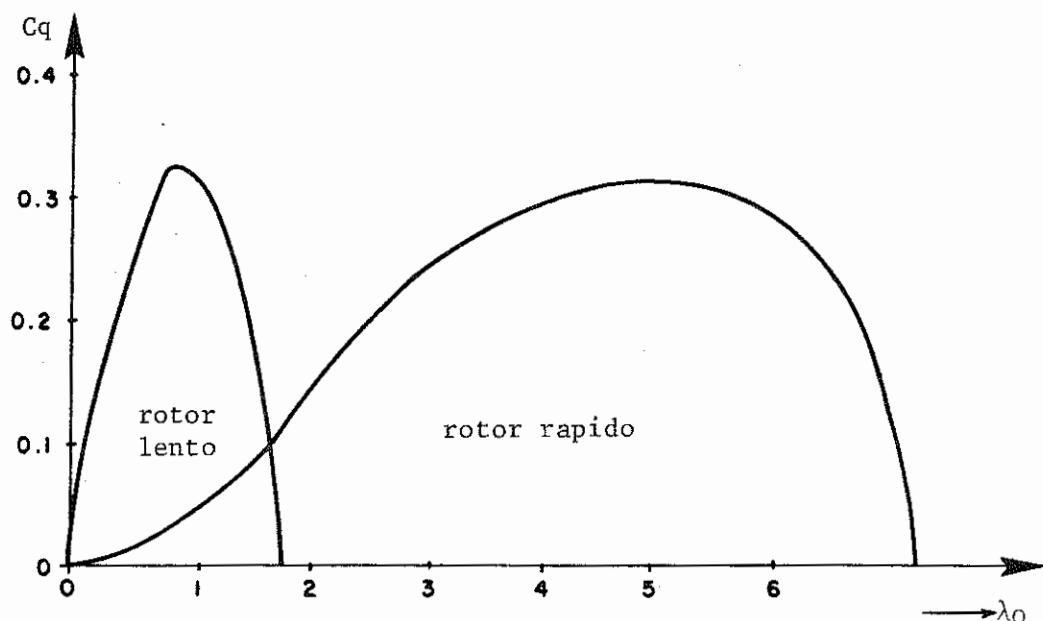
$$F = C_A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot (\pi R^2) \quad (3 - 3)$$

$$\lambda_0 = \frac{2\pi W R}{V_\infty} \quad (3 - 4)$$

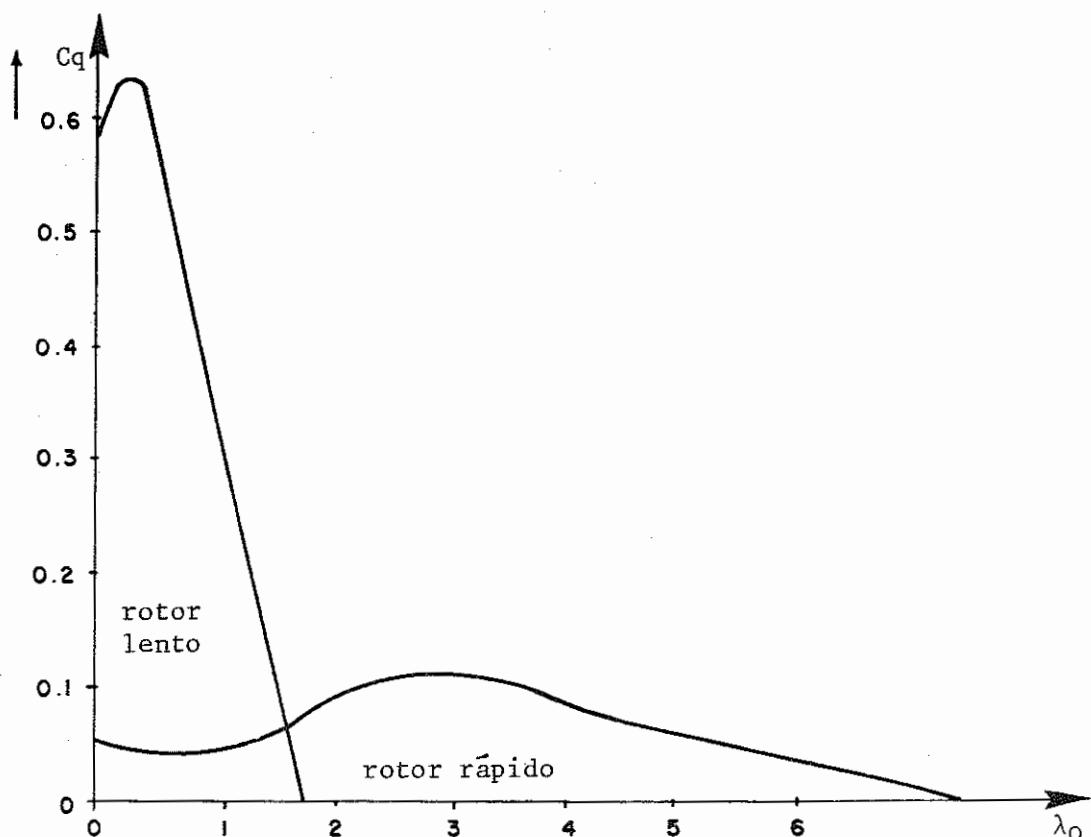
Donde:

- P = potencia; watts
Q = torque, N-m
F = fuerza de arrastre, N
 C_p = coeficiente de potencia, adim.
 C_q = coeficiente de torque, adim.
 ρ = densidad del aire
 V_∞ = velocidad del viento, m/seg.
R = radio del rotor, m.
W = velocidad angular, rpm.
 λ_0 = celeridad, adim.

De las expresiones (3 - 1), (3 - 2) y (3 - 4) se puede deducir que $C_p = C_q \cdot \lambda_0$. En la Figura 64 se aprecian valores característicos de los coeficientes de potencia y torque, tanto para rotores de alta como de baja velocidad. En esta figura se puede observar el alto valor de C_q en los rotores lentos y como disminuye este coeficiente en los rápidos.



(a) CARACTERISTICA $C_p - \lambda_0$



(b) CARACTERISTICA $C_p - \lambda_0$

Figura 64 — Coeficientes de Potencia y Torque para Rotores Eólicos de Eje Horizontal.

En molinos de viento para bombeo, es común el uso de bombas de tipo aspirante-impelente, las mismas que se ilustran en forma esquemática en la Figura 65.

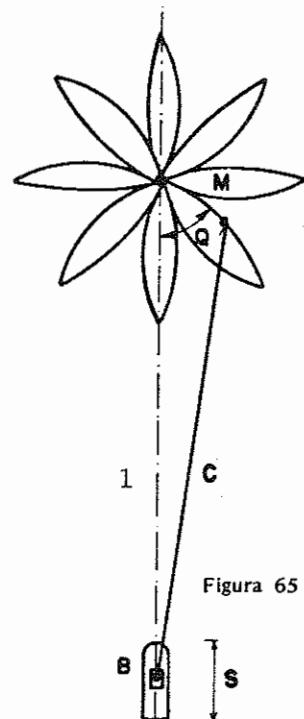


Figura 65 — Esquema de Mecanismo para Bombeo

En dicha figura, una Manivela M de radio r acciona la bomba B, a través de una biela C de longitud L , haciendo recorrer al pistón una carrera S

Para el sistema biela—manivela mostrado, podemos expresar el torque necesario para mantener la manivela a un ángulo θ con la vertical, mediante la siguiente expresión:

$$Q_W = \left(r \operatorname{sen} \theta + \frac{a}{2} \operatorname{sen} 2\theta \right) \cdot \rho \cdot g H \cdot \frac{\pi dp^2}{4} \quad (3 - 5)$$

Donde:

- Q_W = torque necesario, N-m
- r = radio de manivela, m.
- θ = ángulo que la manivela forma con la vertical
- H = altura de bombeo, m
- dp = diámetro del pistón
- a = r/L

El comportamiento del torque para una carrera de trabajo se representa en forma esquemática en la Figura 66.

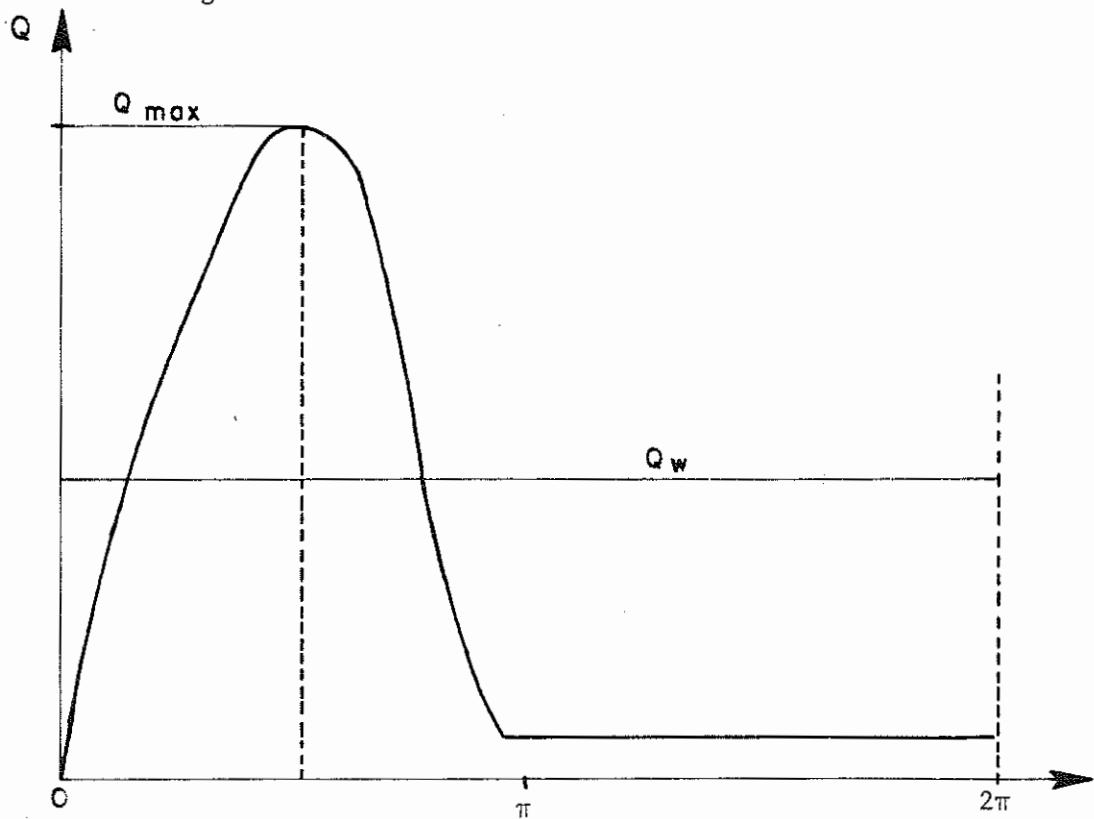


Figura 66 – Variación del Torque en una Carrera de Trabajo

Cuando un sistema de bombeo funciona en operación continua, sólo se manifiesta el torque promedio $Q_{AV} = Q_{MAX}/\pi$, pero en el arranque se debe vencer Q_{MAX} .

Para un rotor de características C_p , C_q conocidas, la operación del sistema formado cuando se le acopla una bomba aspirante impelente, se puede analizar en condiciones estacionarias si sobre curvas $P(w)$ y $Q(w)$ del rotor se dibujan las correspondientes de la bomba.

La Figura 67 muestra un rotor de palas metálicas de características $C_p(\lambda_0)$ y $C_q(\lambda_0)$ dadas en la Figura 68, en el cual se ha acoplado una bomba aspirante impelente. Se puede observar que se necesitan vientos de cierta magnitud para poner en operación el sistema y es fácil inducir como cambiaría esta situación si usaramos un rotor lento, con características $C_p(\lambda_0)$ y $C_q(\lambda_0)$ mostradas en la Figura 64.

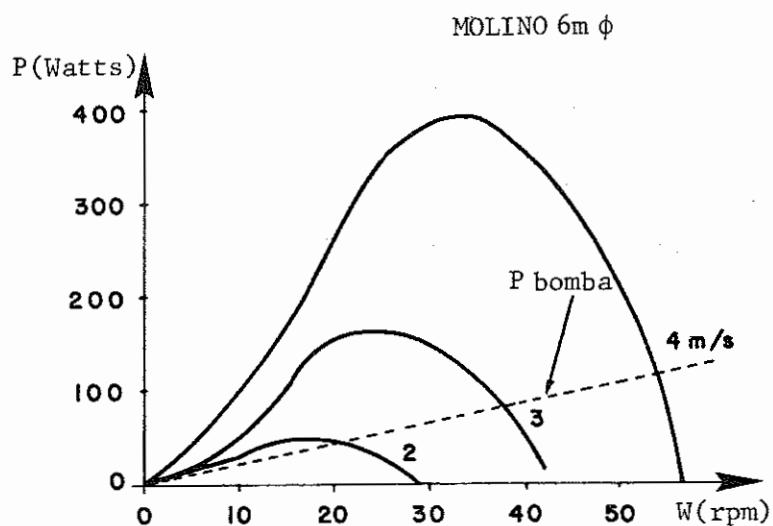
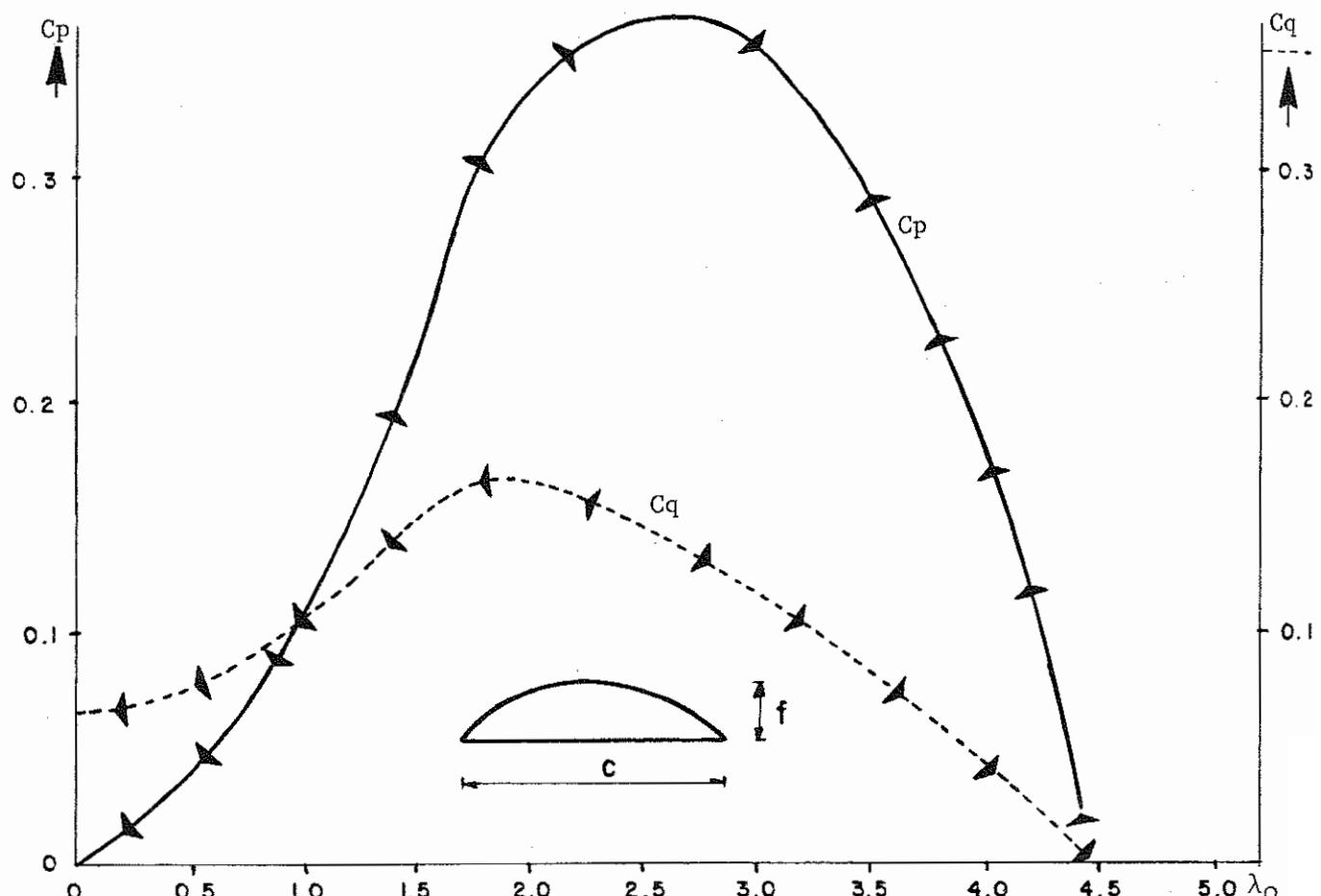


Figura 67 — Acoplamiento de una Bomba Aspirante Impelente
a un Rotor de Palas Metálicas — Efecto en la Potencia



CARACTERISTICAS:

- Rotor de Pala Metálica ($N=4$)
- $\beta(0,7 R) = 19^\circ$
- $\lambda_0 = 3$
- $f/c = 12\%$

Figura 68 — Características C_p y C_q de un Rotor de Palas Metálicas

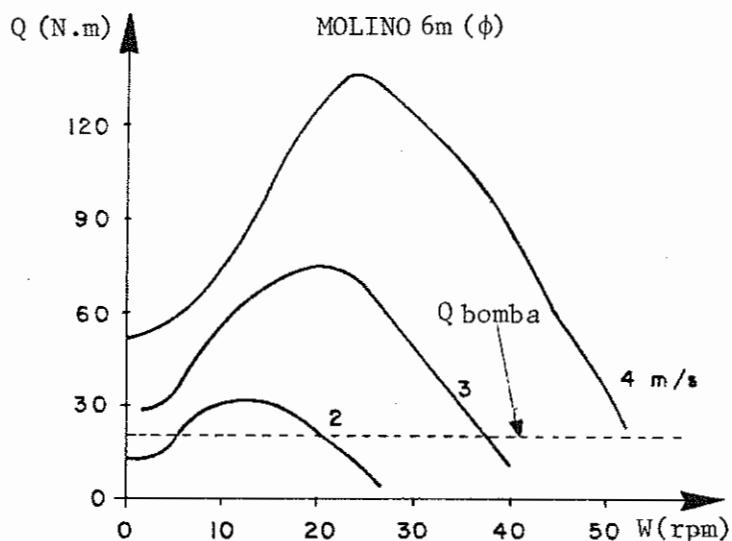


Figura 69 — Acoplamiento de una Bomba Aspirante Impelente
a un Rotor de Palas Metálicas — Efecto en el Torque

La Figura 69 muestra el efecto del acoplamiento de la bomba aspirante impulsante en el torque del rotor.

Para el sistema descrito anteriormente, el comportamiento $P(V_\infty)$ toma la forma indicada en la Figura 70. La máquina arranca a la velocidad V_c y sigue una función casi lineal hasta que alcanza la velocidad V_R , luego, y debido a las pérdidas en el rotor y bomba, la potencia se mantiene casi constante hasta que se alcanza la velocidad V_f en la que la máquina deja de bombeo por razones de seguridad.

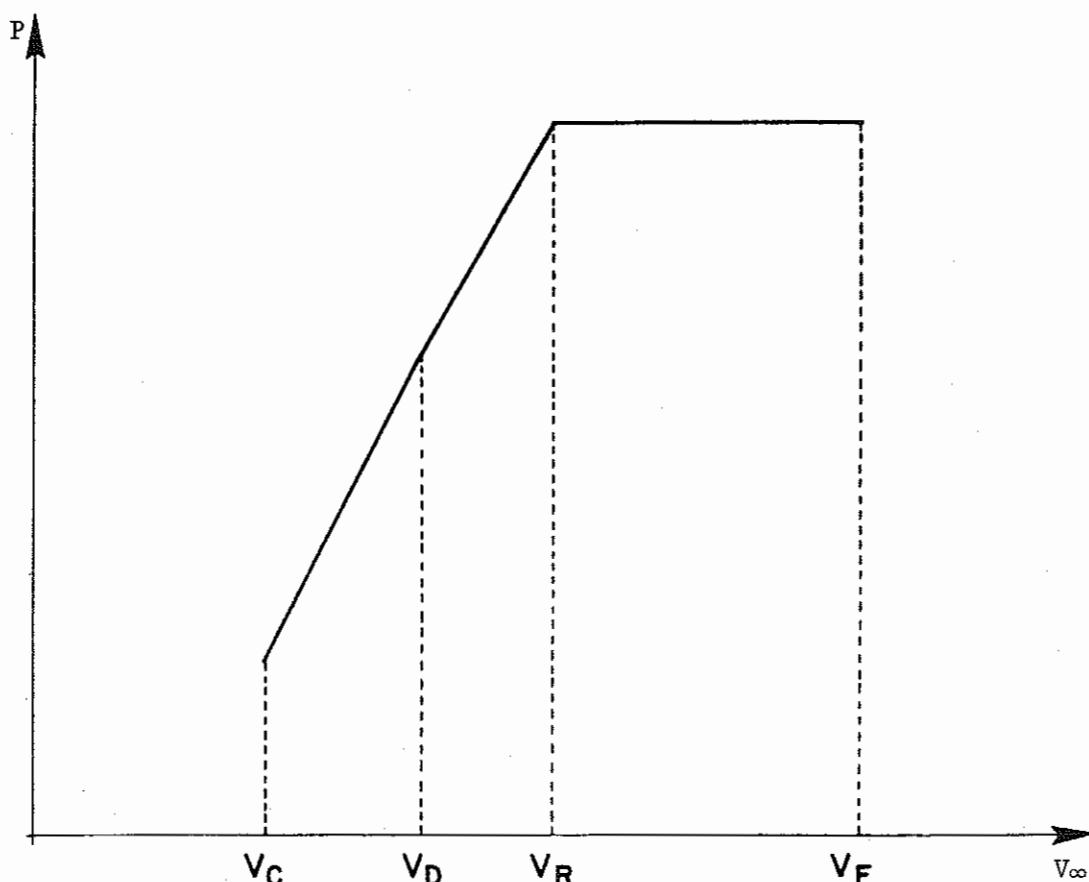


Figura 70 — Comportamiento $P = f(V_\infty)$ de un Molino para Bombeo

Para la Figura 70:

- V_c = velocidad de corte
 V_d = velocidad de diseño
 V_R = velocidad nominal
 V_f = velocidad de apertura

Si asumimos una función lineal de C_q y λ_o , la característica $P(V_\infty)$ de un sistema toma la siguiente forma:

$$P = Cp_{\max} \cdot \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_r^2 \cdot V_d^3 \left[\frac{V_\infty}{V_d} \cdot \frac{\lambda_{omax}}{\lambda_{od}} - \frac{V_d}{V_\infty} \left(\frac{\lambda_{omax}}{\lambda_{od}} - 1 \right) \right] \quad (3-6)$$

Donde:

- P = potencia, watts
 V_d = velocidad de diseño (velocidad a la cual la combinación rotor-bomba trabaja a una celeridad con C_p máximo), m/seg.
 λ_{od} = celeridad de diseño, adim
 λ_{omax} = celeridad sin carga, adim
 η = eficiencia de transmisión y bombeo, adim
 Cp_{\max} = coeficiente de potencia a λ_{od} , adim
 ρ = densidad del aire
 D_r = diámetro del rotor, m
 V_∞ = velocidad del viento, m/seg.

La potencia requerida para bombear agua a una altura determinada es:

$$P_w = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot q \quad (3-7)$$

Donde:

- P_w = potencia, watts
 ρ_w = densidad del agua (10^3 Kg/m³)
 H = altura de bombeo, m
 g = aceleración de la gravedad (9,81 m/seg²).
 q = caudal, m³/hr.

En condiciones estacionarias $P = P_w$. Luego, si igualamos las expresiones (3 - 6) y (3 - 7) y despejamos q :

$$q = \frac{3,6}{\rho_w gH} C_{p\max} \cdot \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot \pi D_r^2 V_d^3 \left[\frac{V_\infty}{V_d} \frac{\lambda_{omax}}{\lambda_{od}} - \frac{V_d}{V_\infty} \left(\frac{\lambda_{omax}}{\lambda_{od}} - 1 \right) \right] \quad (3-8)$$

En esta última expresión se observa la influencia de la altura de bombeo, eficiencia aerodinámica y geometría del rotor, velocidad de diseño, así como la distribución de frecuencia de los vientos en el caudal bombeado por el sistema. Luego, si se multiplica esta expresión por la distribución de la frecuencia de la velocidad de vientos en el lugar considerado, se obtiene el volumen de agua bombeado en el período que se considere.

Asimismo, haciendo $q = q_{\text{promedio}}$ y acomodando términos se tiene:

$$S, d_p^2 = \frac{4 C_{p\max}}{\lambda_0} \cdot \frac{\rho_w V_d^2 \cdot \pi R^3 \cdot \eta \rho t}{\rho_w gH} \quad (3-9)$$

En la cual todos los términos ya han sido definidos anteriormente, y se puede observar la influencia de los diversos parámetros tanto del rotor como del viento, en la carrera y diámetro de la bomba.

Con toda la teoría expuesta hasta este punto estamos en condiciones de analizar la influencia de diversos parámetros, tanto del sistema como del recurso eólico en el comportamiento de una máquina.

3.2 INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCION DE FRECUENCIA DEL VIENTO

Tomando las expresiones para la distribución de Weibull dadas en las referencias (3 - 6) y (3 - 7), se ha calculado teóricamente el efecto de dos distribuciones con el mismo factor de escala $C(3,55 \text{ m/seg})$ y diferente velocidad promedio $V(3,16 \text{ y } 3,26 \text{ m/seg.})$, para un molino de 4 m. de diámetro (Figura 71.a), asimismo, el efecto de dos distribuciones con la misma velocidad promedio $V(3,26 \text{ m/seg})$ y diferente factor de escala $C(\text{Figura 71.b})$.

En ambos casos puede apreciarse la influencia, no sólo en la velocidad de diseño sino en el caudal total bombeado.

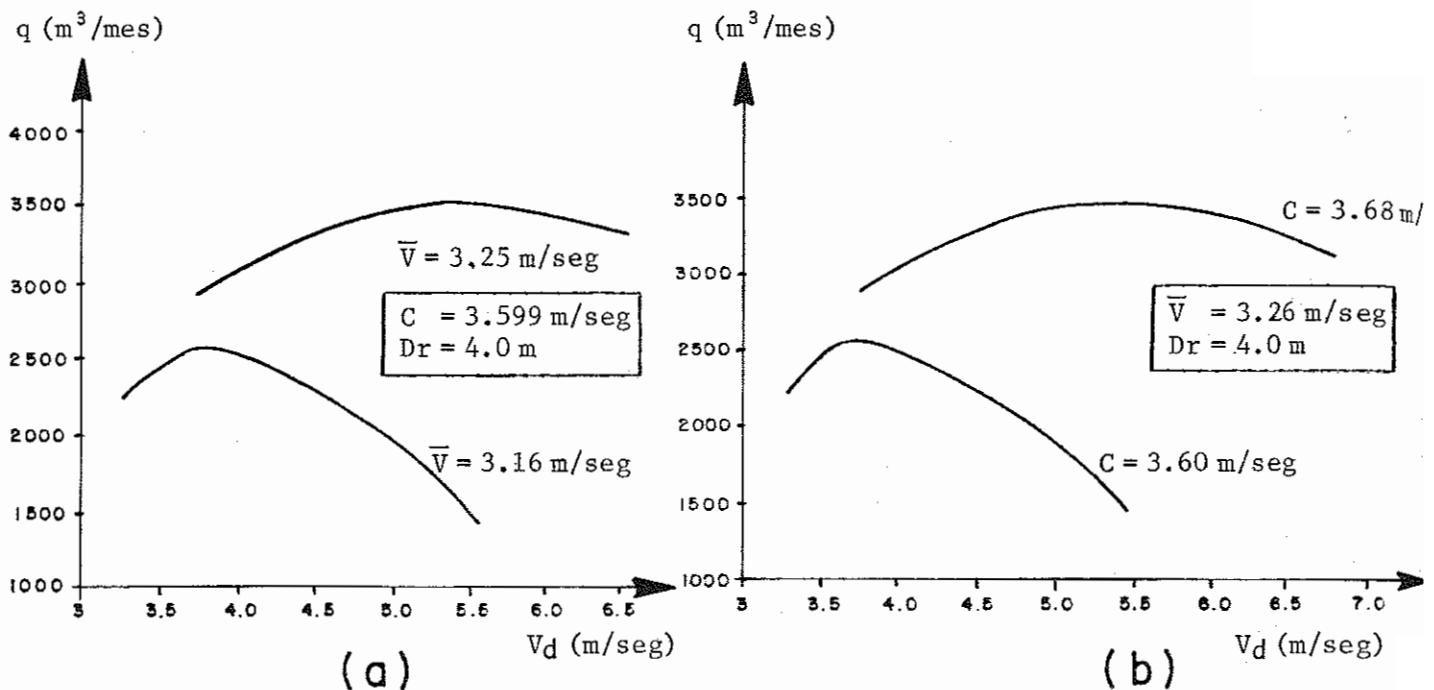


Figura 71 – Influencia de la Distribución de Frecuencia del Viento

3.3 INFLUENCIA DE LA ALTURA DE BOMBEO Y DIÁMETRO DEL ROTOR

Para un régimen de vientos con $K = 1,75C = 3,59$ se ha calculado el efecto de la variación de estos parámetros. Los resultados se muestran en la Figura 72.

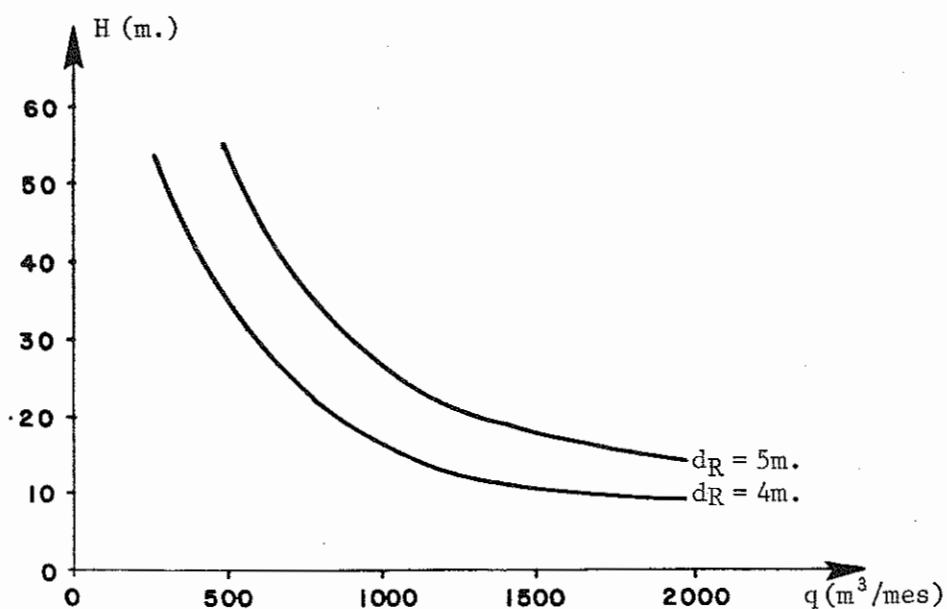


Figura 72 – Influencia de la Altura de Bombeo y Diámetro del Rotor

3.4 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO

En la Figura 73 se ha superpuesto una función $P(V_\infty)$ de un sistema dado a la curva de distribución de frecuencias de una determinada localidad. Se puede observar que a menor velocidad de diseño existe un mayor número de horas de funcionamiento (aunque menor caudal bombeado), como se desprende de la Figura 71. Este hecho puede ser importante en algunas aplicaciones como por ejemplo, cuando se va a bombear agua para uso doméstico.

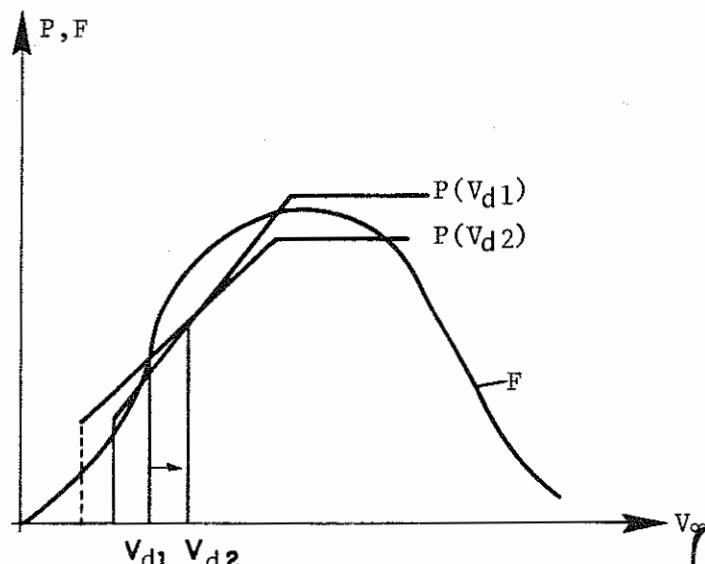
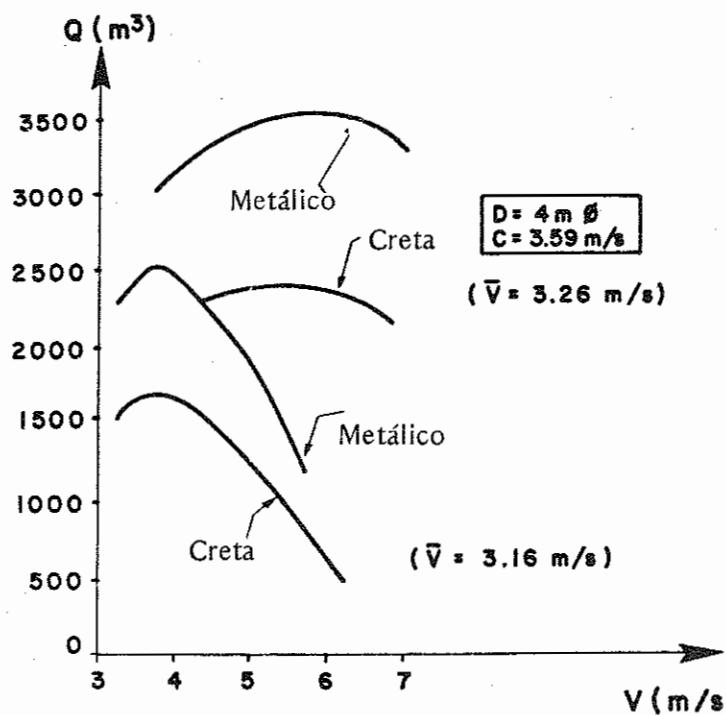


Figura 73 -- Influencia de la Velocidad de Diseño

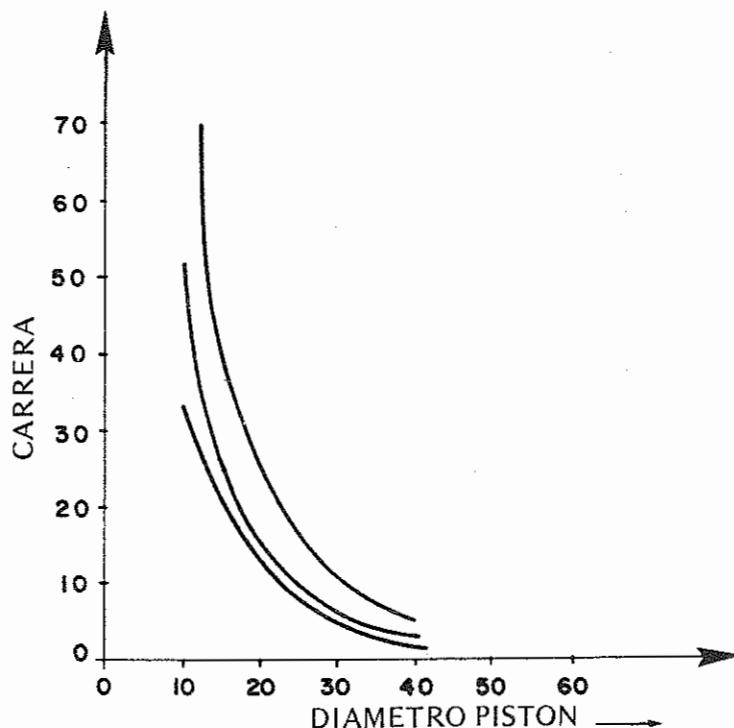
3.5 INFLUENCIA DE LA AERODINAMICA DEL ROTOR

En la Figura 74 se ha superpuesto a las gráficas mostradas en la Figura 71, aquellas correspondientes a un molino de Creta.



3.6 INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS DE LA BOMBA

Es una curva S, dp se han graficado el comportamiento de bombas de varias carreras para un rotor de geometría fija con V_D y H constante. Ver Figura 75.



3.7 INFLUENCIA DEL DIAMETRO DE LA BOMBA

Se puede observar que al aumentar el diámetro de rotor constante la carrera disminuye al aumentar el diámetro del pistón, siendo este efecto mayor a menores diámetros de bomba.

Un estudio más exhaustivo sobre la bomba utilizada para elevar agua es presentado en el Capítulo 5 de este documento.

EDITORIAL

The Latin American Energy Cooperation Program (PLACE) can be conceived of as the regional instrument for coping with the "energy transition," in which it must accept the dual challenge of attaining an adequate rate of development while creating a new structure for energy production and consumption, based on a suitable combination of the use of available energy sources and closer ties of cooperation among our countries.

Given its abundance in the region and still limited exploitation, hydroenergy has been identified as one of the sources whose evaluation and development should be a top priority within the framework of the PLACE. To illustrate this affirmation, it can be noted that the installable hydroenergy potential of Latin America is estimated at 617,550 MW, of which only 7.16% has been tapped.

Furthermore, the exploitation of this resource proves particularly important for the region because of its renewable, non-polluting nature. Its development is also highly viable since it utilizes a proven, mature technology and since in Latin America sufficient expertise has been accumulated, as reflected in one of the articles included in this issue.

The experience and accomplishments of EDELCA (the Caroni Electrification Company), in the hydroenergy development of the Caroni River basin of Venezuela, is described in an article prepared by that firm. The hydro power potential of the Lower Caroni is on the order of 16,200 MW; and if we add to that the hydro resources available in the upper sections of the Caroni and La Paragua river basins, the potential rises to 25,000 MW. Among the projects for the Lower Caroni, the "Raul Leoni" Hydroelectric Station is noteworthy; it is located in Guri and its first stage, already in operation, has an installed power capacity of 2565 MW. Its final stage, now in the phase of construction and equipment installation, will result in an installed capacity of approximately 10,000 MW, thus occupying second place in Latin America, after Itaipu, whose reservoir structures were recently inaugurated with 12,600 MW.

Within the framework of the PLACE, it has been clearly identified that regional energy development must respond to a rational use of all the available resources, including those such as coal, which historically have occupied a marginal place in most of the regional countries but whose development could contribute significantly to reducing dependency on hydrocarbons.

In an article prepared by the CAEEB, the current situation and prospects are summarized for the development of coal, lignite and peat in Brazil. This country, whose estimated reserves total some 23 billion tons, has set itself the goal of producing 16.8 million tons per year, which would allow it to substitute 110,000 barrels of imported oil daily.

As a contribution to the efforts at evaluating regional potential, engineers Carlos Paiz and Jaime Rodríguez present a description of the sedimentary basins of Guatemala. In their article, they assess the country's oil potential, including a synthesis of geological and tectonic history and an illustration of the most important geological features.

The search for, and development of, energy sources that can substitute oil does not contradict, but rather affirms, the enormous role that it must still play in the regional energy panorama; so consequently, coal and hydrocarbon development hold high priority among the activities of the Latin American Energy Cooperation Program (PLACE).

Enrique Indacochea
Coordinator of Transfer of Technology
OLADE

DEVELOPING THE HYDROELECTRIC POTENTIAL OF THE CARONÍ RIVER

The urgent need to provide Venezuela with a guaranteed long-term supply of low-cost electricity, for national socioeconomic development, motivated the State to investigate the possibilities for developing the hydro power potential of the Caroní River.

The first hydro power station built was Macagua I, located near the city of Puerto Ordaz, in the state of Bolívar. Since 1966, when construction was completed, it has had an installed capacity of 370,000 kilowatts.

Later began the construction of a second hydroelectric plant: the Guri Dam, located in the Necuima Canyon, 100 kilometers from Macagua. The "Raúl Leoni" Hydro Power Station of Guri has an installed capacity of 2,565,000 kilowatts. Its final stage is currently underway, i.e., its expansion and elevation, and the incorporation of 10 new generator units. With these changes, its rated (nominal) capacity will be 8,865,000 kilowatts, ready for 1986.

This project forms part of the National Interconnected System (OPSIS), whose objective is to exchange energy among the country's major power companies, in order to overcome deficits in the so-called "peak-demand" hours or deficits caused by unforeseen circumstances.

The hydroelectric development of the Caroní River and, generally, of all the rivers of Venezuela with attractive potentials, gains importance in

light of the theoretical savings in terms of barrels of oil equivalent, which becomes possible thanks to water-based electricity generation. In the year 1980, 13,800,000 kWh were generated: 42.5 o/o of the national total and equivalent to 28,842,000 barrels of oil. This output represented a theoretical savings of 3,720,618,000 bolivars* during that year, if we take a reference price of 129 bolivars per exported barrel of oil.

When the final stage of the Guri Dam has been concluded, this station alone will generate the equivalent of 85 million barrels a year, or nearly 233,000 barrels of oil per day. In theory, if the same conservative figure is used, some 11 billion bolivars will be saved annually.

The task of the Caroní Electrification Company (EDELCA) is to tap all of the vast hydroelectric potential of the Caroní; and its policy is to promote water as an alternative source of energy in Venezuela, in order to reduce the use of fossil fuels for electricity generation purposes, since hydrocarbons could be better invested in exports or in the petrochemical industry, or could simply be left in the ground as future reserves.

The Caroní River

The most important renewable energy source of Venezuela emerges near the border with Brazil

* 1 US\$ = 4.3 bolivars

and runs north-to-south for approximately 640 kilometers until it empties into the Orinoco River, near Puerto Ordaz, in the state of Bolívar.

The part of the river known as the Lower Caroní, which embraces the last 215 kilometers of this waterway's full length, has a hydro power potential of 16,220,000 kilowatts. This is a very fortunate circumstance and places this section among the main rivers of its kind in all the world.

The studies conducted during the 1940's and the first half of the 1950's confirmed initial estimates of the river's hydroelectric potential, and this gave rise to a firm intention to develop it for energy purposes.

In making this idea a reality, the industrial complex of Guayana was created in the state of Bolívar.

The features of the Caroní River can be summarized as follows:

a) It has a large hydrographic basin which covers approximately 94,500 square kilometers, of which 47,000 correspond to the Upper Caroní, from the source of the river to where it merges with the Paragua; 32,500 square kilometers to the basin of the Paragua; and 15,000 square kilometers to the Lower Caroní, between its union with the Paragua and the place where it empties into the Orinoco.

b) It can count on a large average annual rainfall, which, according to historical records, amounts to 2,651 millimeters per year.

c) It has an important difference in elevation, estimated at 912 meters, from the source to where it empties into the Orinoco, with a slope of 1.43 meters per kilometer of length. In the section

having the greatest hydroelectric potential (that corresponding to the Lower Caroní there is a split-level elevation dropping from 240 meters to 215 meters, i.e., the slope is 1.12 meters per kilometer of length).

d) The river has numerous falls and natural heads along the watercourse, among which the following are notable: Mercual, Merecotos, Morocure, Necuima, Cocuiza, Arimagua, Salto del Diablo (Devil Falls), Tocoma, Caruachi and Macagua.

e) It has several sites favorable for the construction of dams, including Guri, Macagua, Tocoma, and Caruachi, on the Lower Caroní; and Tayucay, Aripichi, Eutobarima, and Carrao, on the Upper Caroní.

f) The drainage area of the river is occupied by an extensive jungle rain forest, of some 62,500 square kilometers; and this guarantees a regular natural waterflow throughout the year.

g) The river runs along an excellent bed formed by granitic gneiss rocks, and this makes it suitable for the construction of dams.

h) There are large rock, sand, and mud/clay deposits which are useful for construction near the dam sites.

i) There are almost no restrictions for the use of the land and water in this area, due to the sparse populations and the slight development of agricultural activities.

Future Development Projects for the Caroní River

Possible dam sites have been studied on the Lower Caroní River and in the high basins of the Caroní and Paragua Rivers. The results or advances of these investigations are detailed briefly below:

a) On the Lower Caroní

The so-called "intermediate" projects of the Caroní River are aimed at developing the hydroelectric potential existing between the Guri and Macagua dams; and they basically consist of constructions at the sites Macagua II, Caruachi, and Tocoma, which together will be able to generate a total of 6,985,000 kilowatts. This capacity, when added to that already installed at Guri and Macagua I, will amount to more than 16,000,000 kilowatts.

The construction sequence for these dams will be as follows: Macagua II, Caruachi, and Tocoma. It is calculated that the Macagua II construction will take six years, and that energy will be obtained from the first units at the end of the fifth year. For the Caruachi and Tocoma projects, a construction period of some eight years will be required; but its first six units will be able to start generating electricity after six years.

The main features of these intermediate projects are listed below:

Macagua II

Approximately 18 kilometers, by highway, from Puerto Ordaz, in the state of Bolívar, and alongside the dam Macagua I, another powerhouse will be built, with thirteen units and an installed capacity of 2,300,000 kilowatts, during development, and an additional three units later, to generate a power output of 2,570,000 kilowatts.

The maximum reservoir area will be 58 kilometers, and the head will reach a height of 54.5 meters. This dam should prove to be the most economical of the intermediate projects; and for that reason, it has been given priority.

Caruachi

Near the Caruachi Pass, 43 kilometers downriver from the Guri Hydroelectric Dam, we find the site of Caruachi, where a dam and 18-unit powerhouse will be built to generate 2,660,000 kilowatts. The reservoir level will be approximately 96 meters, and the maximum area affected will total 427 square kilometers.

Tocoma

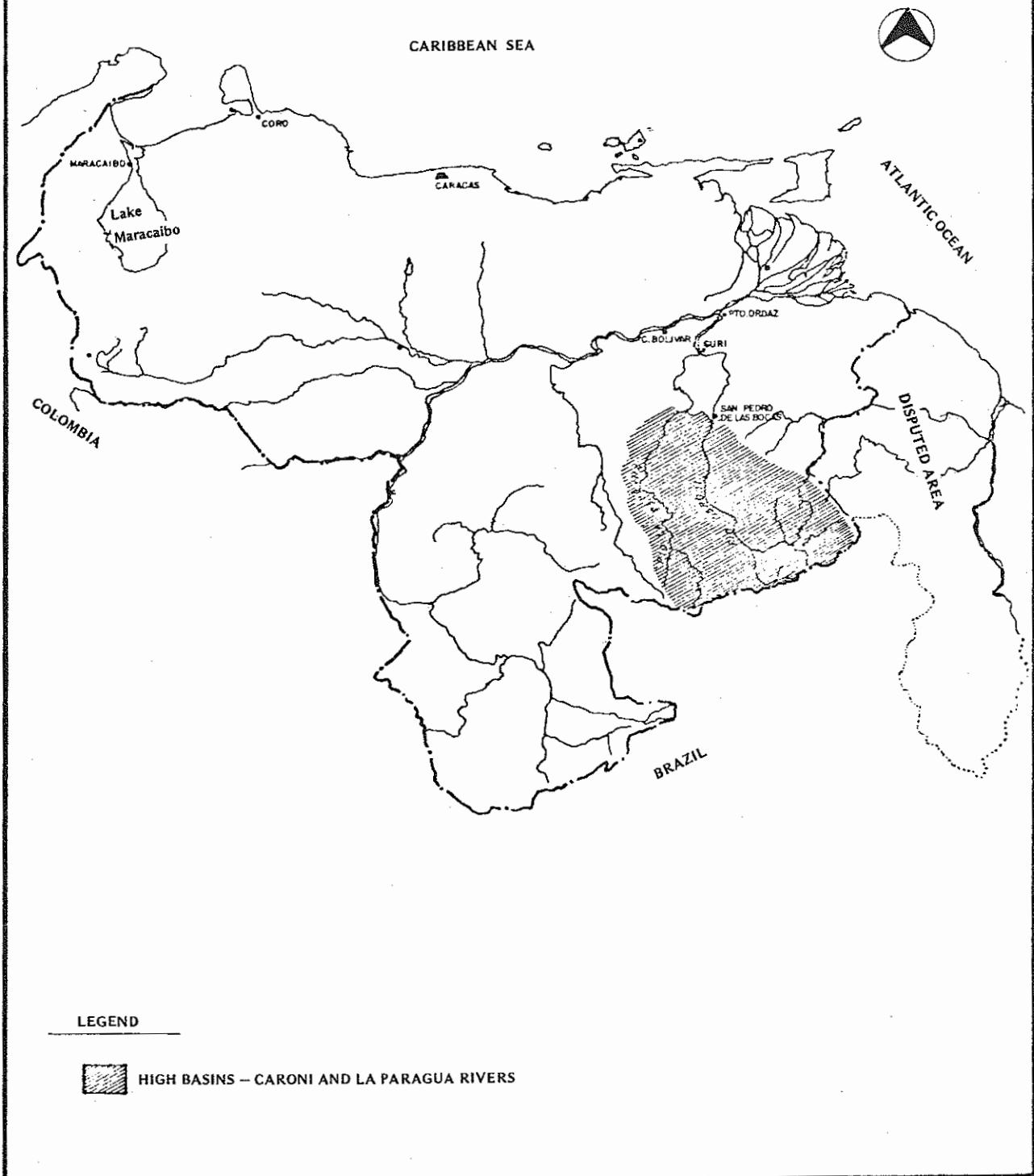
The site of Tocoma lies 9 kilometers downriver from Guri. It is characterized by many small islands, so that in order to form a reservoir, it will be necessary to build four retaining walls (bulkheads). The powerhouse will have nine generating units during initial development and three more later. The installed power capacity for the first stage will be 1,320,000 kilowatts; and in the second stage 435,000 kilowatts will be added, for a total of 1,755,000. The water surface will be approximately 125 meters above sea level, and the maximum surface area affected by the dam and reservoir will be 88 square miles.

b) In the High Basins of the Caroní and Paragua Rivers

The inventory of the hydro power potential undertaken in the high basins of the Caroní and Paragua Rivers resulted in the selection of six sites which can be tapped for a total installed capacity of some 8,900,000 kilowatts. The hydroelectric development of these basins constitutes the future program for the Caroní River, following on the intermediate projects of the Lower Caroní and Guri (already underway), since all of the latter are priority areas due to economic and practical reasons.

The region occupied by these basins is located politically in the districts of Heres, Piar, and

LOCATION OF THE HIGH BASINS OF THE CARONI AND LA PARAGUA RIVERS



Roscio in the state of Bolívar, covering a total surface area of 84,489 square kilometers. It is characterized by frequent differences of elevation with respect to surrounding valleys, where vegetation is low and usually dense. The climate is temperate in the mountainous formations and "tepuyes" and in the Great Savanna, but the predominant climate in the basin is hot and rainy.

The population centers of the area are constituted by missionary camps, Indian villages, and mining towns. The possibility of agricultural development was discarded due to the low content of soil nutrients, which, according to a study done by the National Agrarian Institute in 1971, would only permit, at most, a subsistence economy.

Sites Selected on the Upper Caroní and Paragua Rivers

Of a total of 34 possible hydroelectric development sites included in the inventory, 28 were screened out and the following were selected: in the Caroní sub-basin, Tayucay, Arichipi, Eutobarima, Carrao I and Carrao II; and in the Paragua sub-basin, Tonoro.

An important consequence of the development of these sites would be the regulation of the waterflow that enters Guri, which until then would be a natural flow, as it is currently. In other words, due to the fact that future dams and reservoirs would be located on the Upper Caroní, the water input would be regulated on the basis of these developments, and would increase the energy now generated at Guri by approximately 10 o/o.

Description of the "Raúl Leoni" Hydro Power Station Project

Guri, where the "Raúl Leoni" Dam is being built, is located some 90 kilometers upriver of the

place where the Caroní and the Orinoco Rivers merge, at Ciudad Guayana. The total execution of this project will make it possible to regulate as much as 95 o/o of the annual waterflow of the river in benefit of Macagua I and the future stations of Macagua II, Caruachi, and Tocoma, which would be the next development sites on the Lower Caroní.

In order to build the hydroelectric station "Raúl Leoni" it was necessary to dam the waters of the Caroní River at Guri, and this gave rise to a lake covering an area of 800 square kilometers. When the area was dammed and flooded, the so-called "Operation Rescue" was implemented and more than 18,000 animals were salvaged, along with a considerable amount of invaluable petroglyphs.

Initial Development Plan

Originally, the construction of the Guri Project was conceived in the following three stages:

First Stage: This phase referred to the dam which is currently operative. The dam has an elevation of 215 meters and a powerhouse that includes 10 generating units. Construction began in November 1968 and the dam began operating in 1977, with an original installed capacity of 2,565,000 kilowatts.

Second Stage: This stage included further development of the project, to raise the reservoir level 20 more meters (to 235) and to install six generating units in a second powerhouse, so as to add 2,200,000 kilowatts.

Third Stage: This would constitute the final stage of the project, whose objective would be to raise the dam to 265 meters and add another eight generating units to the second powerhouse,

in order to attain a total installed capacity of 6,500,000 kilowatts for the Guri station.

THE FINAL STAGE NOW UNDERWAY

The project, as conceived currently, is different from the initial concept; it consists of the continued development of the second and third stages anticipated previously, with certain adjustments in terms of reservoir level and size, capacity, and number of units. Reasons such as oil price increases, a clear awareness of the country's energy needs, and technological advances, modified several aspects of the original project, such as, for example, the elevation and power capacity of the hydro-generating units. It was decided to raise the maximum reservoir level formerly anticipated another 7 meters (to 272 meters) in order to generate at the site the largest amount of energy possible. Likewise, the units selected at that time did not have a capacity any greater than 450,000 kilowatts each. Now, with the project in its final stage, it is thought to install generators with a 700,000-kW capacity. With these changes, the generation capacity of Guri will manage to reach some 10,000,000 kilowatts.

Thus, the final stage of the Guri Project consists of:

- a) Raising the main gravity dam and spillway, already existing, to an elevation of 272 meters.
- b) Construction of two new gravity dams on the right and left sides of the river.
- c) Construction of a new powerhouse at the foot of the new gravity dam on the right side of the river.
- d) Construction of two earthen-rock dams alongside the gravity gams.

e) Construction of dikes to the left and right of the reservoir.

It is estimated that all of the concrete structures of the final stage will require 6,600,000 cubic meters of concrete.

The intake gates of Units 1, 2 and 3 of the first powerhouse will be modified to support the additional load imposed by the new reservoir levels; and all of the mechanisms to operate the gates will be relocated so that the construction of the final stage will not interfere with the functioning of the 10 units already installed.

Once all of the reservoir and water control structures have reached the current level of the dam, the rock dam now existing can be moved to the lower level of the new intakes.

Preliminary Structures

The importance of the project, the magnitude and short execution period for the structures, and the needs of the site derived from its location obliged planning and building a series of preliminary structures to provide services to the project during its execution, including access for labor and materials. It was also judged necessary to purchase and mount equipment and plants requiring extensive lead times, e.g., a plant to produce concrete, with a capacity of 500 cubic meters per hour; a plant to produce 540 tons of ice per day, to cool the concrete; and a construction viaduct, a metal structure with 11,000 tons of steel, 14 meters wide and 1600 meters long, along which the cars that transport the concrete move, with 8 large cranes to empty these.

It was considered convenient to construct highways which, insofar as possible within regional roadway plans, would tie in Guri directly to

population centers of Guayana such as Ciudad Bolívar, Puerto Ordaz and Upata.

Temporary and permanent access roads were also built within the site, due to the fact that once the work started the existing accesses would be lost to the dam and new construction sites.

In addition, it was necessary to expand facilities and services for personnel estimated at nearly 20,000 persons. For this purpose, new camps were built for workers and contractors, camps which in the future could be a starting point for a tourist center.

Powerhouse No. 2

The new powerhouse construction, which will house the generating equipment, will be 58 meters wide and 280 meters long; and 10 units will be located inside, precisely downriver of the main gravity dam, east of the present powerhouse.

The vanes for locating the generators are downriver of markers 1, 2 and 3 and switch modules are located on the lower section of the structure. The vertical extensions of the roof beams support transmission lines that exit to the distribution patio.

Most of the service facilities are located in the assembly yard which, in turn, is divided into two areas: the generator room, or upriver section, and the downriver area. The upriver section will be destined to a pumping station, storage, and oil purification installations, air compressors, battery stations, a workshop and electrical storage, a mechanical workshop, a construction area and a discharge area. The downriver section consists of four floors and includes the air intake, the sewage treatment plant, a gallery for cable extensions, offices and other installations.

Elevation of the Spillway

The current spillway, which has a total width of 183.76 meters, is divided into three canals. This permits it to be progressively elevated by means of a suitable construction program, while always maintaining two canals in operation. The maximum discharge capacity of each spillway canal is 31,000 cubic meters per second; and the maximum probable, river rise has been established as a peak of 48,100 cubic meters per second, with a volume in 23 days of 45,400 million cubic meters, which guarantees that the reservoir level at a height convenient for construction work.

Each canal of the spillway has three vanes with an opening of 15.24 meters; and each vane is equipped with identical radial gates 20.76 meters high, which are operated electrically and which open and close according to the reservoir's operating needs.

This structure will be raised in stages: first, the walls and piles will be raised, and on these bases the gate operation mechanisms will later be relocated.

Other Aspects of the Project

A second canal will be dug at the penstock exit of the second powerhouse, to the right of the existing discharge canal. The volume of excavated rock will amount to approximately 15,610,000 cubic meters.

For the second powerhouse, a discharge canal separate from the first has been anticipated. It will be located in the dry river bed to the right of the existing discharge canal, which it will join approximately 2500 meters downriver of its origin.

The new discharge canal is designed to provide, under peak operating conditions, the maximum water level that can be used without interfering with the level of the first powerhouse. The ground along the canal route is constituted by a high layer of gneiss, which reaches the outside surface, so that most of the excavations are done in rock.

On the right and left sides of the dam site, it is necessary to build large dams with fill material, which will have to be joined to concrete dams by means of rock sections. It is important to excavate a considerable space in order to establish a suitable foundation for these structures; and this will be prepared, injected and drained in keeping with the subsurface geology and topography of the area.

The current distribution patio is located on the left side of Discharge Canal No. 1; and to house the installations of the interconnection circuits between the new units and the transmission lines, there are plans to broaden the distribution patio approximately 300 meters downriver of the existing patio.

SIGNIFICANT DATA ON THE GURI PROJECT

RESERVOIR	First Stage		Second Stage	
Basin area	85,000	km ²	85,000	km ²
Minimum operating level	195	m	240	m
Maximum normal level	215	m	270	m
Maximum flood level	219.5	m	217.6	m
Area at maximum normal level	765	km ²	4,260	km ²
Volume at normal level	17,700	MMC	135,000	MMC
Volume at minimum level	5,900	MMC	5,900	MMC
CONCRETE DAM				
Type of Dam	Gravity		Gravity	
Road level	220	m	272	m
Parapet level	220.91	m	272.3	m
Height from foundation	110	m	162	m
Height from river bed	100	m	152	m
Length of right-hand gravity dam	493	m	996	m
Length of left-hand gravity dam	179	m	164	m
Nominal downriver slope	0.75	H: IV	0.75	H: IV
Width of right hand gravity dam	2.50	m-16.25 m	2.50	m-21.00 m
Width of left hand gravity dam	3	m	11.45	m
Maximum depth of injection curtain	75	m	100	m
Volume of concrete	1,127,000	m ³	5,325,000	m ³
SPILLWAY				
Type	Ojiva		Ojiva	
Type of gates	radial		radial	
Level of crest	195.2	m	250.2	m
Size of gates	15.24x20.76	m	15.24x20.76	m
Normal load capacity	28,000	m ³ /s	28,000	m ³ /s
Maximum capacity	40,000	m ³ /s	33,000	m ³ /s
Volume of concrete	327,000	m ³	746,000	m ³
RIGHT-HAND EARTHEN DAM AND ROCK WALL				
	First Stage		Second Stage	
Length of crest	220	m	3,944	m
Maximum height from foundation	90	m	110	m
Level of crest	221.3	m	277	m
Width of crest	12	m	11	m
Downriver slope	2.50	H: 1V	3	H: 1V
Upriver slope	1.75	H: 1V	2.50	H: 1V
Total volume	2,089,000	m ³	45,000,000	m ³
LEFT-HAND EARTHEN DAM AND ROCK WALL				
	First Stage		Second Stage	
Length of crest	---		2,000	m
Maximum height from foundation	---		90	m
Level of crest	---		276	m
Width of crest	---		11	m
Downriver slope	---		3	H: 1V
Upriver slope	---		2.50	H: 1V
Total volume	---		18,000,000	m ³

POWERHOUSE No. 1

Number of units	10		---
Separation between units	23	m	---
Excavation	638,000	m ³	---
Concrete	240,300	m ³	---
Turbine types	Francis		---
Rated turbine capacity			
Units 1 to 3	180.2	MW	
Units 4 to 6	223	MW	
Unit 7	340	MW	
Units 8 to 10	370	MW	
Rated generator capacity			
Units 1 to 3	185	MVA	
Units 4 to 6	230	MVA	
Units 7 to 10	360	MVA	
Power factor			
Units 1 to 6	0.95		
Units 7 to 10	0.90		
Transformer capacity (1 & 2)	203,500	KVA	
Transformer capacity (3)	212,000	KVA	
Transformer capacity (4 & 6)	265,000	KVA	
Transformer capacity (5)	255,000	KVA	
Transformer capacity (7 to 10)	420,000	KVA	

POWERHOUSE No. 2

	First Stage	Second Stage
Number of units	---	10
Separation between units	---	28 m
Excavation	---	1,006,000 m ³
Concrete	---	614,000 m ³
Turbine types	---	Vertical Francis
Rated turbine capacity	---	610 MW
Rated generator capacity	---	700 MVA
Power factor	---	0.90
Transformer capacity (11 to 20)	---	805.50 MVA

POWERHOUSE CRANES

	First Stage	Second Stage
Number	1	2
Polyplasts	2	4
Hook capacity	325 MT	375 MT
Total capacity	650 MT	1,500 MT
Manufacturer	Nippon, Japan	Hitachi, Ltd.

PENSTOCKS FOR POWERHOUSE No. 1

Material	ASTM-A201-61T	---
Number	10	
Diameter (1 to 3)	7.5 m to 5.7 m	---
Diameter (4 to 10)	7.5 m to 6.5 m	---
Sheet thickness (1 to 3)	16 mm to 40 mm	
Sheet thickness (4 to 10)	16 mm to 48 mm	
Weight of each penstock (1 to 3)	703 MT	---
Weight of each penstock (4 to 6)	832 MT	---
Weight of each penstock (7 to 10)	798 MT	---



PENSTOCKS FOR
POWERHOUSE No. 2

First Stage

Second Stage

Material	---	ASTM-A516 Gr 70
Number	---	10
Diameter (13 & 14)	---	10.5 m to 8.48 m
Diameter (11, 12, 15-20)	---	11.4 m to 8.48 m
Sheet thickness (11 to 20)	---	30 mm to 58 mm
Weight of each penstock (13 & 14)	---	1,544 MT
Weight of each penstock (11, 12, 15-20)	---	1,776 MT

DISCHARGE CANAL No. 1

Length	1,500	m	---
Width at bottom	70	m	---
Volume of excavation	2,350,000	m ³	---

DISCHARGE CANAL No. 2

Length	---	2,637	m
Width at bottom	---	180	m
Volume of excavation	---	15,610,000	m ³

MARGINAL DIKES

Length of crest	32,000	m
Maximum height from foundation	45	m
Level of crest	275	m
Width of crest	7	m
Upriver slope	3	H= 1V
Downriver slope	2.5	H= 1V
Total volume	13,000,000	m ³

SUMMARY OF CONSTRUCTION CONTRACTS

Total excavation	3,130,000	m ³	16,616,000	m ³
Earthen dams and rock walls	2,089,000	m ³	76,000,000	m ³

COAL, LIGNITE AND PEAT IN BRAZIL

Technical Division
Auxiliary Company of
Brazilian Electric Power Companies
(CAEBC)

Summary of the Coal Situation in Brazil

The objective of the Energy Coal Program of Brazil, which forms part of the national energy model, is to produce 16,800,000 tons of coal as of 1985. The program was established for the 1979-1985 period by the government of General Figueiredo.

The responsibility for executing the coal program falls to the Ministry of Mines and Energy, headed by Senator César Cals de Oliveira. Basically, the goal of producing 16,800,000 tons per year was established to substitute imported oil derivatives (or mineral fuels), equivalent to 110,000 barrels of oil per day.

The Brazilian coal reserves are located in the southern part of the country, and they have been estimated as 23 billion tons.

It is thought to produce 6,290,000 tons of energy coal in 1982.

Bearing in mind the difficulties of implanting this alternative energy program, the Brazilian government has established a series of policies providing incentives for the production and consumption of coal, as follows:

1. Eighty per cent of the production of new mining projects is financed with a fixed interest

rate of 5 o/o annually, an inflationary correction limit of 50 o/o and a 12-year payback period including a 4-year grace period.

2. The coal production is purchased by the CAEBC, the State coal company of the Ministry of Mines and Energy, which distributes it with guaranteed sales for producers and guaranteed supplies for consumers.

3. A pricing system has been created to assure the real cost plus a profit, for producers, and a sale price 30 o/o below the equivalent price of oil derivatives, for consumers.

4. In order to assure the production and use of coal, the government establishes protocols between the Ministry of Mines and Energy, as producer, and the Ministry of Industry and Trade, fuel oil consumer (especially the cement, iron and steel and paper and cellulose industries, which receive financing to substitute oil burning by coal).

5. In addition to the internal protocols, the Ministry of Mines and Energy signs international agreements that provide for new processes, special financing and personnel training.

6. A firm purpose of the Ministry is to cultivate and exchange technological information and expertise with other Latin American countries, both directly and through the Latin American Energy Organization (OLADE).

Current Legislation

The beds, mines, and other manifestations of mineral resources, as well as the hydroenergy potential available for exploration or industrial use, do not constitute private property. However, the individual owner is assured participation in the results of the work, as well as a tenth of the mineral tax (according to the Brazilian Constitution).

The geological investigation of any mineral in Brazil should be framed within the provisions of the Brazilian Mining Code.

Authorization for mineral investigations can only be granted to a natural or artificial Brazilian or to a mining company already constituted in Brazil, with express authorization from the Ministry of Mines and Energy and following a process of review and reports by the National Department of Mineral Production (DNPM).

Once an investigation permit has been requested and granted, the interested party has a period of three years —which can be extended— to present a report on the investigations, even when the interested party is the government firm Mineral Resource Investigations (CPRM).

Authorization for the work is only conceded to juridical persons. Once the investigation report has been approved, the interested party has one year to present the following documents to the DNPM:

- a) A work plan
- b) Proof of the constitution of a mining company, if relevant.

Once the one-year deadline has passed without fulfilling the above-mentioned requirements, the interested party loses the right to the work

concession, and it can be requested by other parties.

Furthermore, when the Government (CPRM) undertakes the detailed investigation of a deposit, it does not have rights to the work; and therefore, another party interested in acquiring authorization to do the work can reimburse the Government for the costs incurred by the investigation.

With respect to the program of investigations conceded to DNPM-CPRM by the Government, the financial resources are considered lost funds, without the possibility of future reimbursement.

For the investigations and work related to coal, the Government, through the Ministry of Mines and Energy (MME) or the Secretariat of Planning (SEPLAN) grants funding from the Energy Mobilization Plan, according to the following conditions:

Value: 80 o/o of the investment

Monetary correction: 50 o/o of the variation in ORTN*

Interests: 5 o/o annually

Grace period: 4 years

Amortization: 8 years after the grace period.

* Readjustable obligations of the National Treasury

COAL

1. Reserves: definitions

Coal bed: stratum that contains a total thickness of coal of between 1 centimeter and 19 centimeters.

Coal seam (total seam): set of coal beds that contain sterile intercalations, at least 20 centimeters thick and corresponding to at least 40 o/o of the coal contained in the seam, with relation to the total thickness.

Coal bank: coal stratum with more than 20 centimeters of coal and few sterile intercalations within the seam.

Coal in the seam: sum of the thicknesses of the different intercalations of coal beds and banks contained in the seam.

2. Criteria and Evaluations

The minimum thickness of economically minable coal depends on production costs (which are variable, as a function of mining methods, the size of the mine, roof conditions, the structure and depth of the seam, mining prospects for overlying economical seams, the enrichment process and the recovery of usable fractions with relation to total raw coal), as well as on the value of the saleable fractions obtained.

A change in the minimum thickness, to a lower value, as a function of the energy crisis, will obviously increase reserves.

Bearing in mind the current experience of Brazil, in terms of operative mines, the thickness generally adopted in the country varies between 0.5 and 1.0 meters of coal in the seam.

The definition of areas to calculate the three types of reserves (measured, indicated, inferred) is based on the limits adopted by the United States Geological Survey (USGS), with miles converted into meters and a few approximations.

Measured reserves: are those contiguous to the sounded boreholes in a radius of 400 meters and an area of 0.50 km². They include as measured reserve zones the narrow belts between the circles of influence of positive deposits, since the centers of the belts are no farther away than 600 meters from any of the holes.

Note: The belt that lies at a distance of more than 600 meters from any of the holes will constitute an area of indicated reserves.

Indicated reserves: are those areas outside the measured reserve zones, in a radius of 1200 meters and corresponding to a circular crown of 4.02 km². As in the preceding case, they include the thin belts between the positive holes, since their center is not found more than 1500 meters away from any hole.

Inferred reserves: are those situated within the area of indicated reserves, where the thickness of coal in the seam is greater than the established minimum, up to a maximum distance of 4800 meters from the holes.

Reserves, as defined, must be considered geological reserves *in situ*, not to be confused with recoverable reserves, which would be that part of the seam that could be recovered after taking into account losses due to mining and enrichment processes, local geological problems such as faults, diabasic intrusions, inviability of work in two or more overlying seams, etc.

The reserve (measured, indicated or inferred) of the coal that lies between isopach curves is obtained by multiplying the area between them by the average thickness and specific weight of the floated coal. The sum of the corresponding values between isopachs yields the global reserve.

The areas between contiguous isopach curves, and the corresponding average thicknesses, are determined by means of planimetry.

The specific weight of coal is determined on the basis of the coal contained in the drill cores obtained during soundings and floated in a dense medium (density of the cut: 1.85).



For lignite and peat, the criteria and calculations are approximately the same as for coal, although greater detail can exist with relation to peat.

3. Reserves: Characteristics

The major coal reserves of Brazil, known to date, are located in the southern part of the country, along the western border of the sedimentary basin of Paraná, covering the states of Paraná, Santa Catarina, and Rio Grande do Sul. See Appendix I.

In the state of Rio Grande do Sul, coal appears in the form of basins, mainly: Candiota, Irui, Leao-Butia, Charqueadas, and Gravatí-Morungava.

The coal of Rio Grande do Sul is generally energy coal or steam-generating coal, while the deposits of the Gravatí-Morungava region have metallurgical coal fractions destined to the production of coke for the iron and steel industry or foundries.

In the state of Santa Catarina, the coal deposits are located within a belt twenty kilometers long (East to West) and 100 kilometers wide (North to South), between the Serra do Mar and the Serra Geral.

Coal seams occur at ten sites in the Bonito Formation, but only three of these are economically minable:

- Barro Branco
- Irapúa
- Bonito

The coal seam of Barro Branco shows good continuity. The raw coal that is extracted from this deposit undergoes a pre-enrichment process, to yield a product known as pre-washed coal (PWC). From this is derived a metallurgical fraction (30 o/o) with an ash content of 16.5 o/o, destined to the production of coke for the iron and steel industry, in mixtures with imported coals.

The other fractions, with a higher ash content, are used in thermoelectric plants and in cement production.

COAL RESERVES 10^6 tons				
STATE	MEASURED	INDICATED	INFERRRED	GLOBAL
Paraná	32.04	57.74	5.00	94.78
Santa Catarina	369.31	859.07	712.86	1,941.24
Rio Grande do Sul	1,796.41	3,579.06	15,392.53	20,768.00
T O T A L	2,197.76	4,495.87	16,110.39	22,804.02

The Irapúa coal seam is discontinuous, but its composition is similar to that of Barro Branco.

The Bonito coal, with reserves equal to those of Barro Branco (some 800 million tons) possesses a reduced metallurgical fraction.

In the state of Paraná, part of the coal reserves are associated with uranium. A special technology, already developed, is being applied in those reserves in order to tap both types of mineral reserves, including molybdenum as a by-product.

LIGNITE

The only area detected with lignite resources in significant amounts, on the order of 36.4 trillion tons, was the region of Alto do Rio Solimoes, in the State of Amazonas. This potential lignite zone covers some 90 km². Using grids of 2 km. by 2 km., a detailed survey undertaken in the region of Benjamin Constant (part of the Alto do Rio Solimoes area) led to the estimate of a reserve of some 35.5 million tons of lignite.

Other reserves which have been detected are as follows:

SITE	STATE	TOTAL	EXPLORABLE	(tons)
Hacienda Gondela	Minas Gerais	2,800,000	1,700,000	
Capava	Sao Paulo	152,000	—	

The presence of lignite has been confirmed in the states of Pará, Amapá, Maranhao, Pernambuco, Bahia and Rio de Janeiro.

PEAT

Peat prospecting is being done in the states of Sao Paulo (Paraiba Valley region), Rio de Janeiro (Campos Basin), Espírito Santo (Rio Doce Valley) and along all of the coastal belt, from the

south of the state of Bahia to the state of Rio Grande do Norte.

The reserves estimated to date in the above-mentioned regions are listed in the chart below:

ESTIMATED RESERVES			
REGION	STATE	TOTAL 10 ⁶ tons	DEPTH m
Southern Paraiba Valley	Sao Paulo	680.0	—
Rio Doce Valley	Espirito Santo	600.0	—
Campos Basin	Rio de Janeiro	60.0	—
Bahia-Sergipe Coasts	Bahia-Sergipe	1,310.0	0
Northwestern Coast	AL-PE-PB-RN	291.7	1
TOTAL		2,941.7	

It is recognized that of the reserves of the Southern Paraiba Valley (Rio de Janeiro) 20 o/o is energy peat (CV 3,500 Kcal/kg).

For the peat-bearing zones of the Bahia-Sergipe coasts and the northwestern coast, it is estimated that 30 o/o is energy peat.

Geological Investigations

1. Executors

In general, geological investigations in new potential areas of coal, lignite and peat are being carried out by the DNPM-CPRM, where the former is the programmer-contractor and the latter the program executor.

The CPRM is also conducting investigations on its own, in the concessionary areas it has acquired.

With a view to expediting the opening of new mines, to attend the coal production goals established by the Ministry of Mines and Energy, the

DNPM, through the CPRM, has also been executing an intensive program of detailed investigations, in order to provide the mining companies with the subsidies needed to expand the extraction projects in existing mines or other new mines to be opened.

Furthermore, the CPRM is developing a detailed investigation program in its concessionary areas, for the purpose of learning about the geological aspects of the deposits and later placing in bidding the necessary data for the project work by private initiative.

To implement the DNPM program or its own investigations, the CPRM can contract the services of private research or drilling companies.

The Brazilian drilling capacity, including that of the CPRM and private companies, is 230,000 meters a year. However, to the limited availability of financial resources for the execution of a broader investigation program, the soundings have totaled only 130,000 meters annually. For this reason, there is interest in exporting some 100,000 meters of sounding services for geological investigation per year, and in this regard, the CPRM has already approached the governments of Mozambique, Paraguay, and others.

2. PROGRAMS IMPLEMENTED

During 1970 - 81, within the framework of the CNPM-CPRM agreement, 274,334.30 meters of soundings were made, representing 1,426 bore holes and partially covering the basins of Parana, Amazonas (Alto Solimoes), Parnaiba (Maranhao and Piaui), Reconcavo (Bahia) and Vale de Pimenta Bueno (Rondonia).

In the region of Rio Fresco, Para, it was possible to find carbon-based resources on the order of 4 billion tons. Along the Upper Amazon

River, lignite resources on the order of 36.4×10^9 tons were defined. In the Parana Basin, where most of the efforts were concentrated, the possible geological reserves went from 2.7×10^9 tons to 22.8×10^9 tons.

Along the northwestern coastal belt, preliminary work detected reasonable amounts of peat reserves.

In the basins of Reconcavo and Parnaiba, the results obtained in terms of coal were discouraging.

3. FUTURE PROGRAMS

The programming for the next few years has the following objectives:

- a) To transform indicated and inferred reserves into measured reserves.
- b) To continue the prospecting work in potential areas for coal, lignite, and peat, in order to determine the alternative energy sources available for regional use.
- c) To develop new research methods, with a view to elaborating better parameters to define deposits and to obtaining results at lower costs.
- d) To develop studies on the execution of the work, recovery and enrichment of coal, so as not to affect the environment.

4. Types of Deposits

In the State of Santa Catarina, the active coal mines reach a depth of up to 150 meters with reference to the Barro Branco coal seam. The Bonito layer lies underneath the Barro Branco, generally at some 50 meters.



Coal deposits lending themselves to open-pit mining are quite limited in Santa Catarina.

In the State of Rio Grande do Sul, the deepest mine (300 meters) is Charqueadas (Well Otavio Reis), property of the COPELMI.

The coal deposit of the Gravati-Morungava region has variable depth, permitting, in the future, mining activities ranging from the open-pit process up to depths of 600 to 800 meters.

The main coal deposits that permit open-pit mining are in the area of Rio Grande do Sul. In Candiota, of the 8 trillion tons of reserves, 3 trillion could be mined with the open-pit method at 30 to 40 meters.

The open-pit reserves increase with equipment which makes it possible to use this process at greater depths, e.g., 50,100 or 120 meters.

Other coal deposits for open-pit mining in the Rio Grande do Sul region are Irui, Faxinal, and Recreio.

The currently active mines can be broken down by State and mining process, as follows:

STATE	OPEN-PIT	UNDERGROUND
Parana	---	3
Santa Catarina	7	26
Rio Grande do Sul	3	2
TOTAL	10	31

Investigation Methods and Stages

1. AREAS WITH EVIDENCE OF DEPOSITS

- a) Compilation of bibliography (books, photos, etc.)
- b) Geological maps
- c) Additional photo-interpretation
- d) Rapid field checks.

2. AREAS WITHOUT EVIDENCE OF DEPOSITS

- a) Preliminary mapping (scales of 1:50,000 or 1:25,000), based on aerial photography, geological field reconnaissance. Execution of geological cross-sections along the area under study.
- b) Definition of the limits of the Gondwana rock.
- c) Determination of diabasic bodies (seals, dikes).
- d) Opening of trenches, wells, and boreholes.
- e) Preparation of maps of the facies (environment of shale deposits).
- f) Geological maps.

3. Geophysical Investigations

These techniques are used in areas of recent sedimentation, alluvial plains or very flat, dry areas and areas with structural problems.

The following geophysical methods are used in Brazil:

- Magnetometry: in rocks with magnetic properties and diabasic bodies.
- Electrical resistivity: to detect seams and the tectonic structure of the deposit.
- Refraction Seismics: to detect the structure of the crystalline basement.
- High-resolution Seismics: a sophisticated method, using explosives, to detect the presence and thickness of coal layers more than 0.5 meters thick.

4. Executors

In the case of high-resolution seismics, specialized foreign companies affiliated with Brazilian companies are contracted to conduct the studies and process the data since the equipment involved is sophisticated and expensive. However, the CPRM has developed an original interpretation method for seismic sections, with great success.

The other investigation methods are carried out by Brazilian firms (mapping, soundings with drill cores, geophysical profiles).

The geophysical profiles include:

- spontaneous potential
- electrical resistivity
- gamma logs (radioactivity).

5. SOUNDING EQUIPMENT

- a) Rotary probes (3 cone-shaped toothed wheels)

b) Rotary diamond probes (diamond head)

The rotary probes are used to obtain gutter chip samples with a triconic bit.

The diamond rotary probe is used to obtain drill cores from soundings with diamond or carborundum boring heads.

6. Features

1. Coal

The basic concept of energy coal is that coal whose carbon material does not have agglutinating properties when exposed to temperatures of 1000 °C or more; in other words, it does not lend itself to producing metallurgical or foundry coal. By extension, "energy coal" is the fraction which results from the enrichment of pre-washed coal in the Washery of Capivari (state of Santa Catarina), with a high ash content (35 - 40 o/o). This is the traditional steam-generating coal.

In Brazil, metallurgical coal is the fraction resulting from the enrichment of pre-washed coal from the Washery of Capivari, with an ash content of 16 to 18.5 o/o, the density of which fluctuates in 1.50.

The metallurgical coal produced in the Washery of Capivari is used in mixtures with imported coal (80 o/o) to produce coke for the iron and steel industry.

In the coal-based thermoelectric plants, coals with more or less the following ash contents are used:

20 o/o — COPEL (Parana)

40 o/o — ELECTROSUL (Santa Catarina)

SAN JERONIMO (Rio Grande do Sul)

50 o/o — PUERTO MEDICI (Rio Grande do Sul)

ELETROSUL (Rio Grande do Sul)

The specific weight of coal varies between 1 and 0.6 kg/kw.

Coals with the following approximate ash contents are used for cement production:

20 o/o — MATARAZZO (special case)

35 o/o — Standard type adopted for the cement industry

On the average, 2.5 tons of coal with a 35 o/o ash content (CV = 5,000 kcal/kg) are required to substitute 1 ton of fuel oil.

The agreement signed between the Government and the unions for the coal and cement industries establishes stages for the total substitution of the fuel oil used in cement production, in the pre-heating towers (dry method), raw paste (wet method) and soldering irons. The following chart indicates the anticipated substitution schedule:

The iron and steel and paper and cellulose sectors have also signed agreements with a view to substituting oil derivatives by national alternative energy sources.

Energy coal with ash contents of 20, 30 and 40 o/o is also used in boilers and for other industrial purposes such as grain drying, ceramics, etc.

For the production of iron sponge by directly reducing iron ore, energy coal is used (the so-called reducing coal) with a 33 to 35 o/o ash content.

STAGE	DEADLINE	FUEL OIL REDUCTION	COAL CONSUMPTION (10 ³ tons/yr)
1st	Until Dec. 80	640	1,280 (30 o/o)
2nd	Until Dec. 82	2,140	4,280 (50 o/o)
3rd	Until Dec. 84	2,780	5,560 (100 o/o)

2. Lignite

Lignite analyses, including the lignite of Alto Solimoes, yield values between the intervals specified below:

Hydroscopic units	8 - 10 o/o
Ash	25 35 o/o
Volatile material	30 - 50 o/o
Fixed carbon	20 - 30 o/o
Sulphur	3 - 4 o/o
Calorific value	4,000-5,000 kcal/kg
FSI	0
Specific weight	1.6 - 2 g/cm ³

According to the ASTM classification these characteristics put the carbon material among the upper limit for peat and the lower limit for lignite.

3. Peat

The average characteristics of peat deposits that deserve further study are as follows:

PROJECTS	AVERAGE SIZE (ha)	AVERAGE THICKNESS (m)	AVERAGE COVERAGE (m)	ASH o/o b.s.	AVERAGE VALUES SULPHUR o/o b.s.	CAL. VALUE kcal/kg
Coast						
Bahia-Sergipe	1,600	204	0	22	0.85	4,400
NW Coast						
Rio Grande do Norte	600	0.8 to 3.60	1.0	44	1.3	2,430

In general, the Brazilian peat occurs in the proportion of one third energy peat and two thirds agricultural peat.

Energy peat is that whose upper calorific value is more than 3,500 kcal/kg, dry base, corresponding to ash contents lower than 35 o/o.

Agricultural peat is that whose upper calorific value is lower than 3,500 kcal/kg, dry base, corresponding to ash contents of above 35 o/o.

Edited version of a document prepared by the Technical Division of the Auxiliary Company of Brazilian Power Companies (CAAEB).

SEDIMENTARY BASINS AND THE OIL POTENTIAL OF GUATEMALA

Carlos Paiz Ramírez

Jaime Rodríguez

Department of Technical Services and Investigations
Secretariat of Mining, Hydrocarbons and Nuclear Energy

GEOLOGICAL AND TECTONIC HISTORY

Little is known about the country's geological history prior to and during the Paleozoic. It is thought that during the Upper Paleozoic the geosynclinal rocks of Guatemala were eroded and deformed, thus broadening the area of the platform that extended from the north. Also, it is possible that the resulting post-orogenic movements formed the islands south of this geosyncline. (See Figure 1.) There also occurred discordant deposits of a sequence of clastic rocks during the Upper Pensylvanian, followed by carbonate rocks in the Lower Permian (Santa Rosa Group).

The rocks from the Upper Paleozoic have been interpreted by Dengo and Bonenberger (1976) as a clastic wedge, i.e., as a phase of sedimentation that followed on the metamorphism of the geosynclinal rocks (Upper Paleozoic orogeny).

After the Permian sedimentation, both the original geosynclinal rocks as well as the clastic wedge were severely folded and faulted; this deformation corresponded to the Appalachian orogeny. The only intrusion that has been dated is the Bladen Intrusion, in the Mayas Hills of Belize, which seems to be from the Middle Permian, prior to the Cretaceous.

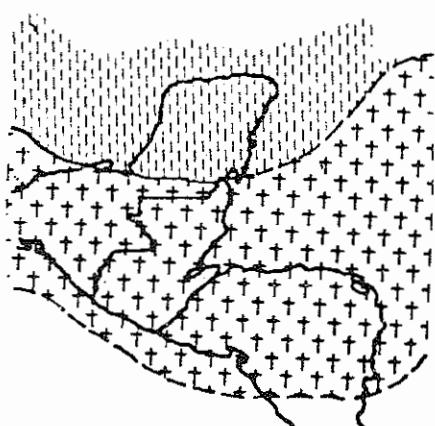
At the end of the Old Paleozoic, and possibly in the Triassic, the Villa Hermosa horst was created in Mexico; and, as we will see later, in subsequent eras it provided a place for the formation of reef-like banks with large oil deposits (Figure 2).

The orogeny that began in the Permian ended the Paleozoic period, and its manifestations included folding in the zones in movement, especially between platforms. There the Paleozoic section underwent a slight metamorphism, as well as granitic intrusions. A general rise of the moving zones and the platforms and adjacent craters took place after the orogenic activity.

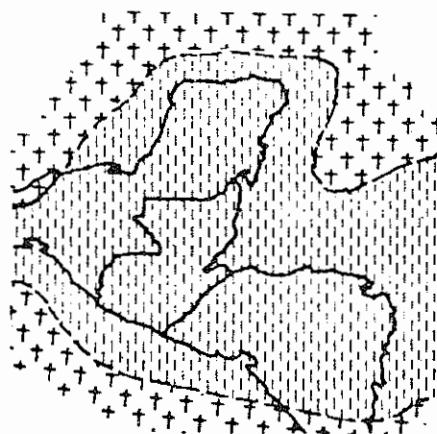
During the Triassic two phenomena occurred: erosion and faulting. The former began during the Early and Middle Triassic and exposed most of the areas comprised by the continental crust. The latter began during the Late Triassic and continued until the beginning of the Jurassic. Sedimentation occurred in grabens and semi-grabens on the land areas.

Tectonic movements ceased at the beginning of the Jurassic and erosion began to attack the very high mountains. At the beginning of the Late Jurassic, marine conditions emerged along the continental shelves of the Gulf of Mexico and western South America. Later on, the Gulf of Mexico started to sink constantly and marine conditions predominated. This gave rise to a new orthogeosynclinal cycle in the Caribbean-Gulf of Mexico region, which lasted until the middle of the Eocene. In general, the Triassic and Lower and Middle Jurassic rocks do not constitute major objectives for oil explorations. Nevertheless, the Upper Jurassic rocks have proved to be a good objective, especially around the Gulf of Mexico, as a consequence of the greater tectonic stability.

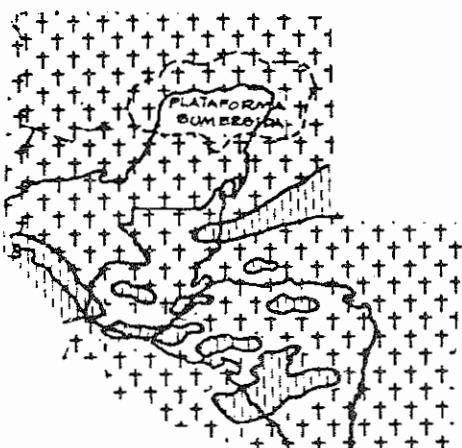
Figure 1
PALEOGRAPHIC SCHEMES



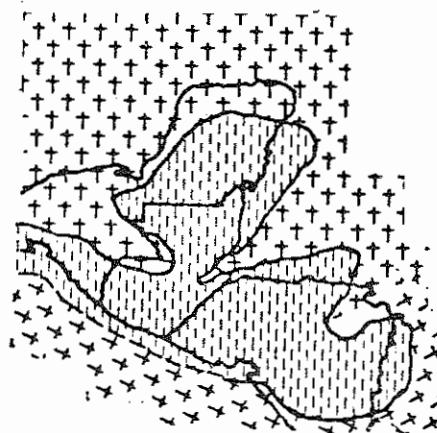
PALEOZOIC GEOSYNCLINE



LOWER MESOZOIC EMERSION I



MESOZOIC GEOSYNCLINE



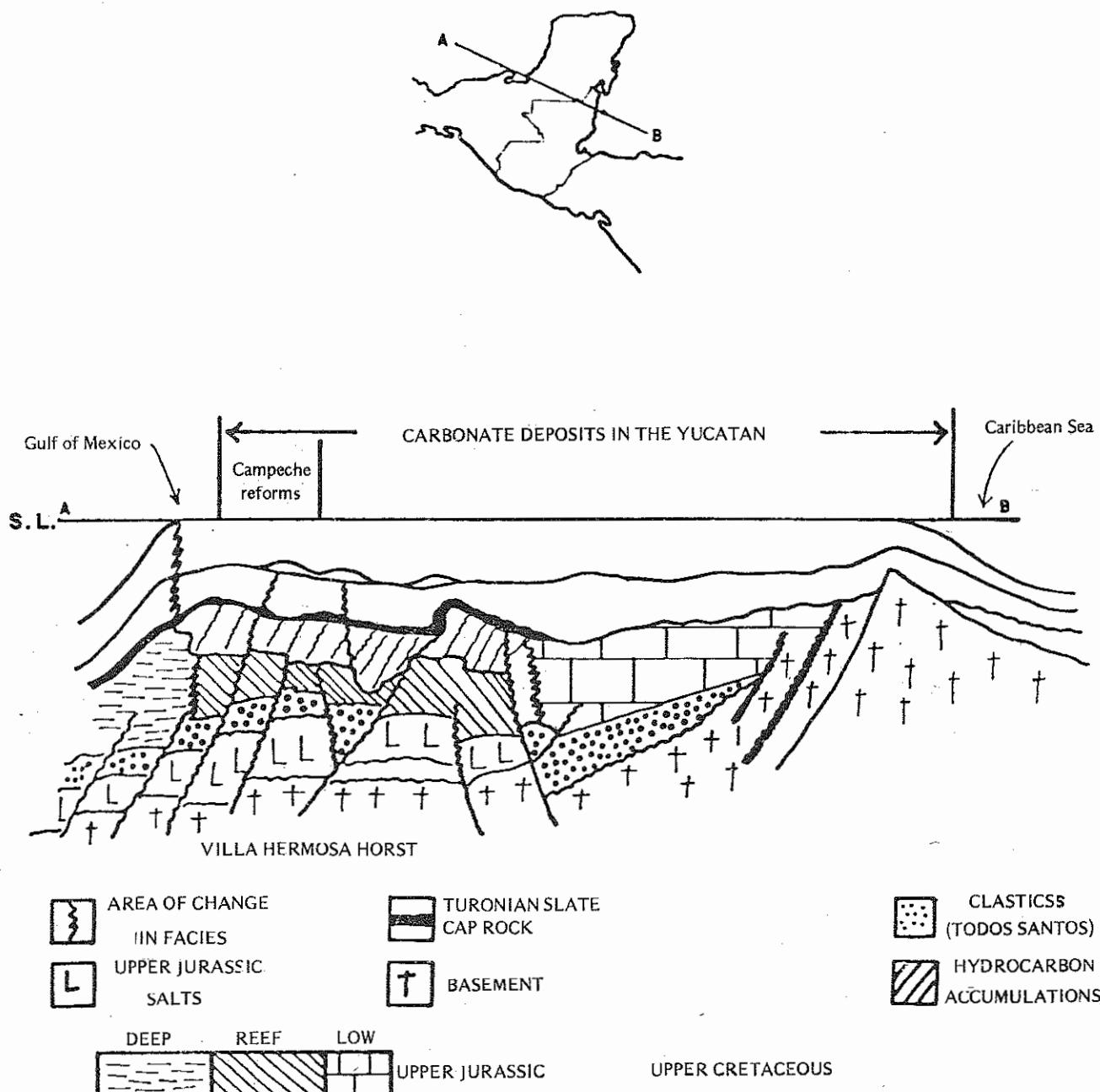
MIDDLE TERTIARY EMERSION

LAND AREA

OFFSHORE AREA OF SEDIMENTATION OFFSHORE AREA

(According to Dengo and Bohnenberger, 1967)

Figure 2



Cross-section Inferred for the Yucatan Platform

Salt deposits also occurred during the Triassic and Jurassic periods, and these created oil- and gas-producing saline domes. The salt lubricated the overlapping or folding, especially in the Chapayal Basin. Here we can cite the example of the salt deposits that originated the southern structures of this Basin, in the oil fields of Rubelsanto and Tortugas. Also, to the east of these fields, structural characteristics can be inferred; and we could possibly find the same phenomenon in the anticlines north of Quinché and Huehuetenango.

At the end of the Triassic and Lower Jurassic, there was a succession of red layers intercalated with volcanic rocks. In southern Mexico and Guatemala, equivalent sections cannot be found except in the area of Trinitaria, in the state of Chiapas.

At the end of the Upper Jurassic, the Yucatan Peninsula was partially exposed; during the Cretaceous the Mayas mountains were already emerging and the Amatique Bay, at the beginning of this same period, was an area of salt-contaminated deposits and sabkha sediments.

In the well Manabique 1-C, the Cretaceous gave rise to low-energy environments. The Yucatan, Belize and Guatemala (onshore and offshore) included a layer of shallow evaporitic rock. At the beginning of the Cretaceous, the Yucatan Peninsula was partially exposed and it became a deposit for reduced marine carbonates and evaporites. To the southeast Honduras was emerging. One of the interesting factors in the events of this era was the deposit of one of the world's largest known evaporitic sections (it is probably more than 20,000 feet thick). In Rubelsanto, the cap rock is composed of 15 to 20 feet of anhydrites above the carbonates. This series constitutes an evaporitic sequence mixed with carbonates (Figure 3).

The Most Important Geological Features of the Republic of Guatemala

The most important tectonic features of Guatemala include the Yucatan Platform north of the Petén, south of which the Arco de la Libertad (Liberty Arch) cuts across the department of Petén with an anticlinal structure which is lost as it extends westward into Mexico. This arch served as structural protection against all of the tectonic stress from the south and southeast, which was manifested along the southern border of the Chayapal Basin (Figure 4).

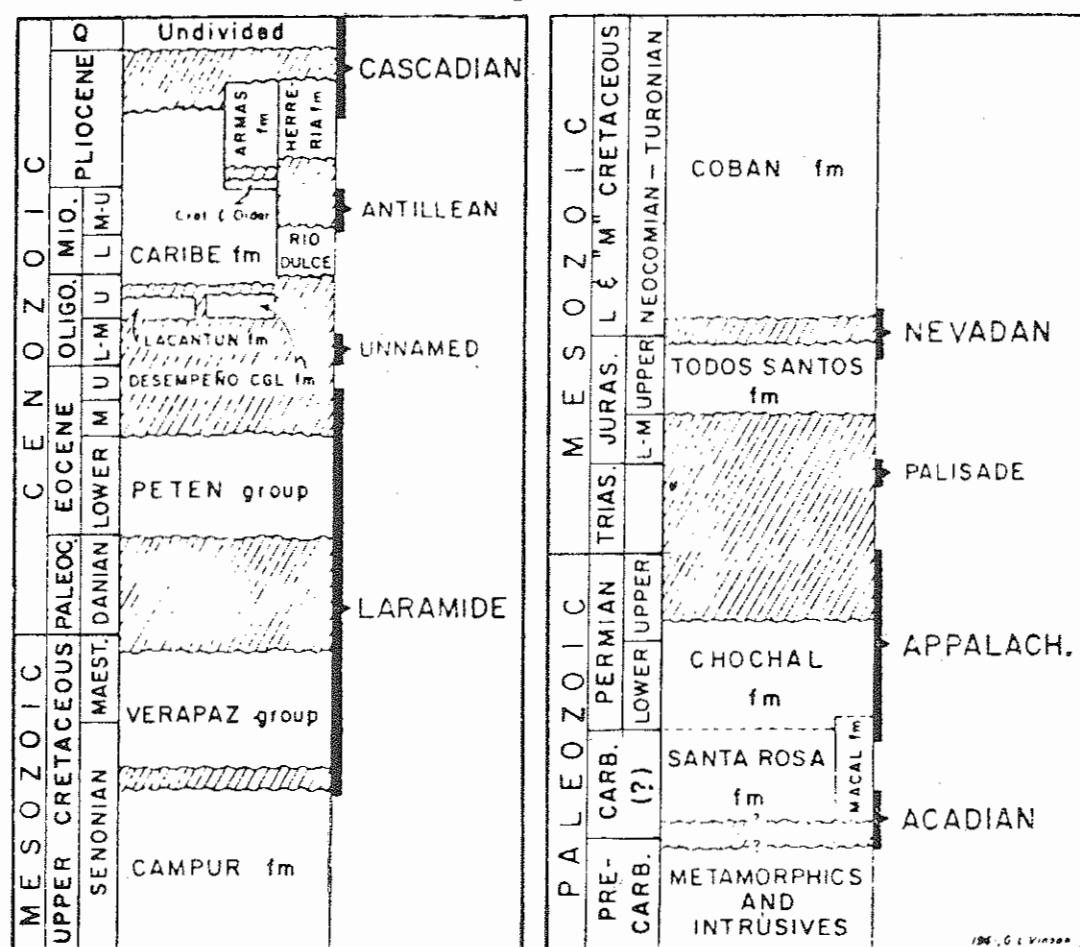
Farther south, we find the Sierra Madre, the nucleus of the Central American geoanticline, with Paleozoic rocks and a series of outcrops that include a variety of more recent, and possibly Pre-Paleozoic, periods.

This mountain chain provided the structural factor that partly controlled the orogenic movements and the distribution of stress in the sedimentary layers of the Tertiary in the Chapayal Basin. Still farther south, we see the progradational coastal plain of Tertiary and Quaternary origin, where the volcanic activity of these eras is clearly manifested.

Also, to the northeast, the Mayas mountains interrupt the sedimentary rocks of the Tertiary and partially limit the Sarstún inlet, the Sarstún Depression and the Amatique inlet -Barlett Depression. Geographically, they are found north of the folded mountains in the middle of the country (Figure 4).

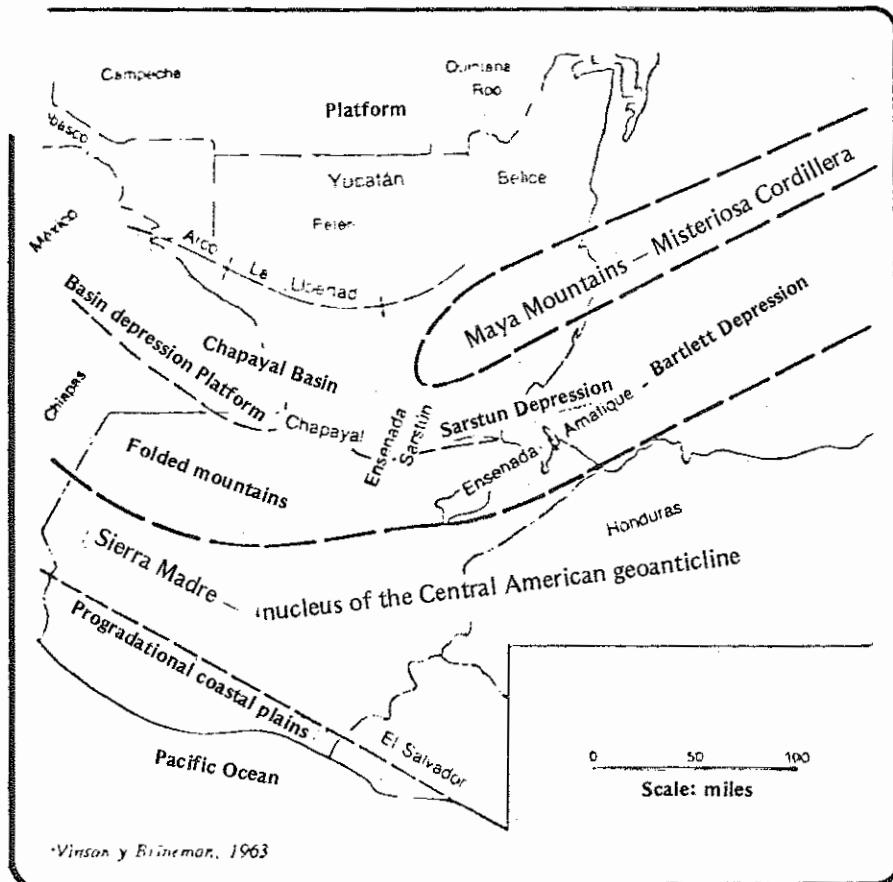
From a geological map of the Republic of Guatemala (Figure 5), it can be seen that the rocks are distributed uniformly in keeping with the nation's geological history: to the north, we have Tertiary and Quaternary deposits, with some Cretaceous outcrops; in the central mountainous

Figure 3



THE LITHOLOGICAL COLUMN AND MAJOR CROGENIC PERIODS OF NORTH AMERICA

Figure 4



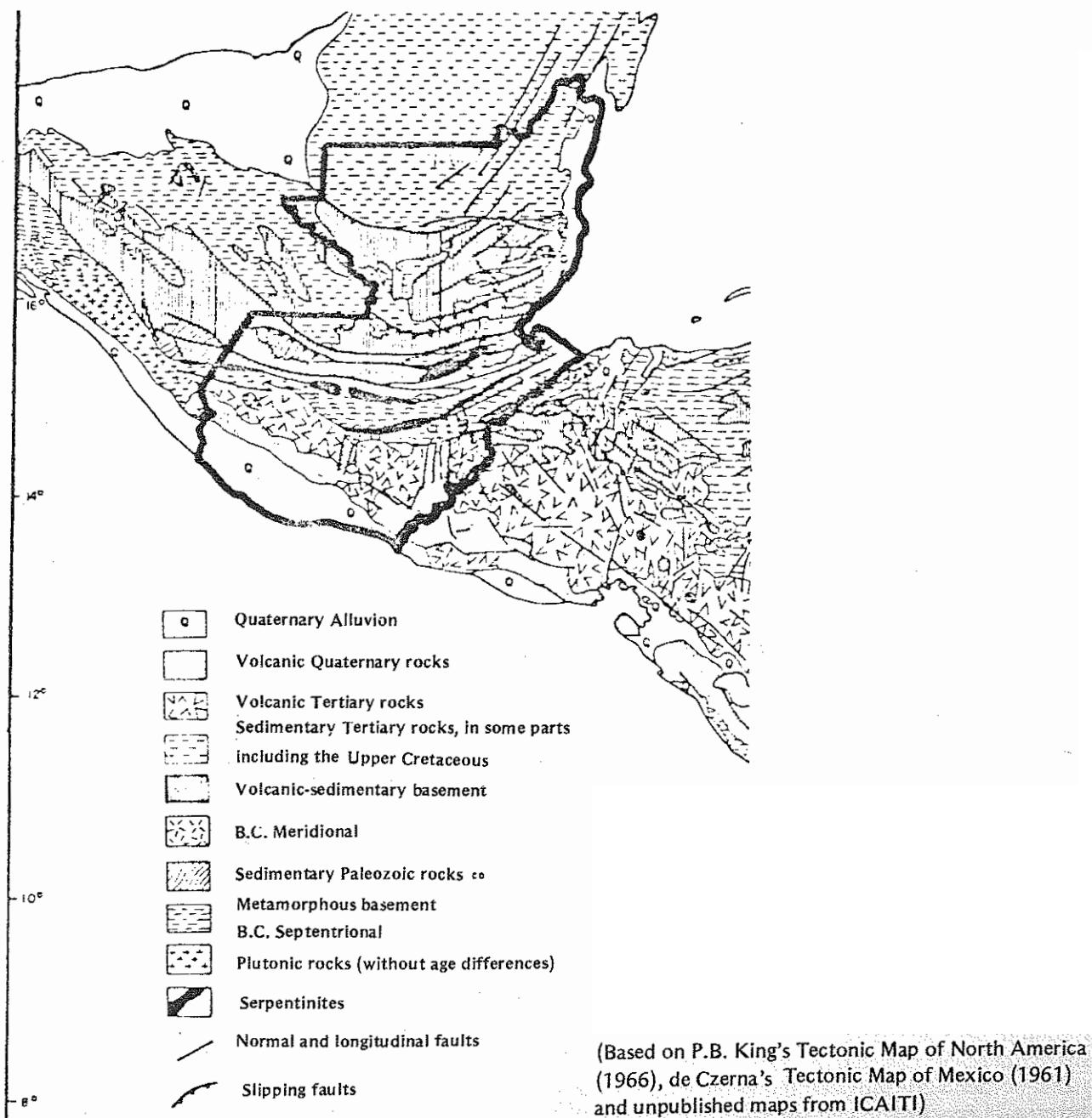
THE MOST IMPORTANT TECTONIC ELEMENTS OF GUATEMALA

areas and in the Mayas mountains, we find Paleozoic and other, even older rocks. Possibly south of this mountain arch and the faults which traverse the country, we find more recent Tertiary and Quaternary deposits derived from volcanic activity and the erosion of older rocks. Finally, south of the Pacific Ocean, there is a subduction zone which creates a deep offshore depression.(Fig. 5)

The Oil Potential of the Sedimentary Basins of Guatemala

There exist indispensable conditions for the generation of petroleum anywhere in the world and, subsequently, still other factors which are necessary to assure commercial accumulations

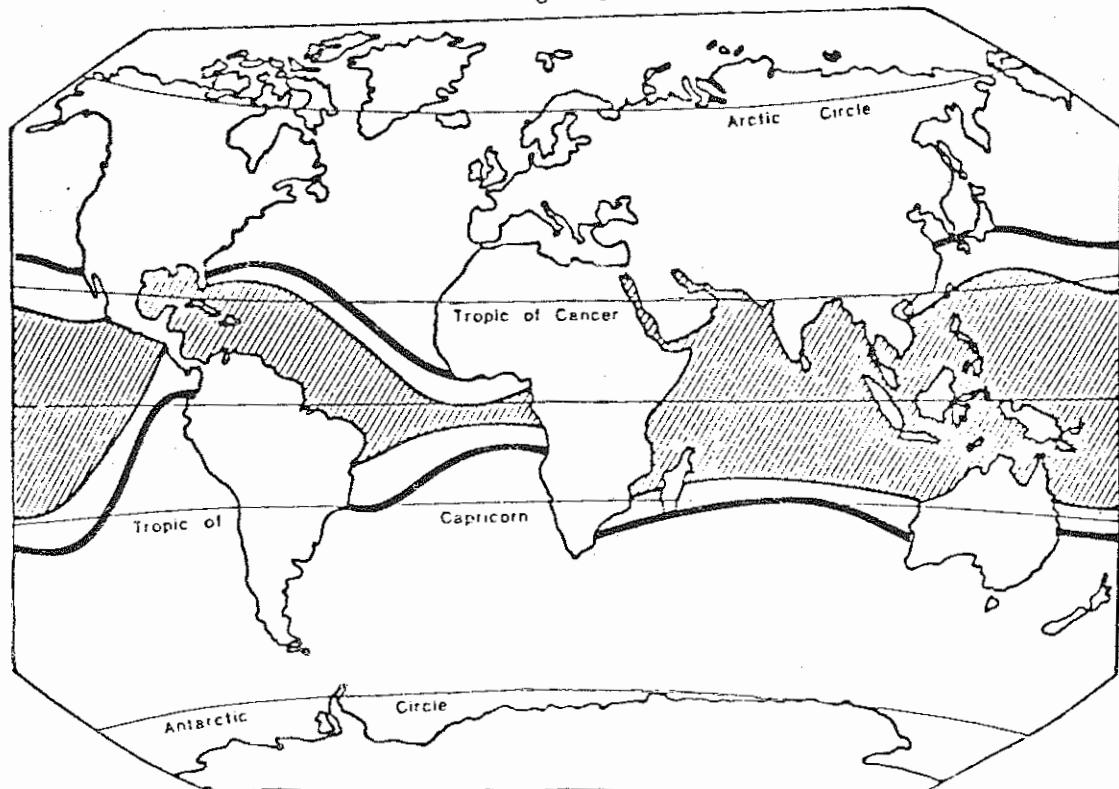
Figure 5



GEOLOGICAL MAP OF GUATEMALA



Figure 6



AREAS WITH GREATER ABUNDANCE OF CORAL REEFS AT PRESENT
(According to Schwarzbach, 1961)

be oil producers. Recently, scientific missions, studying the tectonics of the plates, found clathrates (gas). The ocean floor, in addition to its scientific value due to its notable thickness, would also lead us to believe that there could be hydrocarbons in deeper layers. Furthermore, there do exist other large, attractive structures that have already increased the potential of this area.

It should also be noted that in the center of the department of El Petén and to the west, along the border with Mexico, there are anticlinal structures; and encouraging information is available,

including evidence of petroleum in wells already drilled.

In general, the oil basins of Guatemala are quite attractive since discoveries have already been made and oil is currently being produced in commercial quantities. The petroleum industry of Guatemala is still in its infancy; and so, each well drilled has served to accumulate more and more information in an on-going learning process related to national subsurface areas.

The organic theory of oil generation tells us that the principal material from which oil derived was a large quantity of microscopic plants and small forms of animal life which arrived in the sea by means of rivers, along with mud and other sediments. Over time and by means of pressure, temperature and chemical reactions, these organic wastes were eventually transformed into hydrocarbons.

The area where petroleum or gas is formed or accumulated must have sufficient permeability so that migration can exist, to allow accumulations to develop in the impermeable traps.

During the generation of petroleum, it is necessary for the rock to be capable of retaining it until it has reached the necessary degree of maturity and has created the large quantities required for a commercial reservoir. Pressure, temperature, and permeability and porosity factors are indispensable conditions for these cases.

In Guatemala, in the Cobán C. Formation, all of these conditions were present, and it figures among the typical production areas of the Petén Basins. There, the Cobán Formation (Cretaceous), in its intermediate phase, with anhydrites intercalated among layers of dolomites and limestones, constitutes the area in which oil is currently being produced for oil fields in the Rubelsanto region.

Further along in the Jurassic, there are formations with a potential for producing hydrocarbons, as in the case of the Macal Formation (Upper Paleozoic) and the low levels of Todos Santos (Jurassic).

There are also characteristic environments which permit the formation of ideal reservoirs, the case of reefs being a good example. In Guatemala, down through the oil-generating eras and later on, there were latitudes that could have permitted the formation of such reservoirs, as

long as tectonism was also favorable. Figure 6 shows the distribution of coral reefs in our time. A coral reef needs temperatures that remain above 21°C, which theoretically limits them to areas falling between 30° latitude north and 30° latitude south. On the basis of models compiled by Habicht (1979), it can be seen (Figure 7) that Guatemala is included in this range, which makes it possible for coral reefs to be present in those areas whose geological conditions would allow them.

SEDIMENTARY BASINS

The sedimentary basins of Guatemala are:

- 1— Chapayal Basin and
- 2— Amatique Basin

and other points of interest are:

- 3— Yucatan Platform and
- 4— the Pacific area.

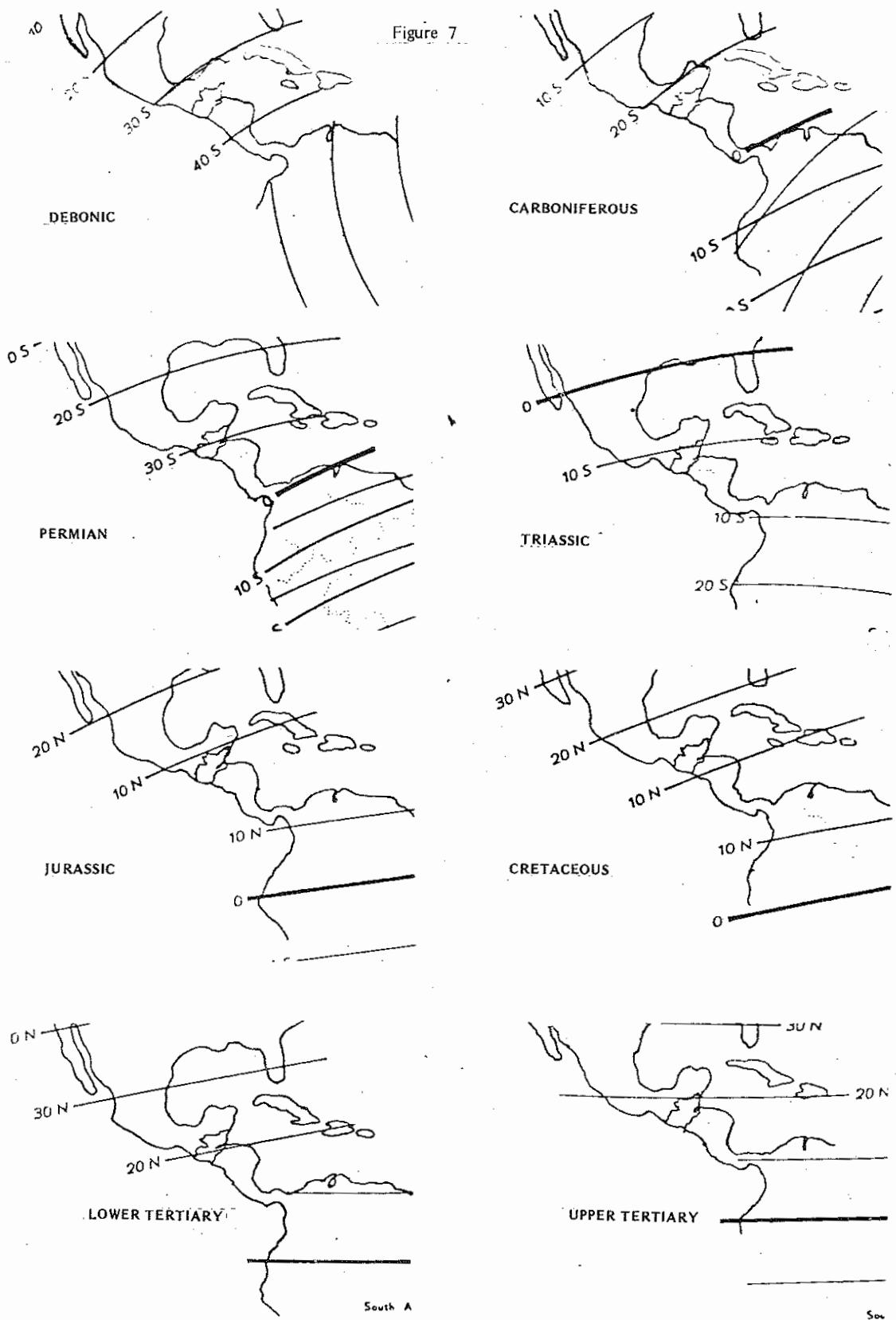
(See Figure 8.)

1— Chapayal Basin:

This basin of Mesozoic-Cenozoic origin produces commercial petroleum from the layers of the Cobán Formation, amounting to some 9,000 to 10,000 barrels per day with reserves of 31.46×10^6 barrels *in situ*. The type of trap control in this basin is a mixture of structural stress and compression, with the migration of salt layers from beneath, to create the typical assymetrical anticlines of this area where overlapping faults are so well known.

It is possible that the salt deposits created in Mexico during the Jurassic extended into Guatemala and gave rise to the structures that are charac-





CHANGE IN LATITUDES OVER TIME, ACCORDING TO MODELS COMPILED BY HABICHT, 1979

teristic of this basin, where the Rubelsanto and Tortugas wells are examples of the saline domes caused by the migration of the salt to higher layers in the search for stability, thus implying fracturing and secondary porosity in the carbonates.

In this basin we have approximately 40 to 50 structures. So far, approximately 45 wells have been drilled, most of which have had petroleum manifestations at different intervals. There are 10 production wells; 11 have been abandoned, 6 are apparently dry holes, 3 are water injection wells and the rest have either been plugged or abandoned for different reasons.

If we analyze the quantity of structures in this basin, their size and the number drilled, we realize that only a minimal part has been studied by means of direct drilling.

The probabilities of oil existing in this basin are quite high, and they increase every day, as we learn more about deposit processes in this area.

2 Amatique Basin:

In this basin, in the southeastern part of the country, there also existed hydrocarbon-generating rocks and favorable conditions. This area proves particularly interesting from the standpoint that reefs could have existed in the past, as well as several other favorable structures which have been only slightly drilled.

Only one well (El Manabique C.) has been drilled, and it went as far as the Permian layers, for a total depth of 4,230 meters. More than 2,096 meters below the Cobán Limestones (Lower to Middle Cretaceous) oil was discovered in fractures; but the well was never subjected to tests on the contents of the formation, due to technical problems, and it was finally abandoned.

According to Meyerhoff (1980), the well was poorly situated, to one side of the anticlinal crest. He is of the opinion that the Amatique Basin has good potential due to its location and characteristics.

3 Yucatan Platform:

In the Yucatan Platform we see a totally different environment from that observed farther south in the Chapayal. Here there is no change of relief and there are sabkha deposits with large amounts of evaporitic material and various sections with a greater, better developed primary porosity.

We also see supramarine media where more dolomitization usually occurs, resulting in greater secondary porosity. Thus it can be predicted that the reservoir rock sections are due to the degree of porosity developed and not to fracturing, as in the case of the Chapayal Basin.

Another interesting aspect of this area is the presence of extensive stratigraphic traps, since the area was not subject to as much structural stress.

Only six boreholes have been drilled in this area. One is an oil producer, with an approximate output of 3,000 barrels per day; the others showed petroleum manifestations at different intervals.

It is speculated that there are 15 to 20 small and medium-sized structures, in addition to larger regional structures covering hundreds of kilometers; but these have barely been studied.

4 Pacific Area

This is the least studied area of Guatemala given that Tertiary and Quaternary volcanic activity was intense. Nevertheless, farther south there are attractive offshore structures that could



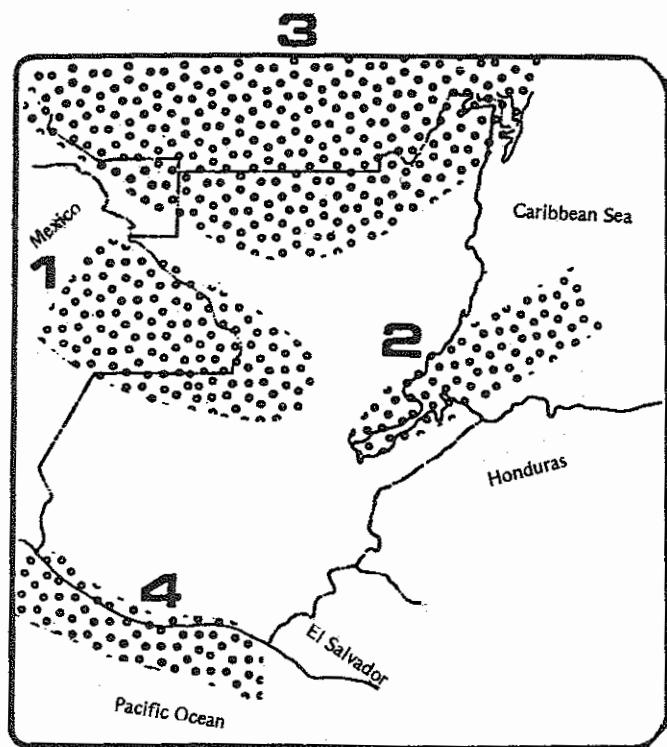


Figure 8
BASINS AND POTENTIAL OIL-BEARING AREAS
IN GUATEMALA

be oil producers. Recently, scientific missions, studying the tectonics of the plates, found clathrates (gas). The ocean floor, in addition to its scientific value due to its notable thickness, would also lead us to believe that there could be hydrocarbons in deeper layers. Furthermore, there do exist other large, attractive structures that have already increased the potential of this area.

It should also be noted that in the center of the department of El Petén and to the west, along the border with Mexico, there are anticlinal structures; and encouraging information is available, including evidence of petroleum in wells already drilled.

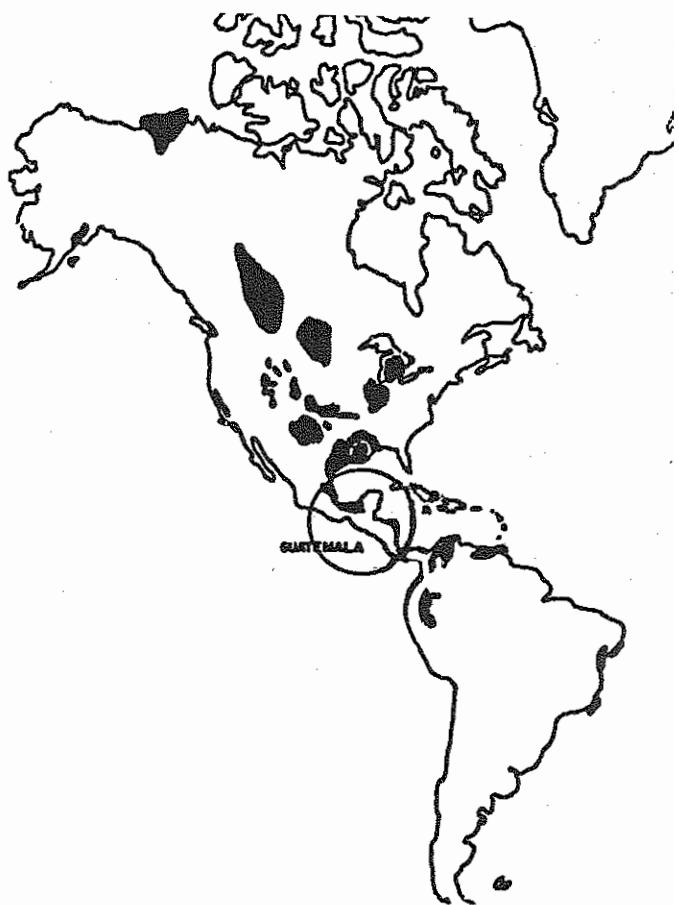


Figure 9
OIL-BEARING BASINS OF AMERICA

In general, the oil basins of Guatemala are quite attractive since discoveries have already been made and oil is currently being produced in commercial quantities. (Figure 9). The petroleum industry of Guatemala is still in its infancy; and so, each well drilled has served to accumulate more and more information in an on-going learning process relative to national subsurface areas.

The present document is the second of four successive parts.

WINDMILLS FOR PUMPING WATER

Part 2

CHAPTER 2 – DESIGN OF A HORIZONTAL-AXIS PUMPING SYSTEM

2.1 CALCULATING THE ROTOR

There are different blade arrangements, as can be observed in Figure 37. In this document, we only refer to the type made from a sheet of steel (letter "e" of the figure). However, in bibliographical references 2.5, 2.6, and 2.7, the reader will be able to find information on windmills built with a Crete-type rotor (letter "a" of the figure), which presents a simple geometry and has interesting technical characteristics that make it especially attractive for irrigation applications.

2.1.1 Rotor Geometry

When the blade of a wind pump is under the effect of an air current, it is put under stress. If we take one part of the blade, this stress can be broken down into the relative wind direction and the direction perpendicular to that, as shown in Figure 38.

The components of relative (d_D) and perpendicular (d_L) directions to that of the wind can be expressed by the following mathematical relations:

$$d_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 d A \quad (2-1)$$

$$d_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 d A \quad (2-2)$$

Where:

d_L = lift, N

d_D = drag, N

ρ = air density (specific gravity) (1.23 kg/m³ *)

C_L = lift coefficient (dimensionless)

C_D = drag coefficient (dimensionless)

d_A = element area (chord' x differential blade length)

V_∞ = wind velocity (m/s)

* The density of the air at sea level is more or less 1.23 kg/m³. For every one thousand meters of altitude, it is reduced by some 10 o/o. Thus, at 4000 meters above sea level, it is 0.8 kg/m³.

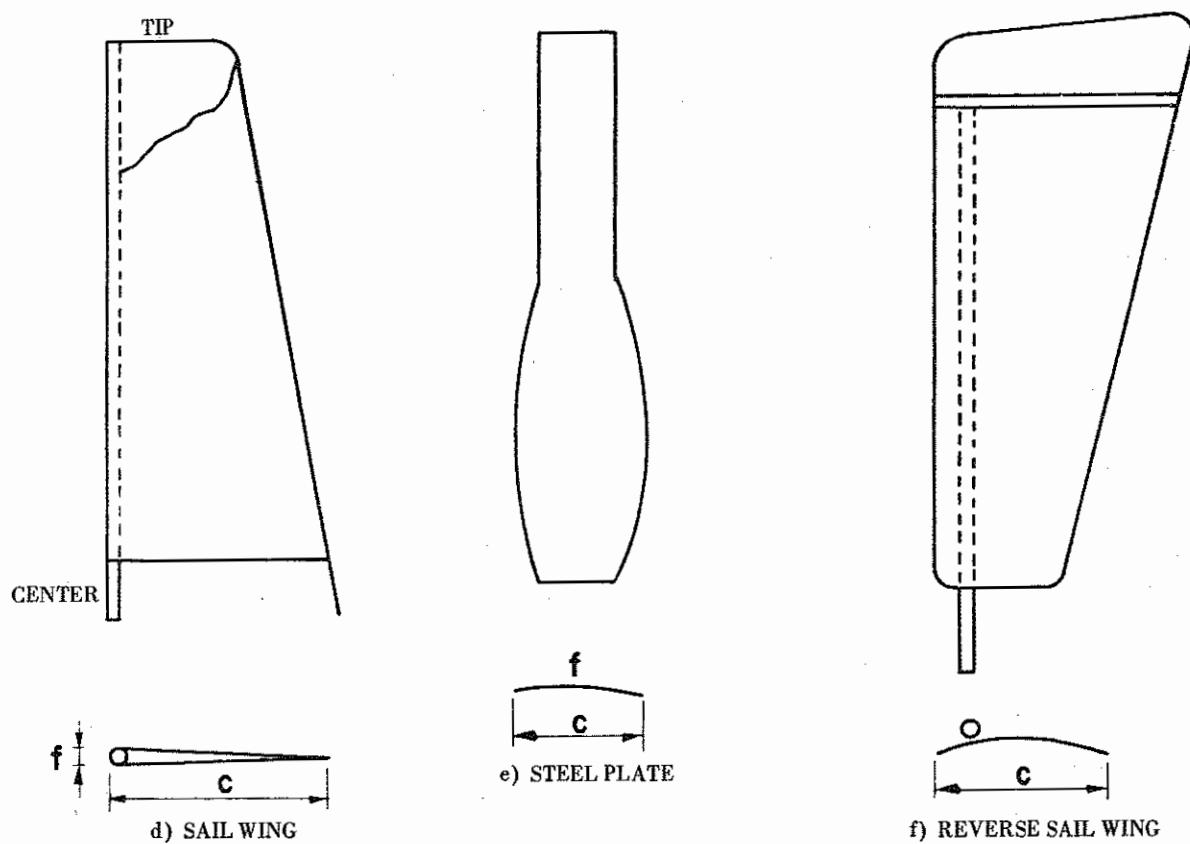
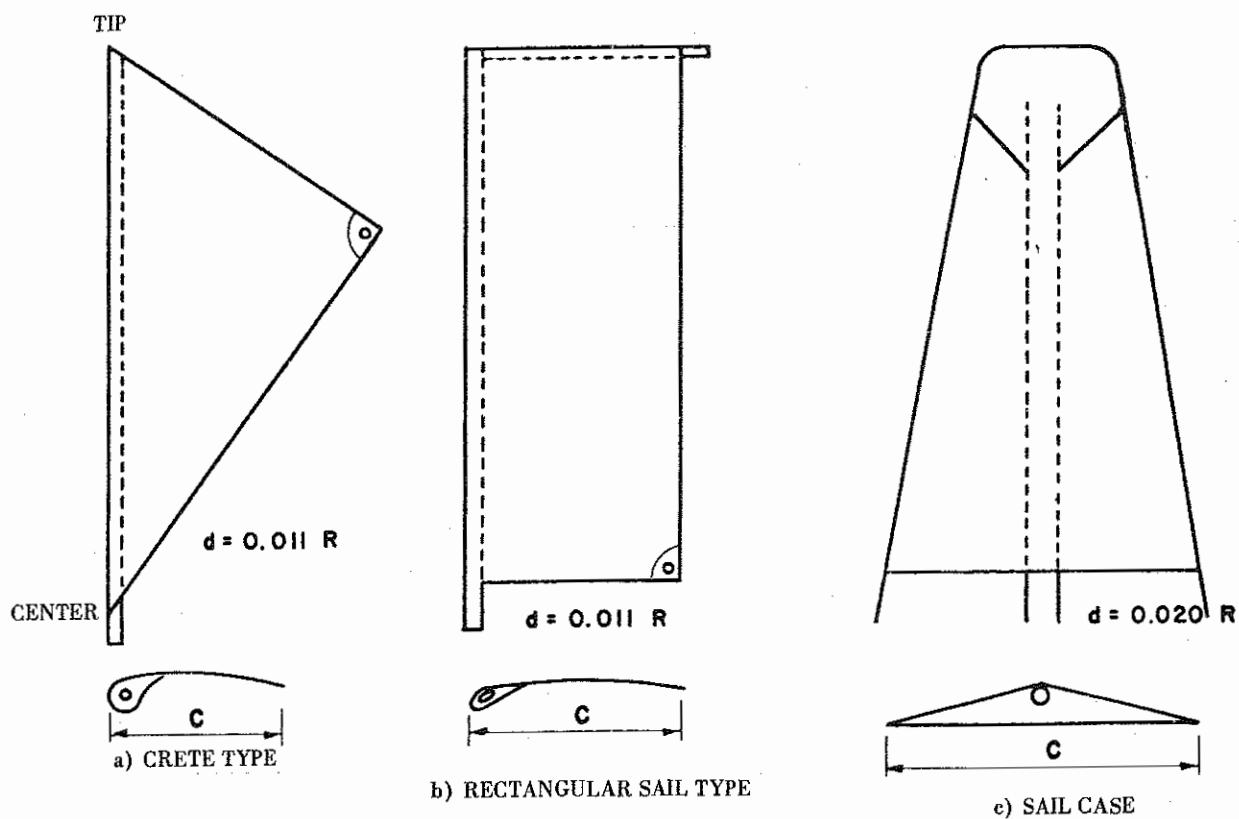


Figure 37 – Some Types of Blade Geometry

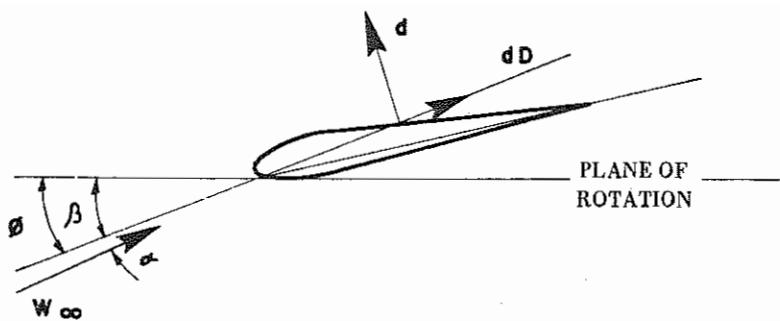


Figure 38 – Effect of the Wind on Part of a Blade

By applying the theory of momentum and the equation for energy to the blade element and by integrating along the length of the blade, it can be demonstrated that in order to achieve a maximum transformation of the air's kinetic energy into mechanical energy for the blade, the latter should have a torsion that would permit 1) an angle ϕ of the relative wind given in Figure 39 and 2) a chord length that can adjust itself to the function ψ (see Figure 40), expressed as follows:

$$\psi = \frac{N.C.C_D.W}{2 V_d} \quad (2-3)$$

Where:

N = number of blades
 C = chord length (see Figure 37) (m)
 C_D = drag coefficient (dimensionless)
 W = angular speed of the rotor (rpm)
 V_d = design velocity (m/s)

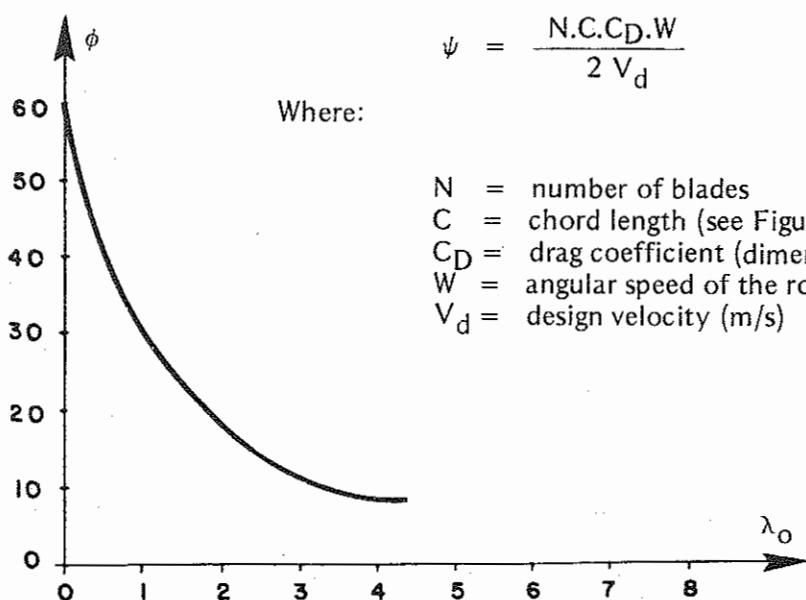


Figure 39 – Variation in the Optimal Angle for Relative Velocity (ϕ) with the Tip Speed Ratio (λ_0)

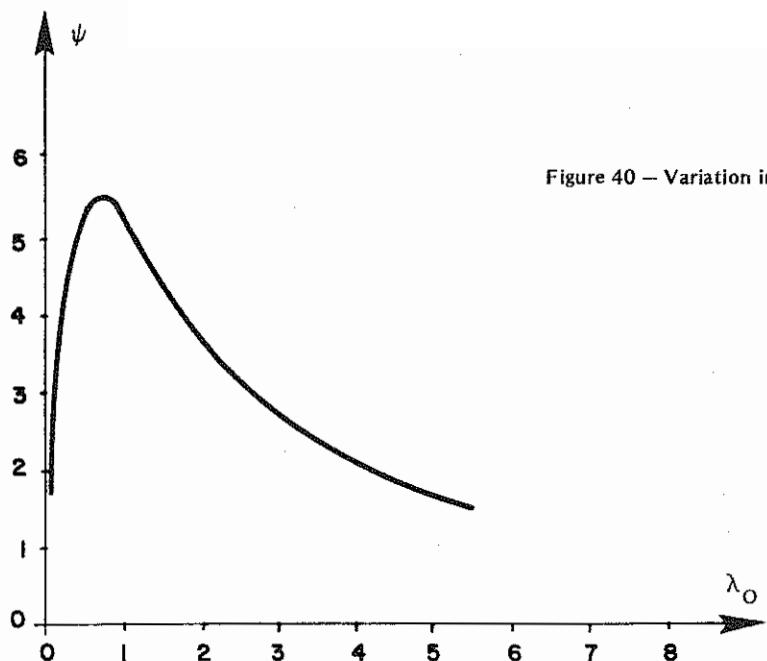


Figure 40 – Variation in the Function ψ with the Tip Speed Ratio (λ_0)

From Figure 39 it can be deduced that the blade is very open at its base and that this angle diminishes as we approach the tip, since according to Figure 38:

$$\beta = \phi - \alpha \quad (2-4)$$

Where:

- β = blade angle
- ϕ = angle of relative velocity
- α = angle of profile attack

In Equation 2-4, $\alpha = \text{cte}$ is taken for the most minimal (C_D/C_L) ratio.

From Figure 40 it can be deduced that the chord length increases up to a certain maximum, near $\lambda_0 = 1$, and then diminishes towards its end.

For the rotor in question, we will consider that curved metal plates, with a section such as that appearing in Figure 41, will be used for reasons of construction and cost.

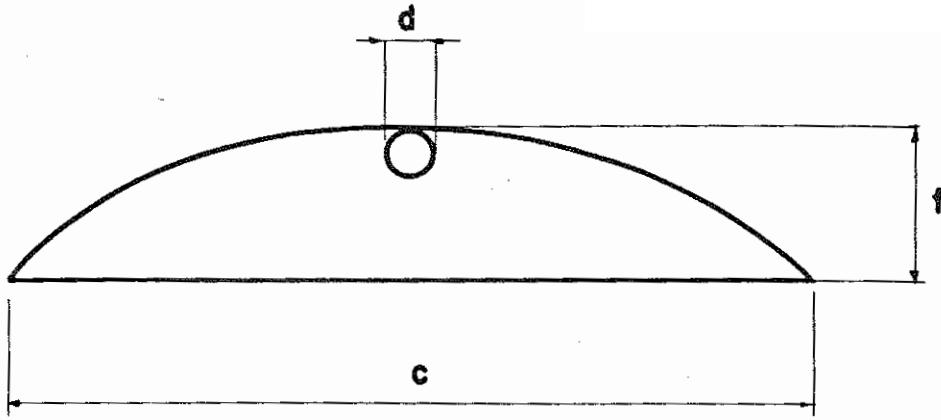


Figure 41 – Blade Section To Be Dimensioned

For the section shown in Figure 41, $(C_D/C_L) = 0.05$ and $C_L = 1.1$, for $f/c = 0.1$.

If we choose a moderate λ_O value, for example $\lambda_O = 2$, for $W = 35$ rpm, we will obtain a (C_D/C_L) value equal to 0.05.

The number of blades to be selected as a function of the market availabilities is $N = 12$, with which a good utilization can be accomplished since the available dimensions are for plates 1.0×2.0 m.

Bearing in mind these considerations and doing the calculations indicated in Table 13, we can establish the optimal blade geometry.

**TABLE 13
OPTIMAL BLADE GEOMETRY**

λ_O	r (m)	ϕ (°)	β (°)	ψ	C (m)
0.1	.125	56.2	52.2	.17715	.1035
0.2	.250	52.4	48.4	.31128	.1819
0.4	.500	45.5	41.5	.47730	.2789
0.6	.750	39.4	35.4	.54406	.3179
0.8	1.000	34.5	30.5	.55430	.3239
1.0	1.250	30.5	26.5	.53657	.3135
1.2	1.500	28.0	24.0	.5000	.2922
1.4	1.750	23.5	19.5	.4600	.2688
1.5	1.875	22.5	18.5	.45568	.2663
1.8	2.250	19.0	15.0	.4000	.2337
2.0	2.500	17.8	13.8	.38072	.2224



Since 75 o/o of the power output is obtained from the outer half of the blade and the efficiency at the blade tip is quite low (1), for construction purposes the blade can be aligned with a geometry and torsion between $0.5R$ and $9.9R$. We present in Table 14 the results of such calculation for the case dealt with herein.

**TABLE 14
BLADE ALIGNMENT**

r (m)	C (m)	β ($^{\circ}$)
0.505	.2789	25.06
0.985	.3379	29.88
1.250	.3146	26.49
1.500	.2949	23.62
2.500	.2160	12.12

2.1.2 Calculating the Support

If we choose a post-type joint to connect the blade with the hub (See Figure 42), we see that during the rotor operation two types of forces appear: one from the wind (F_A), which tries to bend the brace; and another, the centripetal (F_C), which tries to pull the support out of the hub (assuming a perfect union between the blade and support). Another force acts on the plane of rotation (which produces the torque).

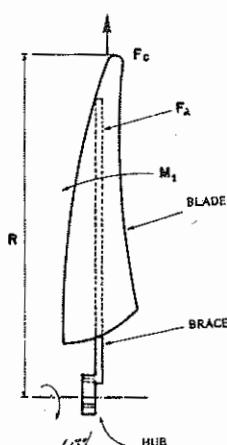


Figure 42 – Scheme of the Forces Acting on a Blade



Considering the force of the wind applied at the blade tip and the centrifugal force applied to half of the radius, we have the following loads:

$$M_f = C_A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_f^2 \cdot A \cdot R. \quad (2-5)$$

$$F_c = \frac{m U^2}{(R/2)} \quad (2-6)$$

$$M_t = \frac{P_v}{N.W} \quad (2-7)$$

Where:

- M_f = momentum of the aerodynamic force (N-m)
- C_A = axial force coefficient
- ρ = air density (kg/m^3)
- V_f = cut-out speed (at this velocity, the equipment ceases to work) (m/s)
- A = area swept by the rotor (m^2)
- R = radius of the rotor (m)
- F_c = centripetal force (N)
- m = blade mass (kg)
- U = tangential blade speed, at $R/2$ from the center of rotation
- M_t = contribution of 1 blade to total torque

Combined torque (M_i) is defined as follows:

$$M_i = 0.35 M_f + 0.65 \sqrt{M_f^2 + M_t^2} \quad (2-8)$$

Thus, the support diameter is obtained from the following expression:

$$d = \sqrt[3]{\frac{1000 M_i}{\sigma_p}} \quad (2-9)$$

where:

$$\sigma_p = \text{permissible stress } (\text{kg}/\text{cm}^2)$$

2.2 CALCULATING TRANSMISSION

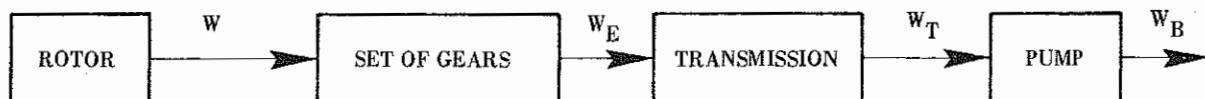
By means of this mechanism, power is carried from the rotor to the pump.



2.2.1 Types of Transmission

2.2.1.1 Indirect Transmission

There is a reduction in velocity and then the circular movement is changed into an alternating one by means of a set of planetary gears, according to the scheme shown in Figure 43.



W = angular speed of rotor

W_E = angular speed of gears

W_T = transmission velocity

W_B = pump velocity

With:

$$W_B = W_T = W_E = W_r,$$

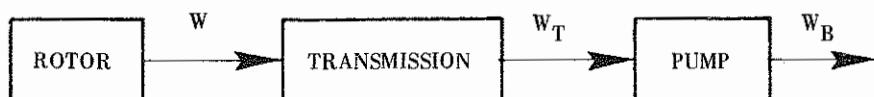
Where:

$$r' - \text{reduction factor} \quad (2 \cdot 10)$$

Figure 43 — Scheme for Indirect Transmission

2.2.1.2 Direct Transmission

In this case, the transmission will follow the scheme shown in Figure 44.



With:

$$W = W_T = W_B \quad (2 \cdot 11)$$

Figure 44 -- Scheme for Direct Transmission

2.2.2 Selection of the Type of Transmission

To select the type of transmission to be used, the celerity λ_0 and the rotor diameter D must be kept in mind.

In Figure 45, the angular speed (W) has been graphed as a function of the rotor diameter for $\lambda_0 = 1$ and $\lambda_0 = 2$, based on the figures that appear in Tables 15 and 16.

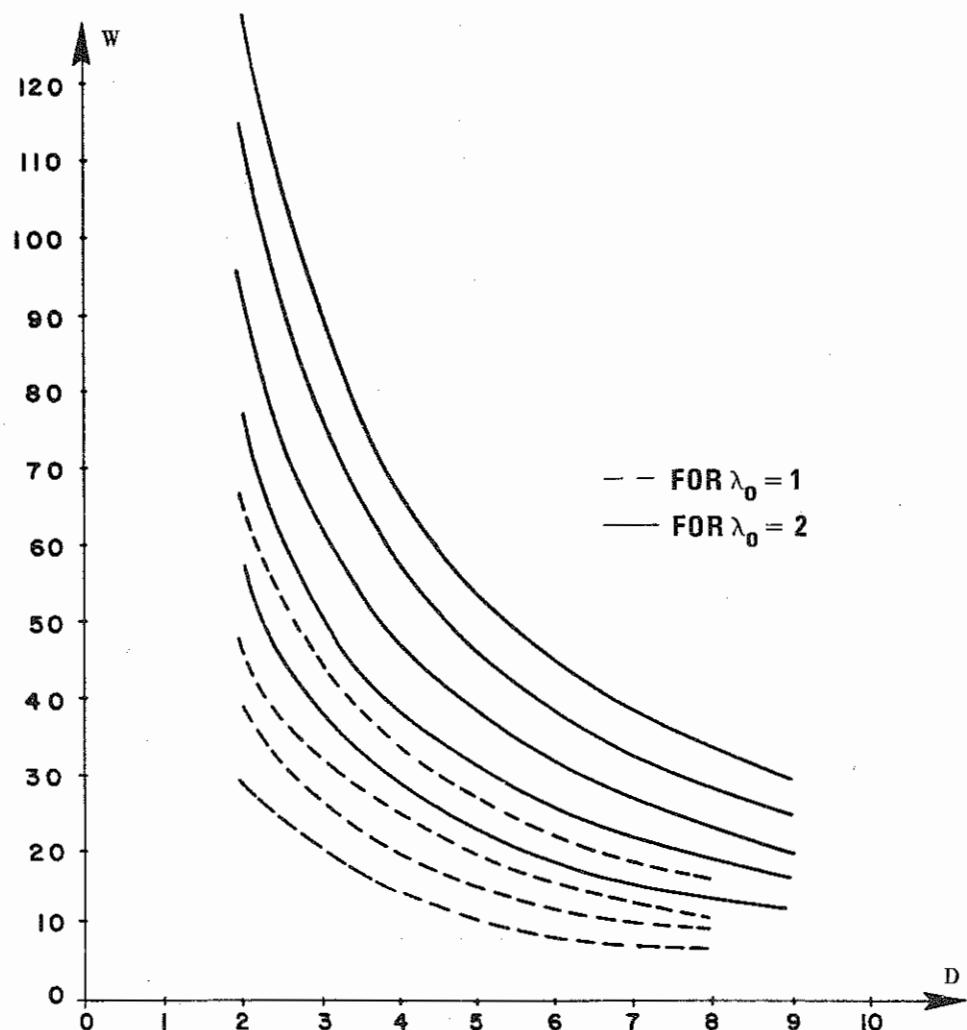


Figure 45 — Variation in the Rotor's Angular Speed as a Function of Its Diameter

In Figure 46, the variations in celerity (λ_0) are indicated as a function of the rotor diameter (D) for different angular speed values (W).

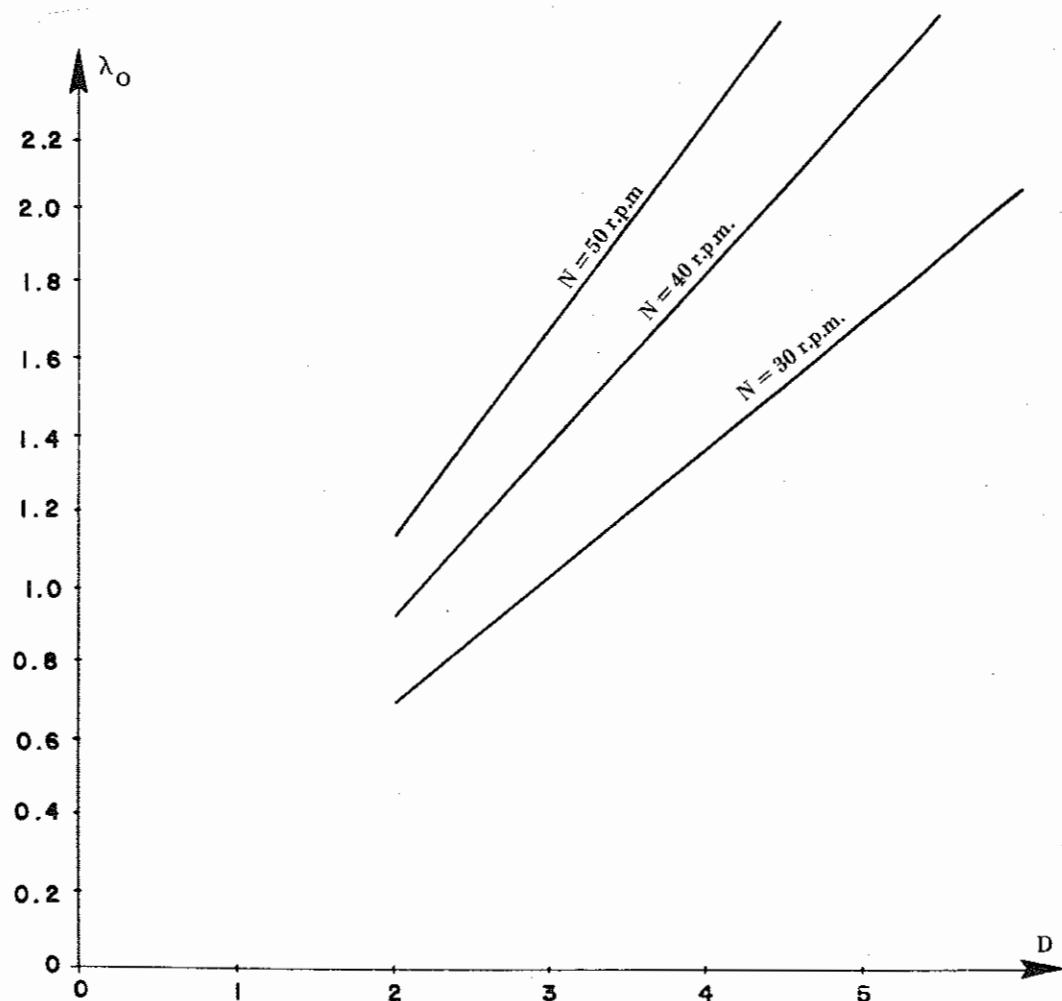


Figure 46 – Variation in Celerity λ_0 as a Function of Rotor Diameter and RPM

TABLE 15
ANGULAR SPEED VALUES (W) (RPM) FOR $\lambda_0 = 1$

D (m) \ V (m/s)	3	4	5	6	7
2	28.64	38.19	47.74	57.29	66.84
3	19.09	25.46	31.83	38.19	44.56
4	14.32	19.09	23.87	28.64	33.42
5	11.45	15.27	19.09	22.91	26.73
6	9.54	12.73	15.91	19.09	22.28
7	8.18	10.91	13.64	16.37	19.09
8	7.16	9.54	11.93	14.32	16.71
9	6.36	8.48	10.61	12.73	14.85
10	5.72	7.63	9.54	11.45	13.36

TABLE 16
ANGULAR SPEED VALUES (W) (RPM) FOR $\lambda_0 = 2$

D (m) \ V (m/s)	3	4	5	6	7
2	57.28	76.38	95.48	114.58	133.68
3	38.18	50.92	63.66	76.38	89.12
4	28.64	38.19	47.74	57.28	66.84
5	22.90	30.54	38.18	45.82	53.46
6	19.08	25.46	31.82	38.19	44.56
7	16.36	21.82	27.28	32.74	38.18
8	14.32	19.09	23.86	28.64	33.41
9	12.72	16.96	21.22	25.43	29.70
10	11.44	15.26	19.08	22.90	26.72

Based on experience, a wind energy system functions well between 30 and 35 rpm. If we want a rotor with a moderate λ_0 (between 1 and 2), we have the option of varying the celerity and deciding in which case it is necessary to reduce or multiply the angular speed so that the system will function under optimal conditions.



2.2.3 The Rod-Crank Mechanism

The rod-crank mechanism is an option to be utilized in transmission in those cases where it can avoid the use of an expensive indirect transmission system.

Bibliographical reference 2.8 can be consulted for more precise calculations of the dynamics of the rod-crank system, and the vibrations that come into play.

2.2.3.1 Optimal r/l Ratio

The best relation between the crank radius (r) and the length of the rod (L) is calculated on the basis of the power (P) and torque (Q) equations:

$$P = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot W \left(\sin \alpha + \frac{a}{2} \sin 2\alpha \right) \quad (2-12)$$

$$Q = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot r \left(\sin \alpha + \frac{a}{2} \sin 2\alpha \right) \quad (2-13)$$

where:

ρ_w	=	water density (kg/m^3)
g	=	acceleration of gravity (9.81 m/s)
H	=	pumping height (m)
A_p	=	piston area (m^2)
W	=	angular speed (rad/s)
a	=	$\frac{r}{L}$ (dimensionless)
α	=	angle of blade attack

With $f(2) = (\sin \alpha + \frac{2}{2} \sin 2\alpha)$, Equations 2-12 and 2-13 can be re-written as follows:

$$P = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot W \cdot f(a) \quad (2-14)$$

$$Q = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot r \cdot f(a) \quad (2-15)$$

The power (P) and torque (Q) will be maximum when $f(2)$ is maximum.

In Table 17, the value of the function $f(a)$ has been calculated for various values of the r/L relation. Figure 47 has been drawn on the basis of these data, and it can be observed that interesting values of "a" are found between 0.2 and 0.4, with 0.5 considered as the limit. These figures correspond to $f(a)$ between 1.02 and 1.06.

TABLE 17
VALUES FOR $f(a)$

a	α	β	$f(a)$
.10	84.17	5.71	1.0049
.20	79.27	11.33	1.019
.25	77.01	14.10	1.029
.30	74.95	16.84	1.040
.40	71.41	22.28	1.060
.50	68.55	27.73	1.101
.60	66.16	33.29	1.130
.80	62.57	45.24	1.210
1.0	60.00	60.00	1.290
1.2	58.10		1.380

These values for $f(a)$, in addition to setting the optimal values for the r/L relation, will serve to define diameter values for the turntable throat.

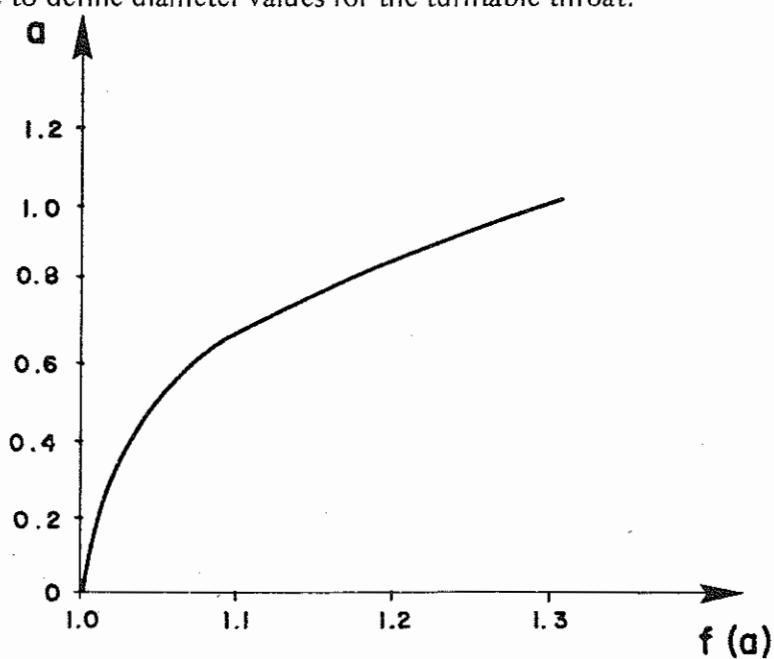


Figure 47 — Graph of "a" as a Function of $f(a)$

2.2.3.2 Calculating the rod section

If we consider the rod to be a thin column subject to compression, in calculating the rod section, we can use the following expressions:

$$f \cdot P_c = n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I / L^2 \quad (2-16)$$

$$P_c = 0.15 F^{(*)} \quad (2-17)$$

where:

f = safety factor (up to 20 for unsafe conditions, according to Hütte, bibliog. 2.14)

P_c = compressive stress on the rod

F = tractional force on the rod

E = elasticity modulus (2.1×10^6 kg/m² for steel).

I = moment of inertia

L = rod length

n = load distribution factor ($n = 1$ for a uniformly distributed load)

* For the purposes of calculation, the compressive stress is considered to be 15 o/o of the tractional force.

Figure 48 provides a diagram for the forces acting on the rod.

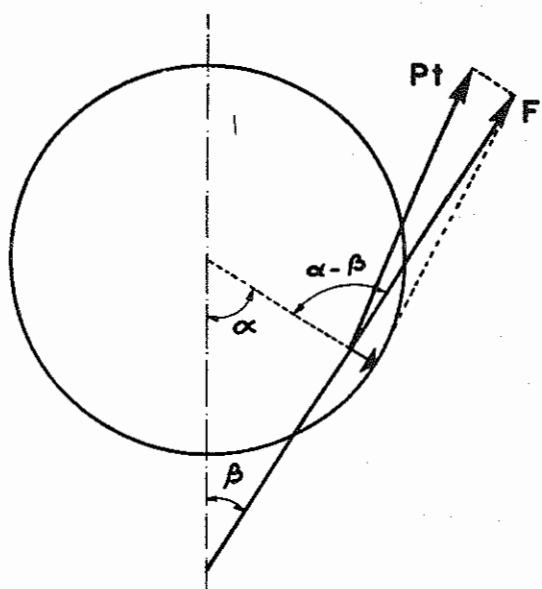


Figure 48 — Diagram of the Forces that Act on the Rod



As can be ascertained from Figure 48, F is the component of F_t that produces the maximum torque, in other words:

$$F_t = \frac{\text{MAXIMUM TORQUE}}{r} = \frac{Q_{\max}}{r} \quad (2-18)$$

and $F = \frac{F_t}{\sin(\alpha + \beta)}$ (2-19)

Substituting Equation (2-15) in (2-18), we have:

$$F_t = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max} \quad (2-20)$$

Then, substituting (2-20) in (2-19):

$$F = \frac{\rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max}}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2-21)$$

Now, replacing (2-21) in (2-17):

$$P_c = 0.15 \cdot \frac{\rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max}}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2-22)$$

With the value of P_c found in Expression (2-22), we go back to Equation (2-16) to calculate the length (diameter) of the rod:

$$f \cdot \frac{0.15 \rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max}}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (2-23)$$

The value for the rod diameter L can be obtained from the foregoing expression.

2.2.3.3 Calculating the pitman section

The pitman is a very thin element, for which reason it is necessary to establish intermediate guides. (See Figure 49).

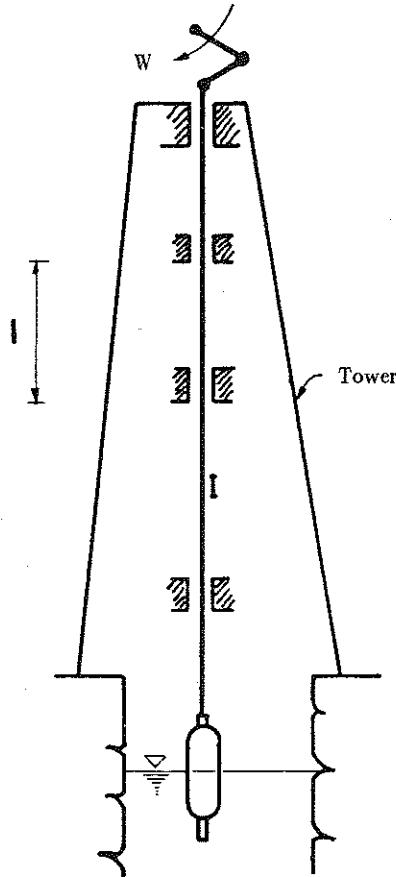


Figure 49 – Calculating the Pitman Section

The force acting on the pitman is a tractional force (F_y), given by:

$$F_y = F \cdot \cos \beta \quad (2-24)$$

Replacing (2-21) in (2-24):

$$F_y = \frac{\rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max} \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2-25)$$

Considering the compressive stress as 15 o/o of the tractional force, we have:

$$P_c = 0.15 F_y = 0.15 \frac{\rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max} \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2-26)$$

Now, using Expression (2-16) for a length (l) between the pitman guides and replacing therein the P_c value found in (2-26), we obtain:

$$f \cdot \frac{0.15 \cdot \rho_w \cdot g \cdot H \cdot A_p \cdot f(a)_{\max} \cdot \cos \beta}{(\sin \alpha + \beta)} = \frac{W \cdot \pi^2 \cdot E \cdot l}{l^2} \quad (2-27)$$

Then, solving Equation (2-27), the value for l can be found for a given section (bar or tube), when we use a material with a known characteristic E , and $f = 10$, as illustrated below:

Table 18 and 19 have been elaborated considering the possibilities for using smooth iron or standard piping.

TABLE 18
DIFFERENT DIAMETERS (d) OF SMOOTH STEEL APT FOR USE IN A PITMAN
WITH GUIDES HAVING A LENGTH l

<i>l</i> (m)	0.5	1.0	1.5	2	2.5	3.0
d (cm)	1.4	1.6	1.85	1.98	2.10	2.20
weight (kg/m)	4.21	1.57	2.11	2.41	2.72	2.98

TABLE 19
DIFFERENT DIAMETERS (d) OF STANDARD PIPING APT FOR USE
IN A PITMAN WITH GUIDES HAVING A LENGTH l

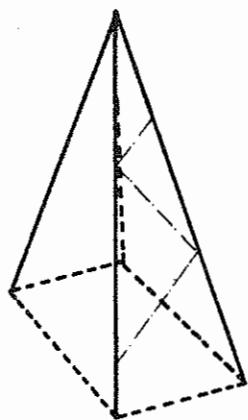
d (in)	1/2	3/4	1
<i>l</i> (m)	1.30	1.92	2.74
weight (kg/m)	1.27	1.68	2.49

From Tables 18 and 19, the pitman diameter (d) can be obtained as a function of the length between guides (*l*).

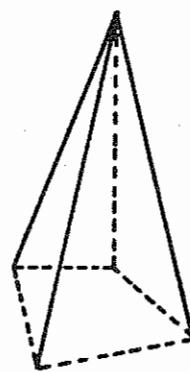
2.3 CALCULATING THE TOWER

As can be appreciated from Figure 50, there are a variety of types of towers, each one of which has a range of typical applications, as a function of their respective advantages and disadvantages. In this section, we will only deal with types "a" and "b"

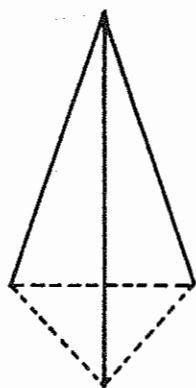




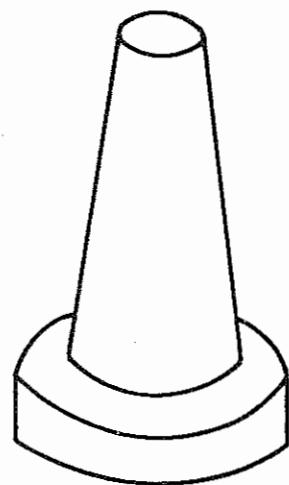
a) FOUR-LEGGED TOWER



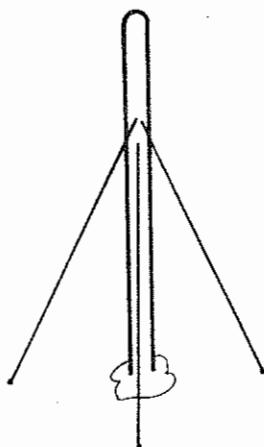
b) FOUR-LEGGED TOWER WITH TUBE



c) TRIPOD-TYPE TOWER



d) BRICK TOWER



e) MAST-TYPE TOWER
WITH GUY WIRES

Figure 50 — Typical Kinds of Towers

2.3.1 Tower Height

When no obstructions exist, this test can be defined as a function of the wind velocity distribution with height. In general, this distribution is given by the following expression:

$$\frac{V_h}{V_o} = \left(\frac{h}{h_o} \right)^k \quad (2-28)$$

Where:

- V_h = wind velocity at a height h
- V_o = wind velocity at a height h_o
- h = height
- h_o = reference height
- k = exponent, whose value is:
 - $k = 1/2$ for $V_o = \text{km/hr}$
 - $k = 1/5$ for $8 < V_o < 56 \text{ km/hr}$
 - $k = 1/7$ for $V_o > 56 \text{ km/hr}$

Figure 51 illustrates Expression (2-28).

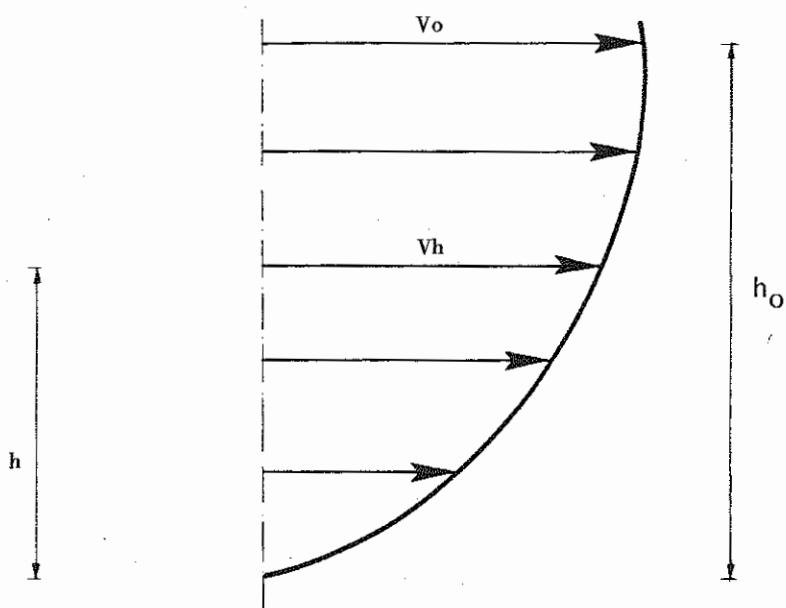


Figure 51 — Variations in Speed as a function of Height

2.3.2 Calculating the Distance between Legs

2.3.2.1 Analysis of normal conditions

Taking as a reference a trio-orthogonal system, we can define the forces that act on the tower, as illustrated in Figure 52.

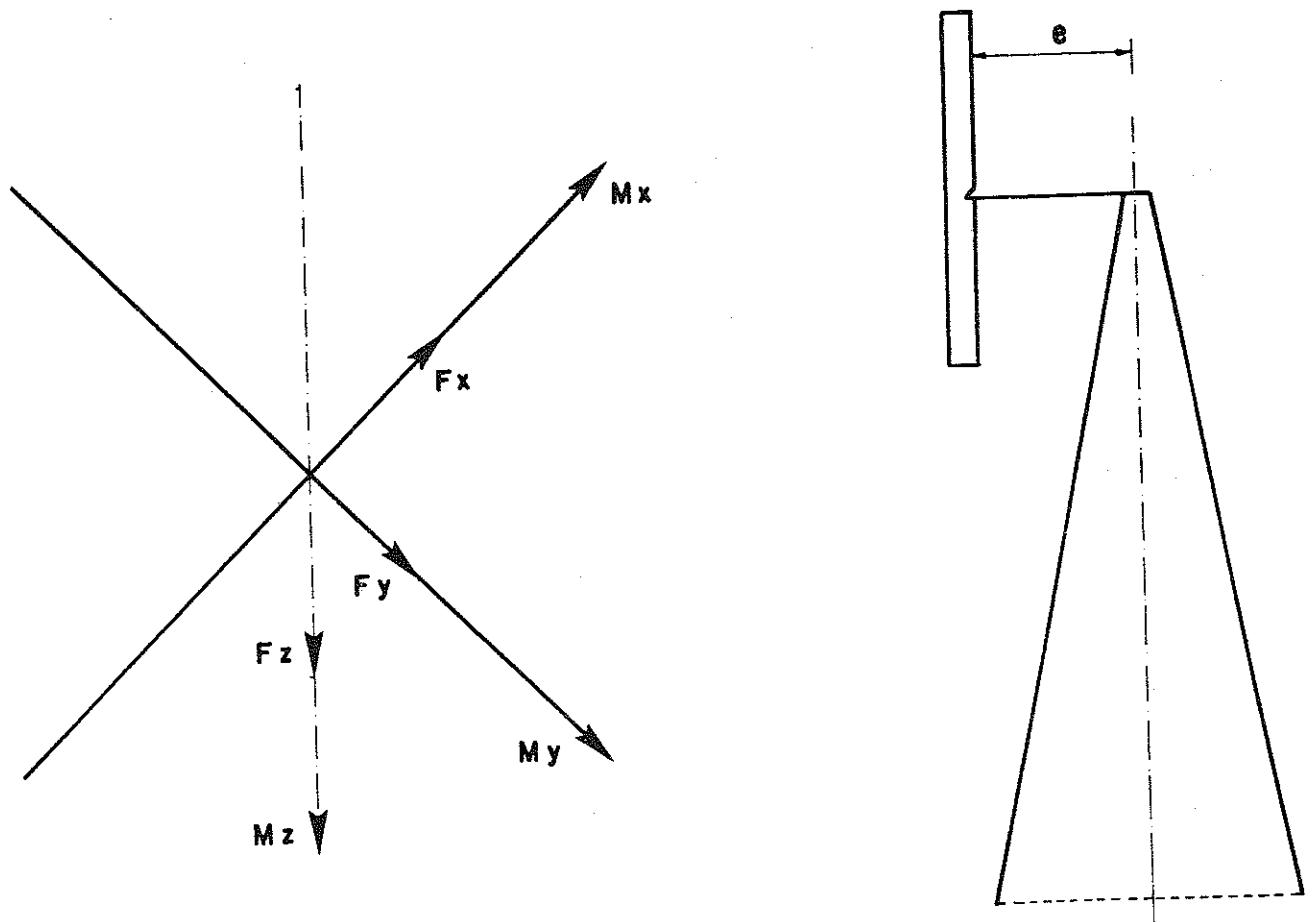


Figure 52 – Scheme for the Forces Acting on the Tower

2.3.2.1.1 Forces

- Forces in the direction X: F_x (See Figure 53)

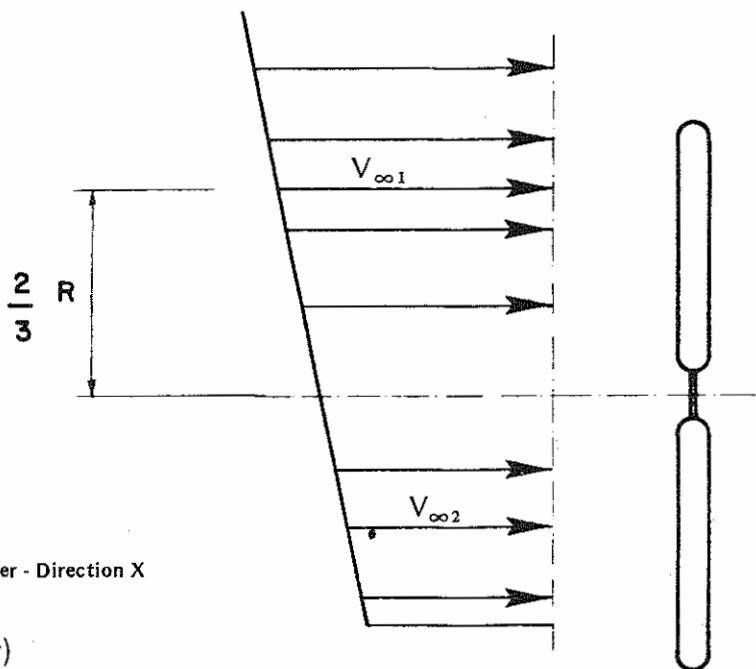


Figure 53 — Forces Acting on the Tower - Direction X

- drag (ideal rotor)

$$F_{1X} = \frac{4}{9} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot \pi \cdot R^2$$

- fluctuating drag (due to the non-uniform wind distribution)

$$F_{2X} = \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{N} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot (V_1 - V_2)^2$$

- gyroscopic force in direction X

$$F_{3X} = -C \cdot W \cdot m_t$$

where:

- N = number of blades
- ρ = air density
- V = wind velocity
- R = rotor radius
- e = distance from the rotor to the vertical axis
- C = chord length
- W = angular speed of the rotor
- m_t = total mass in rotation

b. Forces in direction Y: F_Y

- force due to the variation in wind velocity (See Figure 54)

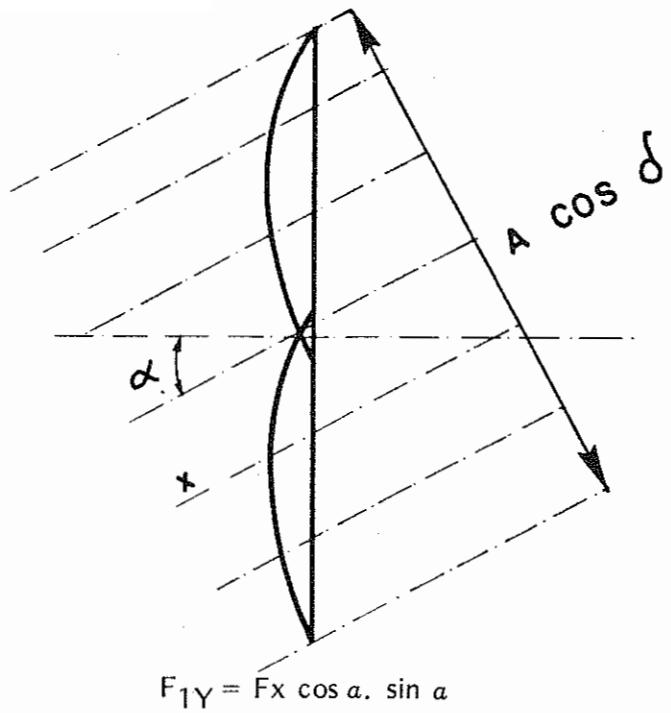


Figure 54 – Forces Acting on the Tower - Direction Y (I)

- force due to the imbalance produced by the rotor
(See Figure 55)

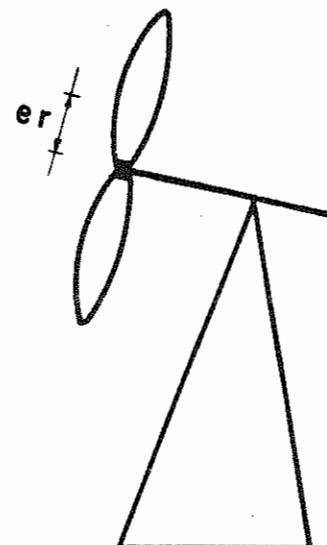
c. Forces from direction Z: F_Z

- forces due to the rotor mass (m)
 $F_{1Z} = m \cdot g$

$(g = \text{acceleration of gravity})$

- forces due to rotor imbalance (see Figure 55).
 $F_{az} = \pm m_t \cdot e_r \cdot W^2$

$(e_r = \text{rotor eccentricity})$



$$F_{2Y} = \pm m \cdot e_r \cdot w^2$$

Figure 55 – Forces Acting on the Tower - Direction Y (II)

2.3.2.1.2 Momentum

a. Momentum in direction X: M_X

- momentum due to torque

$$M_X = \frac{8}{28} \cdot \frac{V_\infty^2 \cdot \pi \cdot R^3}{\lambda_{od}}$$

λ_{od} = design celerity

b. Momentum in direction Y: M_Y

- momentum due to the non-uniform wind distribution non-uniform

$$M_{1Y} = \frac{8}{27} \cdot \frac{\rho}{N} \cdot \pi \cdot R^3 (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{quasi-static})$$

$$M_{2Y} = \frac{4}{27} \cdot \frac{\rho}{N} \cdot \pi \cdot R^3 (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{fluctuating})$$

- momentum due to gravity

$$M_{3Y} = m \cdot g \cdot e$$

- momentum due to gyroscopic forces

$$M_{4Y} = -W^2 \cdot I$$

I = momentum due to rotor inertia

c. Momentum in direction Z: M_Z

- momentum due to friction

$$M_Z = \frac{m_y}{2} \cdot f_w \cdot \frac{4}{9} \cdot V_\infty^2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot e_r \cdot \sin \alpha$$

f_w = friction coefficient for around the rotor axis

m_y = rotor mass in direction y



2.3.2.2 Analysis of stress under storm conditions

a. Drag

$$F_x = C_t \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \right) \cdot A_{\text{proj}} .$$

C_t = wind pressure coefficient ($C_t = 1.6$)
 A_{proj} = projected rotor area

b. Stress on the tower

$$F_w = C_t \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \right) A_{t \text{ proj}} .$$

$A_{t \text{ proj}}$ = projected tower area on the plane perpendicular to the wind direction

c. Momentum (torque)

$$M_X = \frac{0.6}{\lambda_0^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot \pi \cdot R^3$$

$$M_Z \leq C_t \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \right) A_{\text{proj}} \cdot e \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

2.3.2.3 Criteria for assessing parameters

a. Normal conditions

V_∞ = the highest normal working speed
 α = 30°
 g = 9.8 m/s^2
 W = $0.5 - \text{rad/s}$
 ρ = 1.25 kg/m^3

b. Storm conditions (hurricanes)

V_∞ = peak speed in the zone (hurricanes)
 α = 30°



EXAMPLE: Dimensioning a Tower

Data

r	= 2.5 m
H	= 10 m
$V_{\text{cut-out}}$	= 10 m/s
λ_o	= 2.0
A_{proj}	= $0.4 R^2$ (solidity = 0.4)
V_{storm}	= 30 m/s
W	= 0.5 rad/s
α	= 30°
ρ	= 1.25 kg/m ³
N	= 12
C	= 0.8 m (distance from the rotor to the vertical axis)
e_r	= 0.05 rotor eccentricity
m_{total}	= 1500 N

Applying the methodology discussed above,
we obtain the following results:

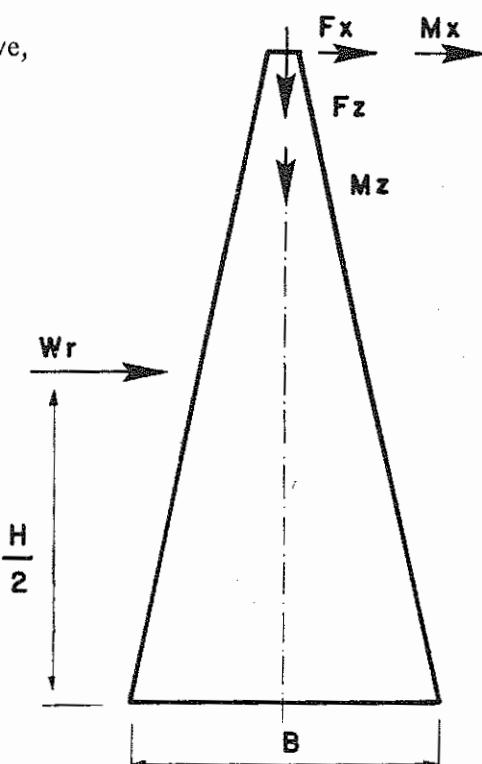
Normal conditions

$$\begin{aligned} F_x &= 1090 \text{ N} \\ F_y &= 750 \text{ N} \\ K_z &= 1500 \text{ N} \\ M_x &= 909 \text{ N.m} \\ M_y &= 843 \text{ N.m} \\ M_z &= 377 \text{ N.m} \end{aligned}$$

Storm conditions

$$\begin{aligned} F_x &= 7068 \text{ N} \\ F_y &= 0 \\ F_z &= 1500 \text{ N} \\ M_x &= 2650 \text{ N.m} \\ M_y &= 0 \\ M_z &= 3060 \text{ N.m} \end{aligned}$$

Figure 56 — Tower Stress



For storm conditions:

$$T = \frac{W}{4} + \frac{F_x \cdot H}{2N} + \frac{M_x}{2N} + \frac{W_T (H/2)}{2N}$$

$$D = \frac{W}{4} - \frac{F_x \cdot H}{2N} - \frac{M_x}{2N} - \frac{W_T (H/2)}{2N}$$

Assuming an area of 8 m^2 as the projected tower area, we have (for $V_\infty = 30 \text{ m/s}$), $W_T = 5000 \text{ N}$ (total system weight), yielding the loads that appear in Table 20.

**TABLE 20
TOWER LOADS**

B (m)	W_T MAX (N)	MAX (N)	MIN (N)
2.000	7200	26,078	- 26,832
2.50	7200	20,641	- 23,091
3.00	7200	16,996	- 19,471
3.50	7200	14,369	- 16,868
4.00	7200	14.166	- 14,916

As a final step, with the values from the foregoing table, the profile can be dimensioned for various leg distances, so that the one which proves most convenient can be chosen.

2.4 CALCULATING THE TURNTABLE

This is the element of the windmill that serves as a link between the revolution of the propeller and the alternating running of the pump; it sustains the rotor, the transmission mechanisms, and the vane, and makes it possible to orient the rotor in the direction of the wind. Figure 57 illustrates the principal elements of the turntable.

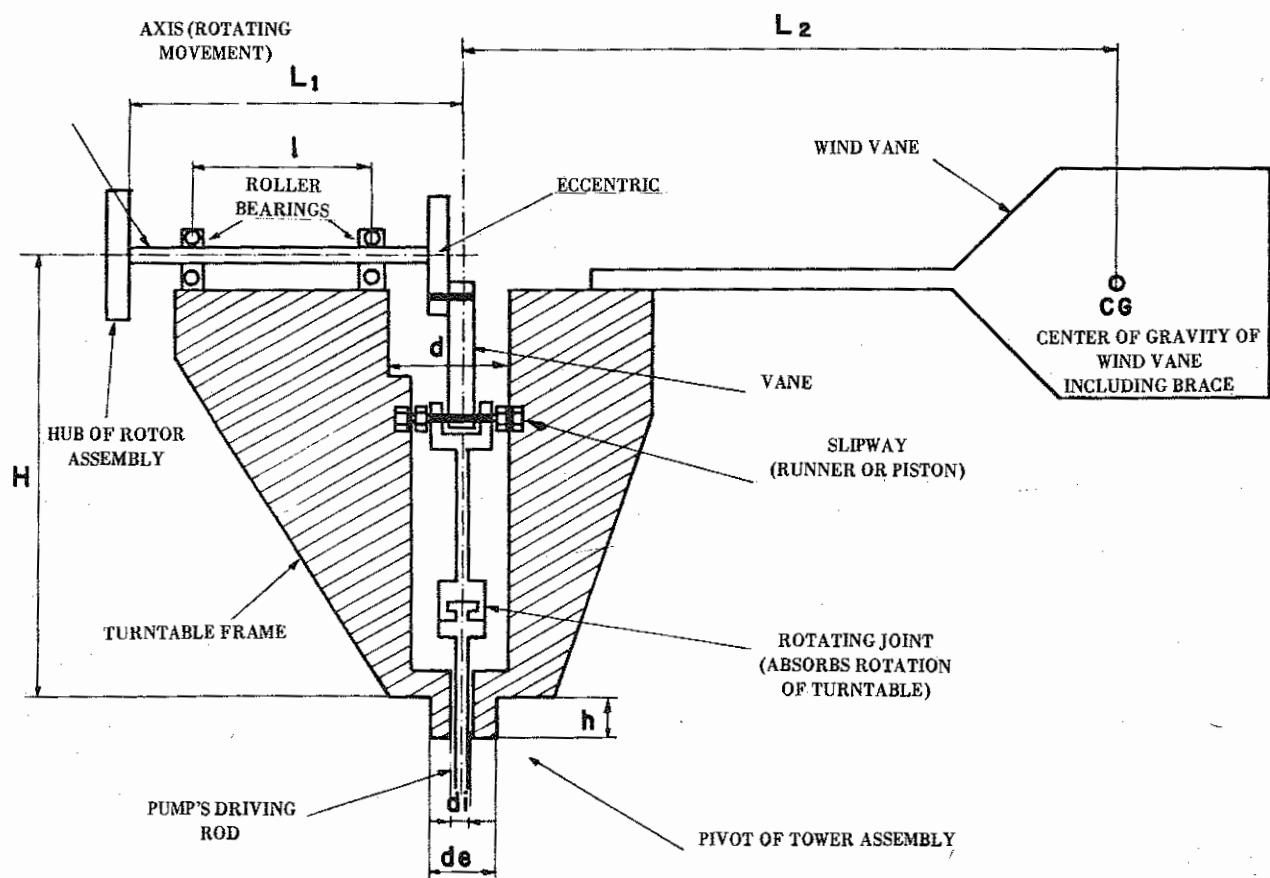


Figure 57 – General Scheme for the Turntable

In addition to the elements shown, safety mechanisms are activated to act on the vane in order to protect the equipment from overly strong winds and to brake the equipment at will for periods of rest and maintenance.

Figure 58 presents the scheme for a turntable designed by ITINTEC for a hand-made wind pump with a low power capacity, while Figure 57 shows a cross-section



of the turntable of a conventional industrial windmill with speed reductions based on gears; it can be appreciated that the main elements are similar in both cases.

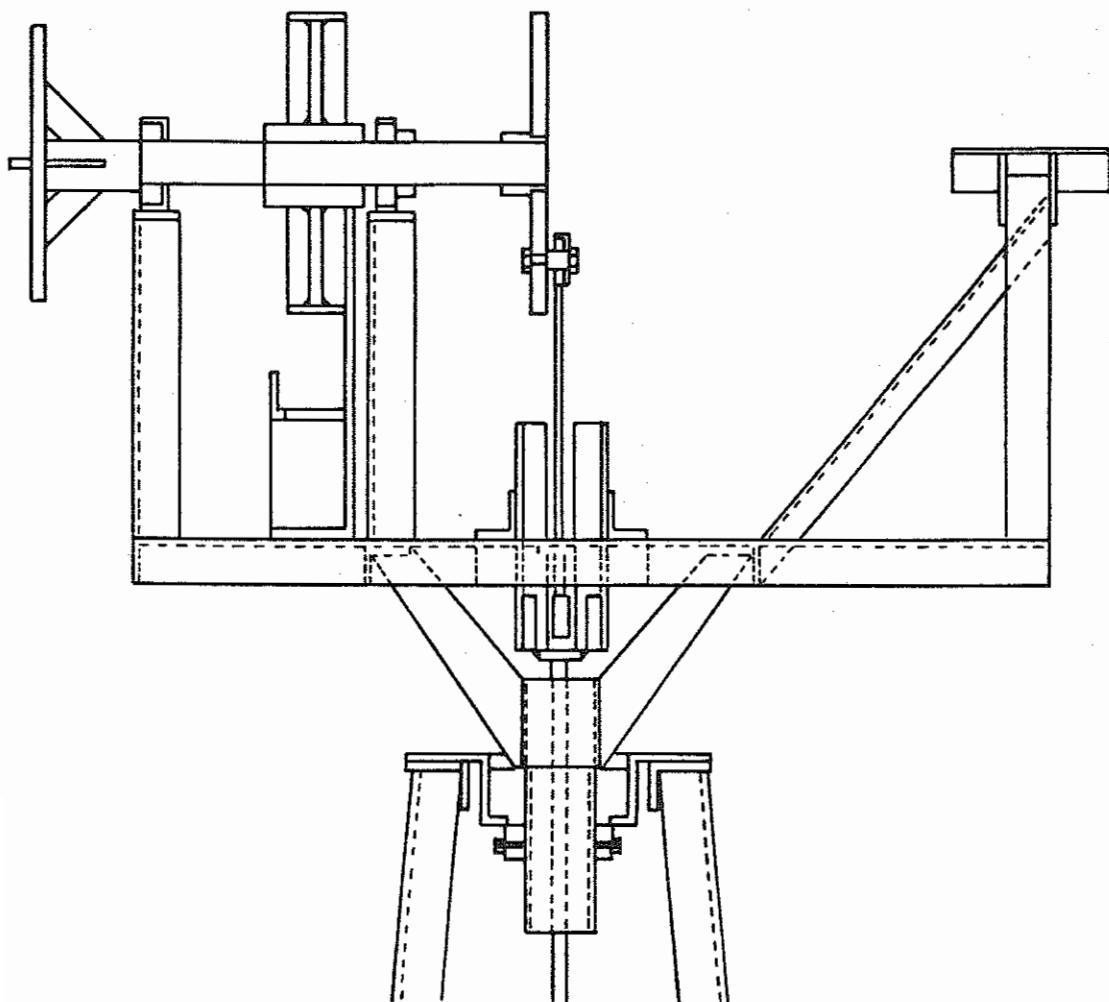


Figure 58 — Turntable Designed by ITINTEC/Peru

The general dimensioning of the turntable is related to the main features of the propeller, the pump, the transmission, and the tower.

Thus, the length L_1 shown in Figure 57 should be as minimal as possible, while taking care that the propeller blades do not hit the tower structure during their rotation. Once L_1 has been defined, the axis length and the distance between the bearings are also defined; the latter should be the maximum possible, in order to adequately support the rotor (See Figure 57).

The length L_2 (distance from the center of the turntable to the center of gravity in the vane and its support) is estimated as two thirds of the rotor diameter; the area of the vane can be assumed to be one eighth of the rotor area. The materials that compose the vane and its respective support will be selected in such a way that their momentum on the turntable (weight of the vane including support XL_2) will equalize the momentum due to the weight of the rotor (weight of the rotor XL_2).

The height H will necessarily be greater than the sum of the radius of the eccentric plus the length of the rod, where the radius of the eccentric is equal to half of the pump stroke.

The socket joint to the tower will have an inner diameter "di" larger than the diameter of the bar that activates the pump. Assuming a joint distance h to the tower, the chassis structure should be calculated so as to tolerate the stress shown in Figure 59.

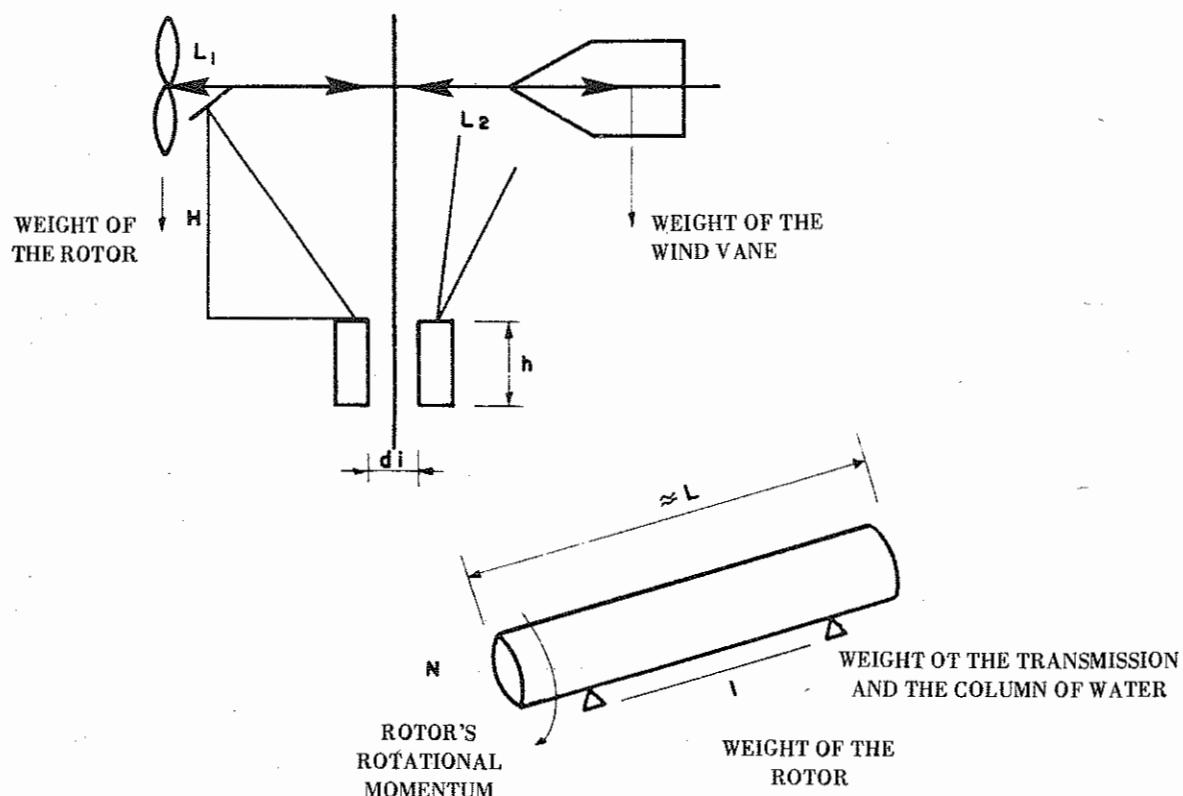


Figure 59 — Forces Acting on the Turntable

2.5 SAFETY SYSTEM

As has been seen in previous headings, the wind turbine is designed for a wind velocity V_{∞} , where it should work under optimum conditions, while the pump is designed with the same concept in mind, in order to obtain the coupling that will produce the best yield. Nevertheless, as we have already seen, the wind velocity is quite variable and can have very high values with respect to V_{∞} .

A wind energy system working at high speeds is dangerous for the pump and also makes the rotor work under poor conditions, thereby producing poor system output.

For the aforementioned reasons, it becomes necessary to block the system at the cut-out speed V_f , whose value can be considered between 1.5 and 2.5 times the design velocity.

2.5.1 Types of Safety Systems

There exist different types, as illustrated in Figures 60, 61, 62, and 63:

- Rotor system with variable weight
- Manual vane bending
- Automatic vane bending
- Dutch-type vane designed with a lateral blade.



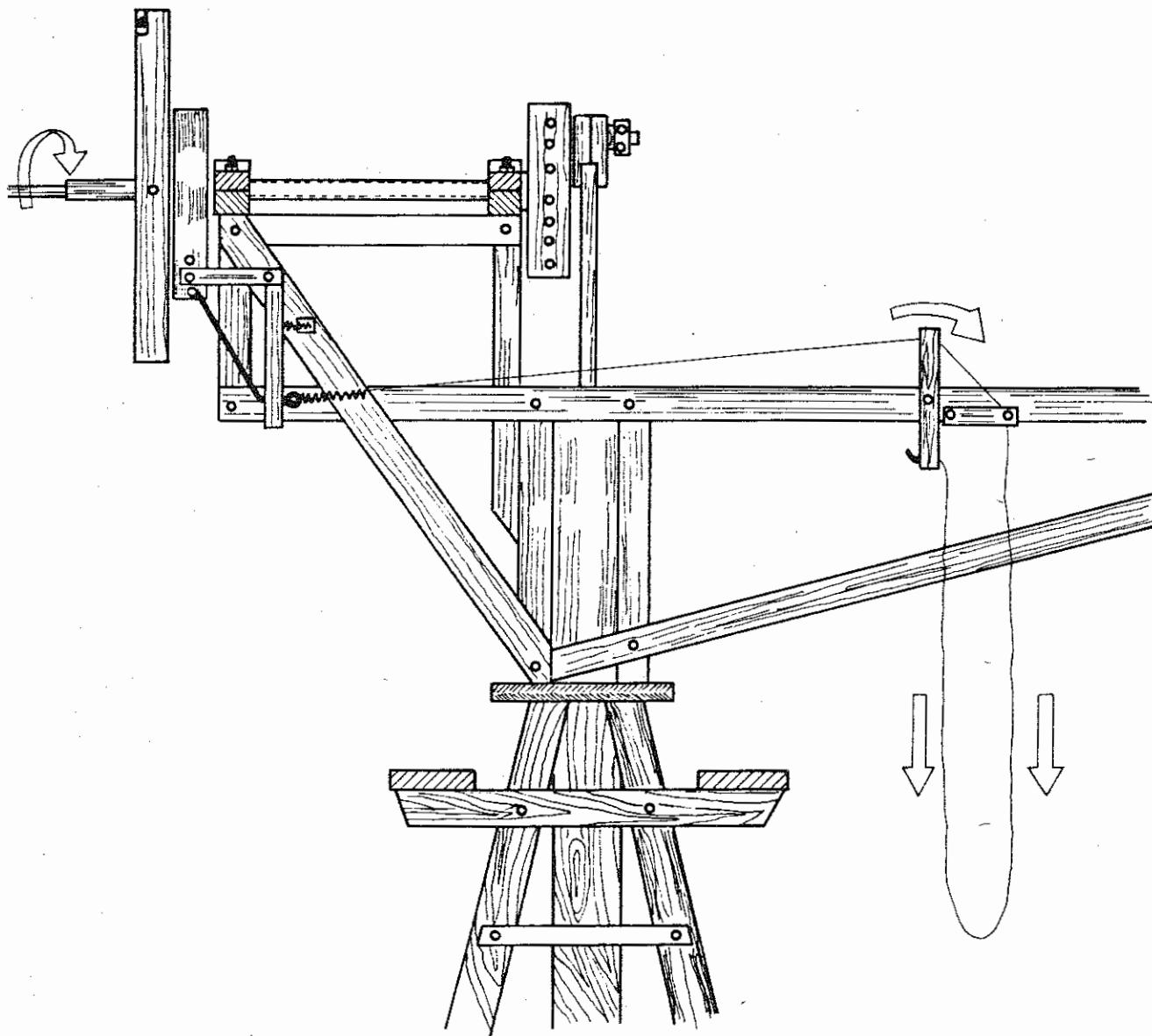


Figure 60 – Security System: Rotor with Variable Weight

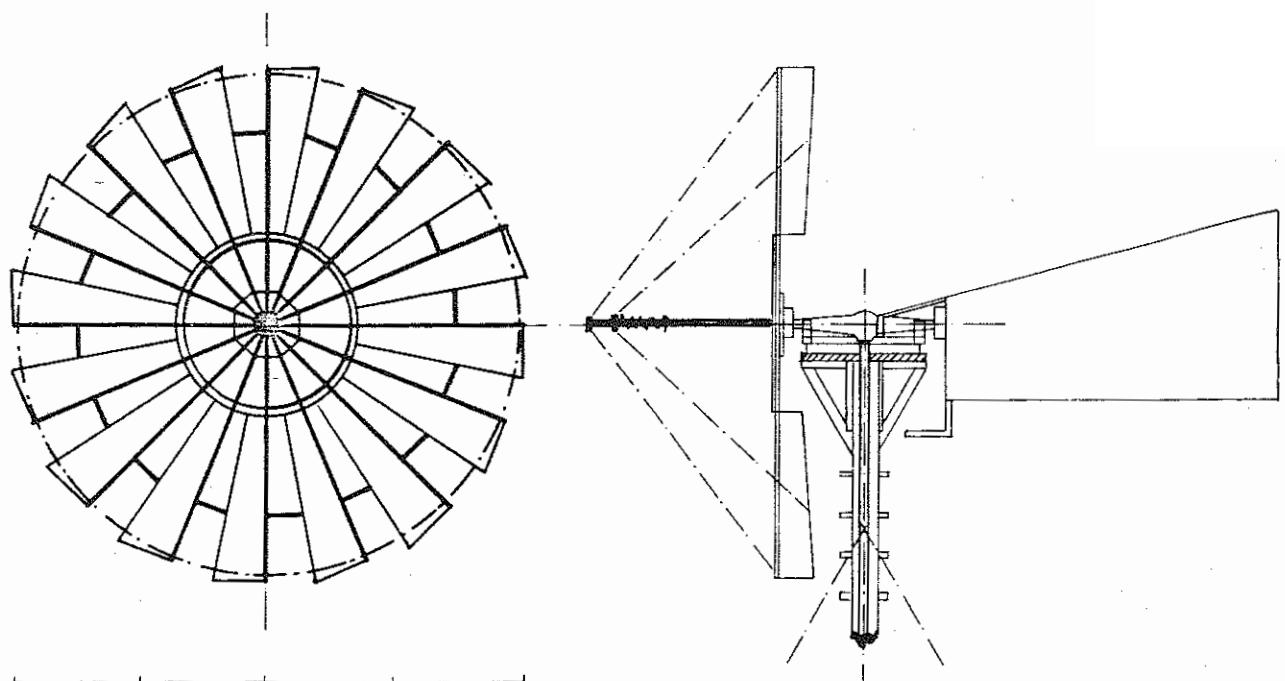


Figure 61 — Security System: Manual Vane Bending

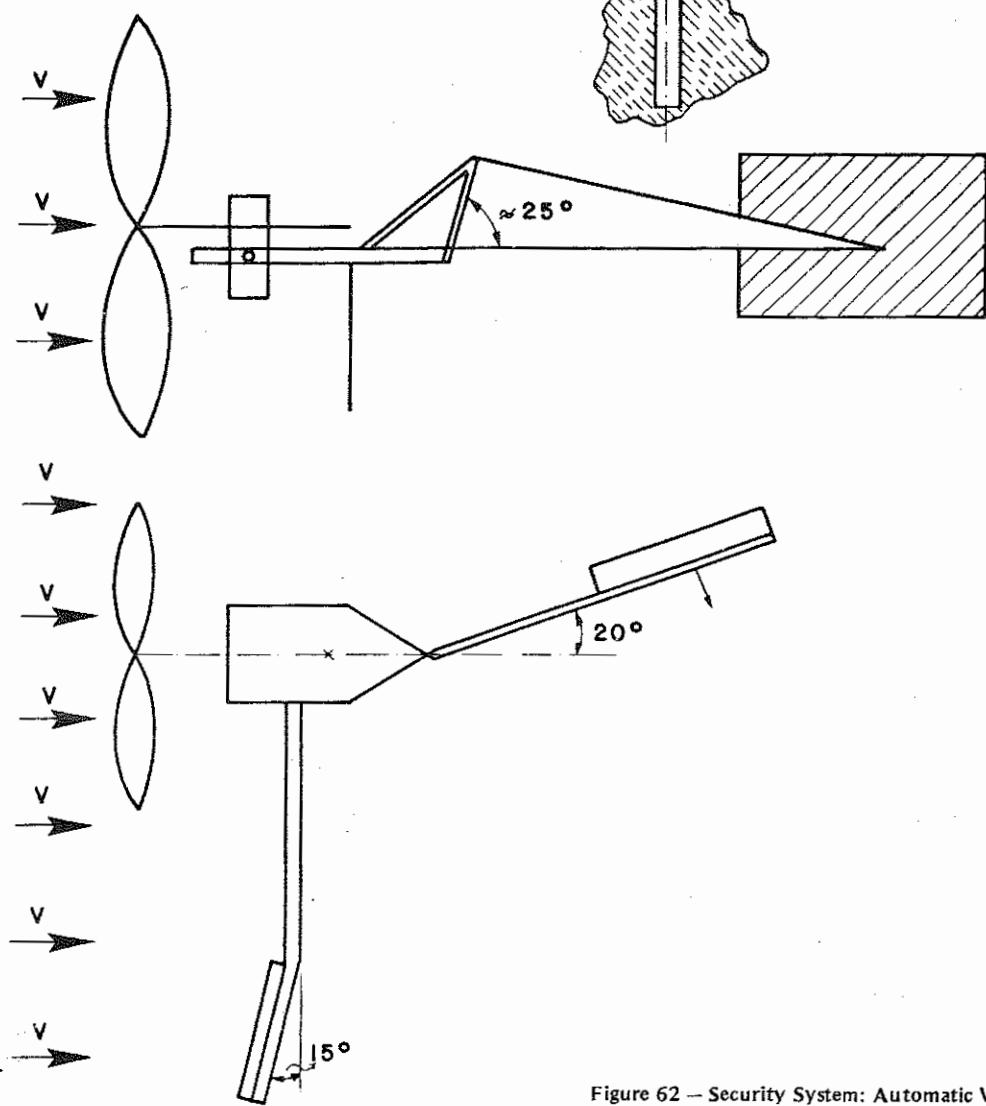


Figure 62 — Security System: Automatic Vane Bending

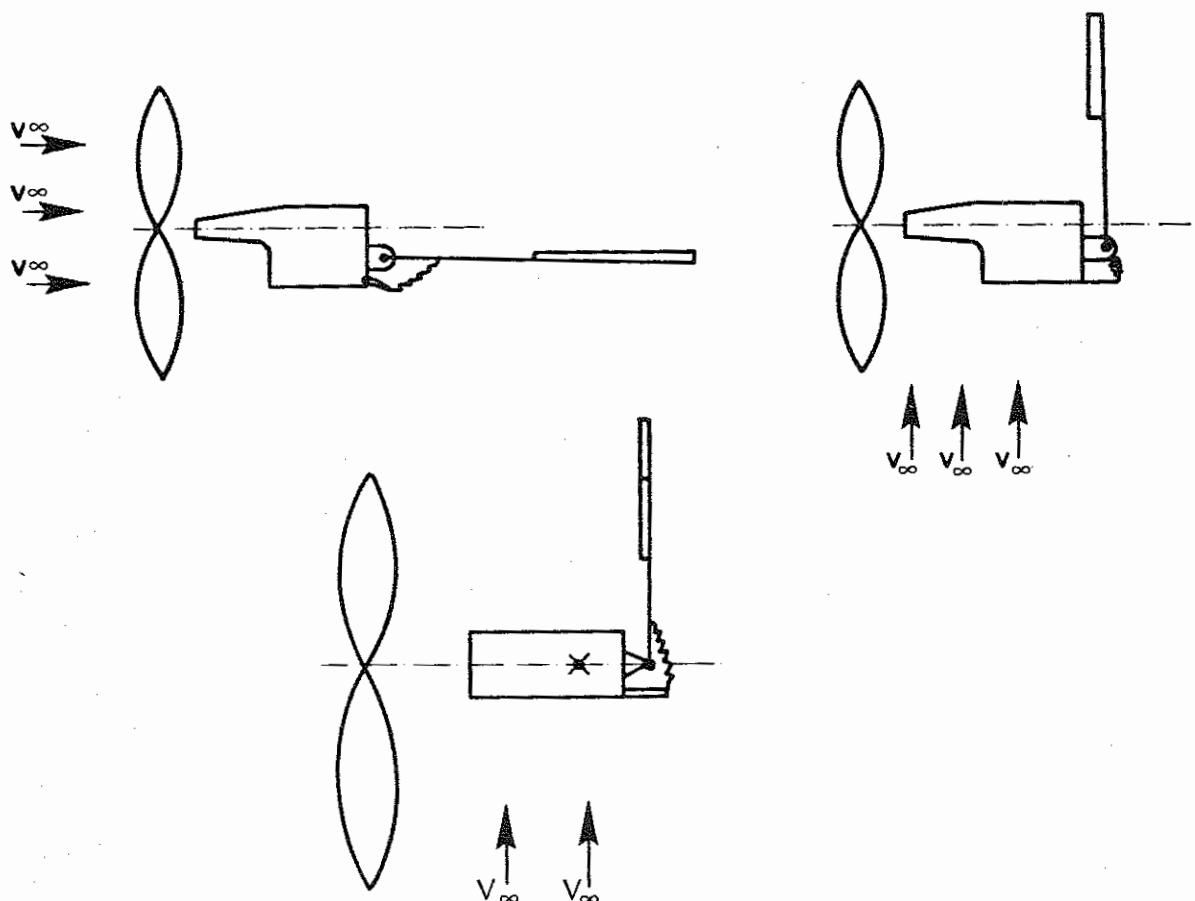


Figure 63 – Security System: Dutch-type Vane Designed with Lateral Blade

CHAPTER 3 – BEHAVIOR OF HORIZONTAL-AXIS WIND ENERGY SYSTEMS FOR PUMPING WATER

3.1 INTRODUCTION

The characteristic behavior of wind rotors (in stable conditions) can be described by the following expressions:

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^3 (\pi R^2) \quad (3-1)$$

$$Q = C_q \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 (\pi R^2) R \quad (3-2)$$

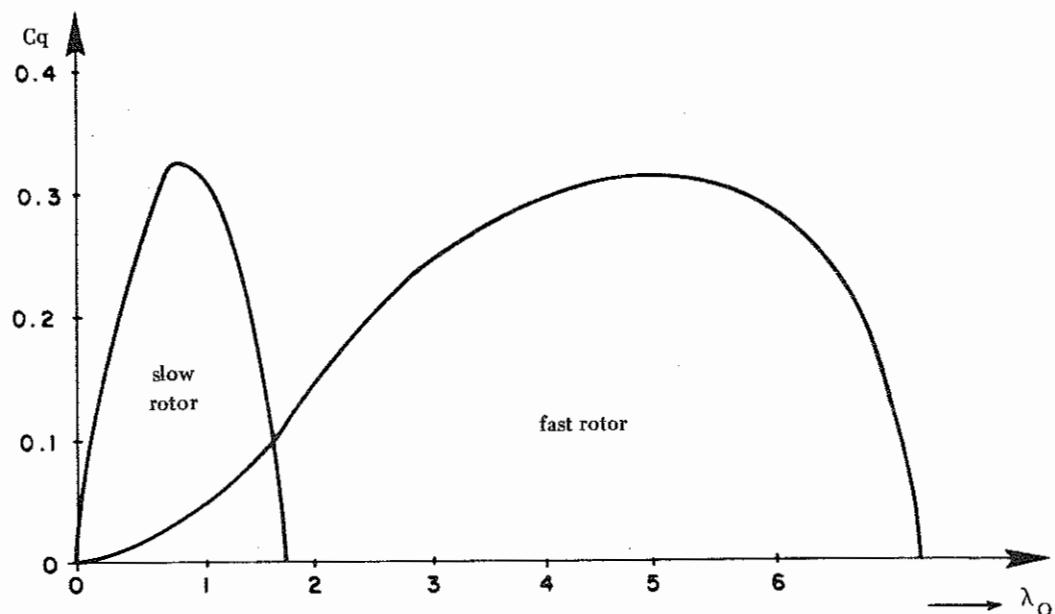
$$F = C_A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 (\pi R^2) \quad (3-3)$$

$$\lambda_o = \frac{2\pi W R}{V_\infty} \quad (3-4)$$

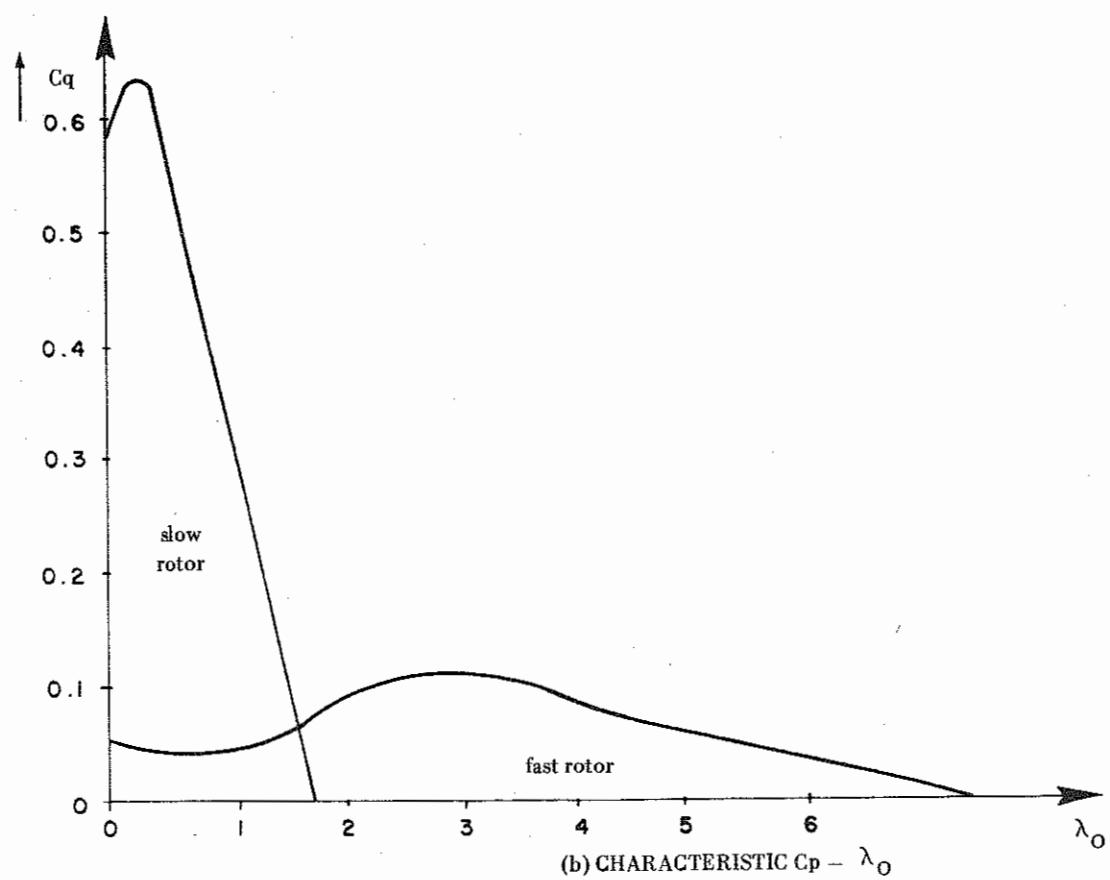
Where:

P	= power (watts)
Q	= torque (N-m)
F	= drag (N)
C _p	= power coefficient (dimensionless)
C _q	= torque coefficient (dimensionless)
ρ	= air density
V	= wind velocity (m/s)
R	= rotor radius (m)
W	= angular velocity (rpm)
λ_o	= celerity (dimensionless)

From Equations (3-1), (3-2), and (3-4), it can be deduced that $C_p = C_q \cdot \lambda_o$. The characteristic values for the power and torque coefficients can be appreciated in Figure 64, for both high-speed and low-speed rotors. In this figure it can be observed that the C_q value is higher in slow rotors and lower in high-speed ones.



(a) CHARACTERISTIC $C_p - \lambda_O$



(b) CHARACTERISTIC $C_p - \lambda_O$

Figure 64 — Power and Torque Coefficients for Horizontal-Axis Wind Rotors

In windmills used for pumping purposes, it is common to use pumps of a suction-impeller type, as illustrated schematically in Figure 65.

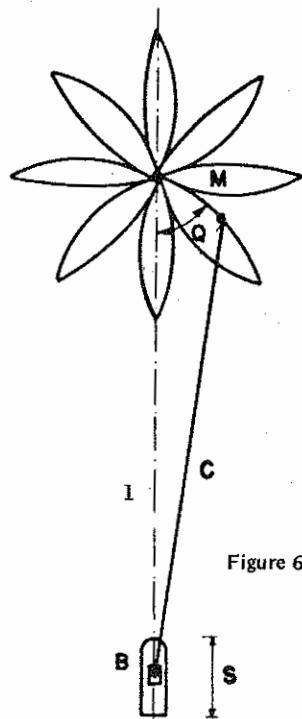


Figure 65 — Scheme of the Pumping Mechanism

In said figure, a crank M with a radius r activates the pump B , by means of a rod C of length L , making a piston run along a path S .

For the crank and rod system shown, we can use the following expression to calculate the torque necessary to maintain the crank at an angle θ with the vertical:

$$Q_W = (r \sin \theta + \frac{a}{2} \sin 2\theta) \cdot \rho \cdot g H \cdot \frac{\pi d p^2}{4} \quad (3-5)$$

Where:

- Q_W = necessary torque (N-m)
- r = crank radius (m)
- θ = angle that the crank forms with the vertical
- H = pumping height (m)
- dp = piston diameter
- a = r/L

The torque behavior for a working stroke is represented schematically in Figure 66.

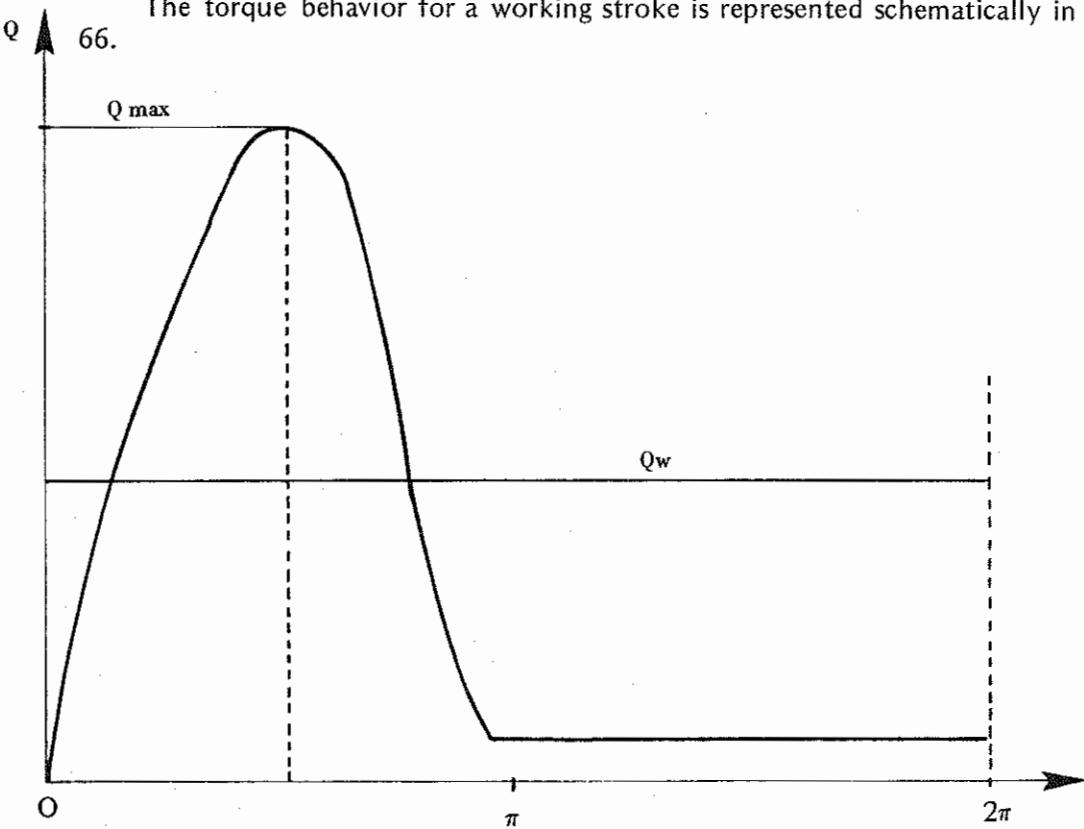


Figure 66 – Torque Variation in a Work Stroke

When a pumping system functions with continuous operation, only an average torque $Q_{AV} = Q_{MAX}/\pi$ is manifested; but during start-up the Q_{MAX} value must be exceeded.

For a rotor with known C_p and C_q characteristics, the operation of a system formed by coupling a suction-impeller pump can be analyzed in stationary conditions if the curves corresponding to the pump are drawn above the P (w) and Q (w) curves for the rotor.

Figure 67 shows a rotor with metal blades, with the $C_p (\lambda_0)$ and $C_q (\lambda_0)$ characteristics given in Figure 68, to which a suction-impeller pump has been attached. It can be observed that winds of a certain magnitude are required to put the system into operation, and it is easy to see how this situation would change if we used a slow rotor with the $C_p (\lambda_0)$ and $C_q (\lambda_0)$ characteristics shown in Figure 64.



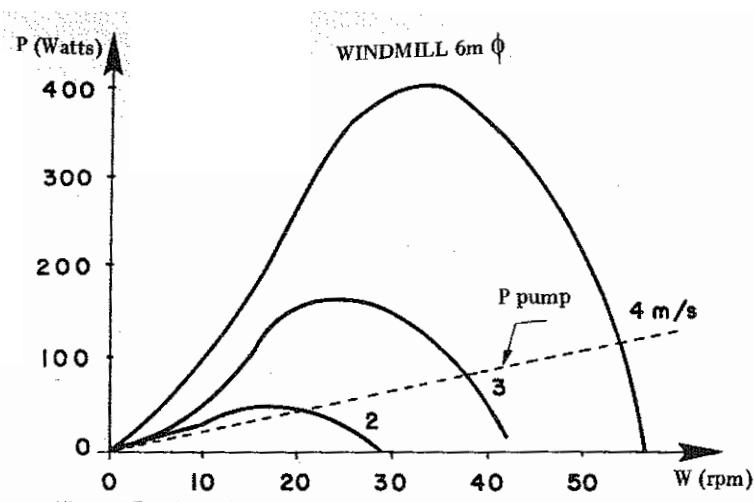
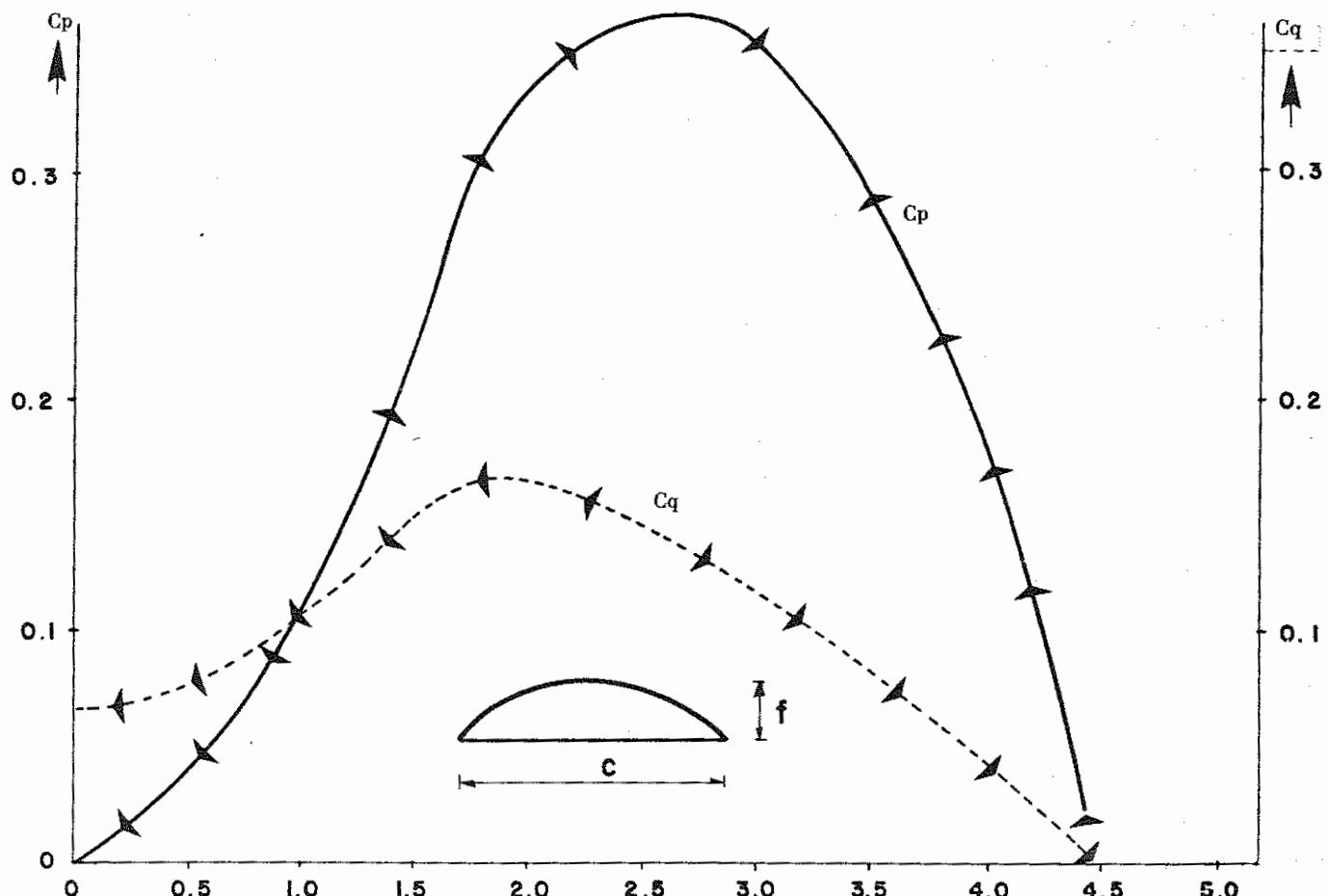


Figure 67 — Coupling of a Suction-Impeller Pump to a Rotor with Metal Blades: Effect on Power



CHARACTERISTICS:

- Rotor with Metal Blades ($N = 4$)
- $B(0.7 R) = 19^\circ$
- $\lambda_0 = 3$
- $f/c = 12\text{ o/o}$

Figure 68 — C_p and C_q Characteristics of a Rotor with Metal Blades

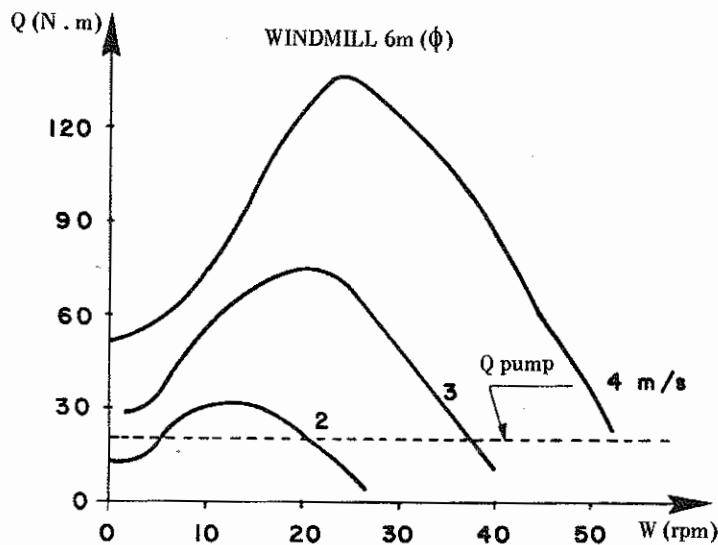


Figure 69 -- Coupling a Suction-Impeller Pump to a Rotor with Metal Blades: Effect on Torque

Figure 69 shows the effect that the coupling of a suction-impeller pump has on the torque of the rotor.

For the system described above, the behavior of $P(V_\infty)$ takes the form indicated in Figure 70. The machine starts up at a velocity V_c and follows an almost linear function until reaching a velocity V_R ; then, due to the losses in the rotor and the pump, the power output is maintained almost constant until reaching a velocity V_f , at which the machine ceases to pump for reasons of safety.

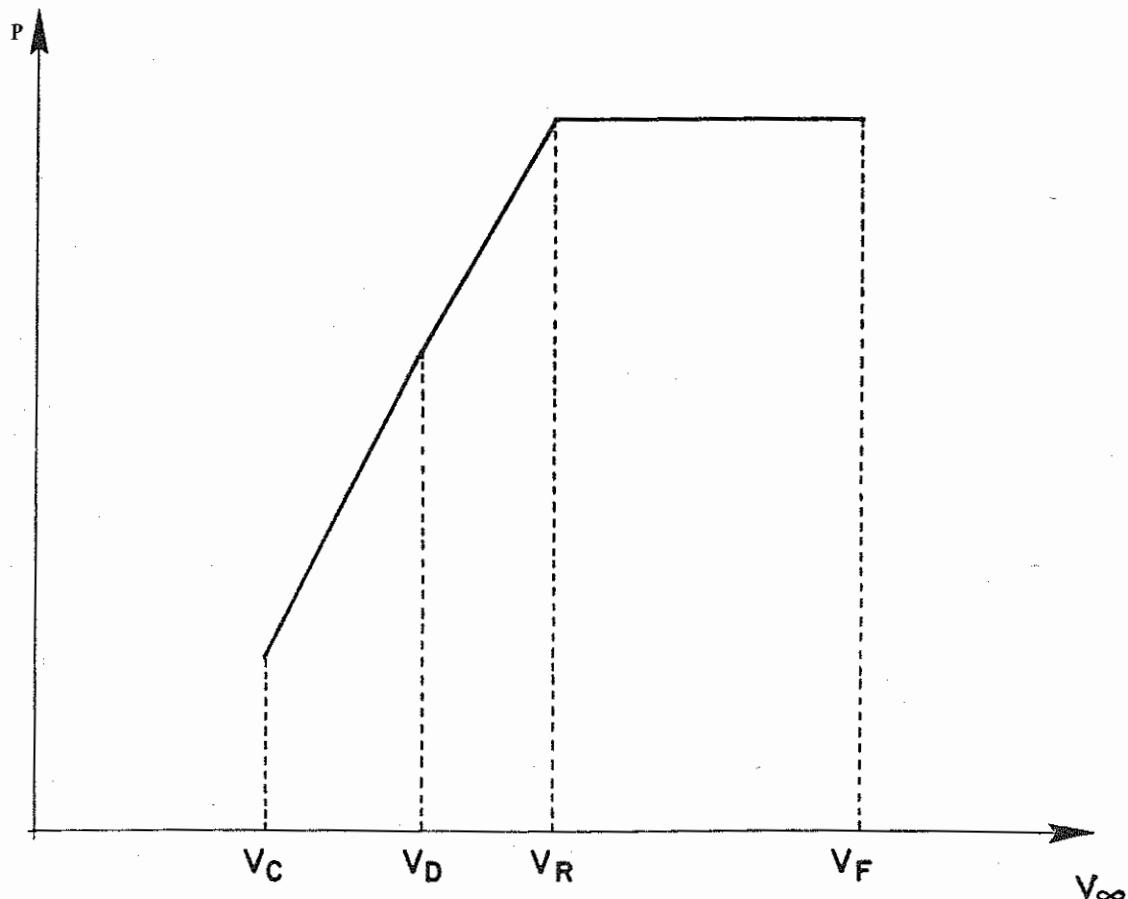


Figure 70 -- Behavior of $P = f(V_\infty)$ for a Pumping Windmill

For Figure 70:

V_c = cut-out velocity
 V_d = design velocity
 V_R = nominal (rated) velocity
 V_f = cut-in velocity

If we assume a linear function for C_q and λ_o , the $P(V_\infty)$ characteristic of a system takes the following form:

$$P = C_{p\max} \cdot \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_r^2 \cdot VD^3 - \frac{V_\infty}{V_d} \cdot \frac{\lambda_o \max}{\lambda_o d} - \frac{V_d}{V_\infty} \cdot \frac{\lambda_o \max}{\lambda_o d} - 1 \quad (3-6)$$

Where:

P = power (watts)
 V_d = design velocity at which the rotor-pump combination works at a celerity with a maximum C_p (m/s)
 λ_{od} = design celerity (dimensionless)
 λ_{omax} = celerity without load (dimensionless)
 η = efficiency of transmission and pump (dimensionless)
 $C_{p\max}$ = power coefficient at λ_{od} (dimensionless)
 ρ = air density
 D_r = rotor diameter (m)
 V_∞ = wind velocity (m/s)

The power required to pump water to a given height is determined as follows:

$$P_w = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot q \quad (3-7)$$

Where:

P_w = power (watts)
 ρ_w = water density (10^3 kg/m³)
 H = pumping height (m)
 g = acceleration of gravity (9.81 m/s²)
 q = water flow (m³/hr)

In stable conditions, $P = P_w$. Then, if we put Equations (3-6) and (3-7) in equal forms and solve for q :

$$q = \frac{3.6}{\rho_w gH} C_p \max \cdot \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot \pi D r^2 V_d^3 \frac{V_\infty}{V_d} \frac{\lambda_{o \max}}{\lambda_{o d}} - \frac{V_d}{V_\infty} \frac{\lambda_{o \max}}{\lambda_{o d}} - 1 \quad (3-8)$$

From this last expression, it can be observed that the water flow pumped by the system is influenced by pumping height, aerodynamic efficiency, rotor geometry design velocity and wind frequency distribution. If this expression is multiplied by the distribution of the wind velocity frequency in the place under consideration, the volume of water pumped during the period in question can be determined.

Likewise, with $q = q_{\text{average}}$ and accomodating the terms, we have:

$$S \cdot dp^2 = \frac{4 C_p \max \cdot \rho_w \cdot V_d^2 \cdot \pi R^3 \cdot \eta_{pt}}{\lambda_o \rho_w gH} \quad (3-9)$$

for which all the terms have already been defined previously. Here, the influence of the different rotor and wind parameters can be observed with respect to the pumping stroke and diameter.

With all the theory expounded up to now, we are in a position to analyze the influence of the various parameters, both for the wind resource and for the system, in terms of machine behavior.

3.2 INFLUENCE OF WIND FREQUENCY DISTRIBUTION

Taking the expressions for the Weibull distribution, given in bibliographical references 3-6 and 3-7, we have theoretically calculated the effect of two distributions with the same scale factor C (3.55 m/s) and different average velocities V (3.16 and 3.26 m/s) for a windmill having a diameter of 4 meters (Figure 71.2), as well as the effect of two distributions with the same average velocity V (3.26 m/s) and different scale factors C (Figure 71.6).

In both cases, the influence on both the design velocity and the total amount of water pumped can be appreciated.

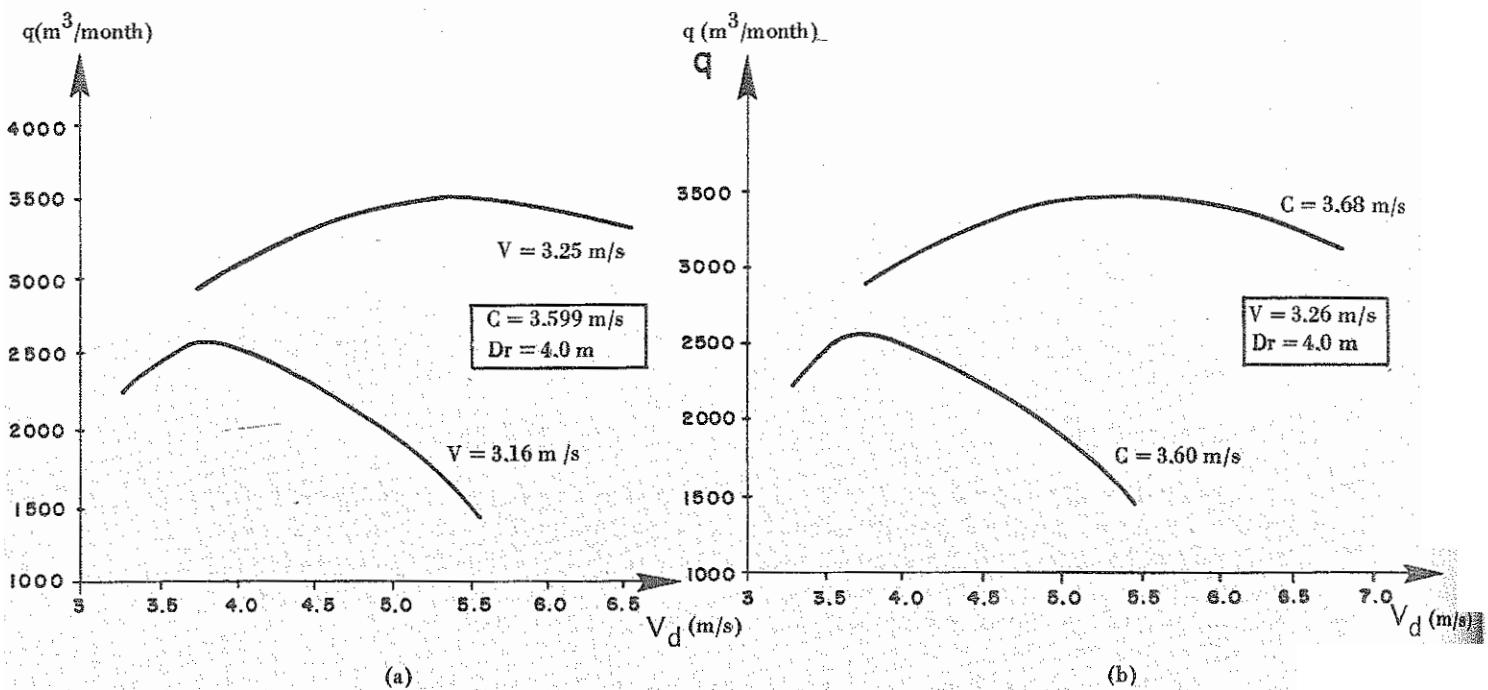


Figure 71 — Influence of Wind Frequency Distribution

3.3 INFLUENCE OF PUMPING HEIGHT AND ROTOR DIAMETER

The effect of variations in these parameters has been calculated for a regimen of winds with $K = 1.75$ and $C = 3.59$. The results can be appreciated in Figure 72.

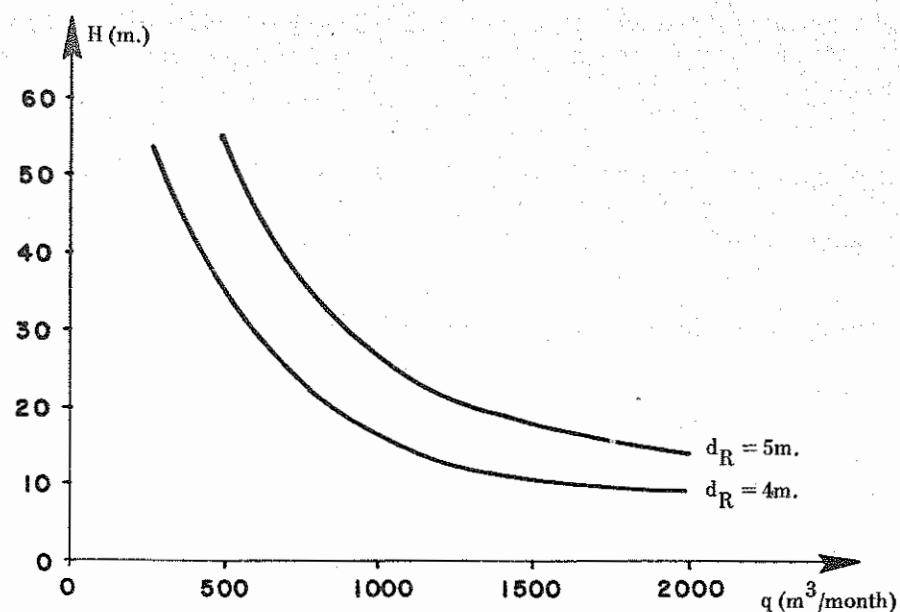


Figure 72 — Influence of Pumping Height and Rotor Diameter

3.4 INFLUENCE OF DESIGN VELOCITY

In Figure 73, a function $P(V_\infty)$ for a given system has been superposed on the frequency distribution curve for a given place. It can be observed that with a lower design velocity there are more hours of functioning (and a lesser water flow), as can be gathered from Figure 71. This fact can be important in some applications, as for example when water is going to be pumped for household use.

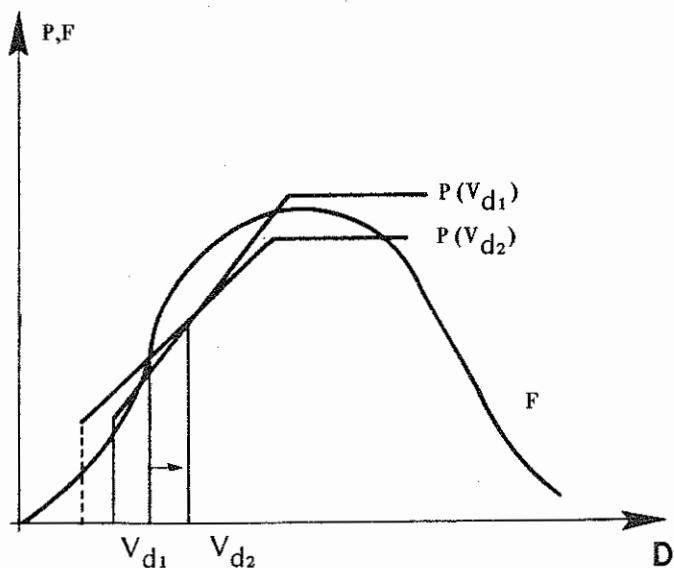


Figure 73 — Influence of Design Velocity

3.5 INFLUENCE OF ROTOR AERODYNAMICS

In Figure 74, the graphs shown in Figure 71 have been superposed on those corresponding to a Crete windmill.

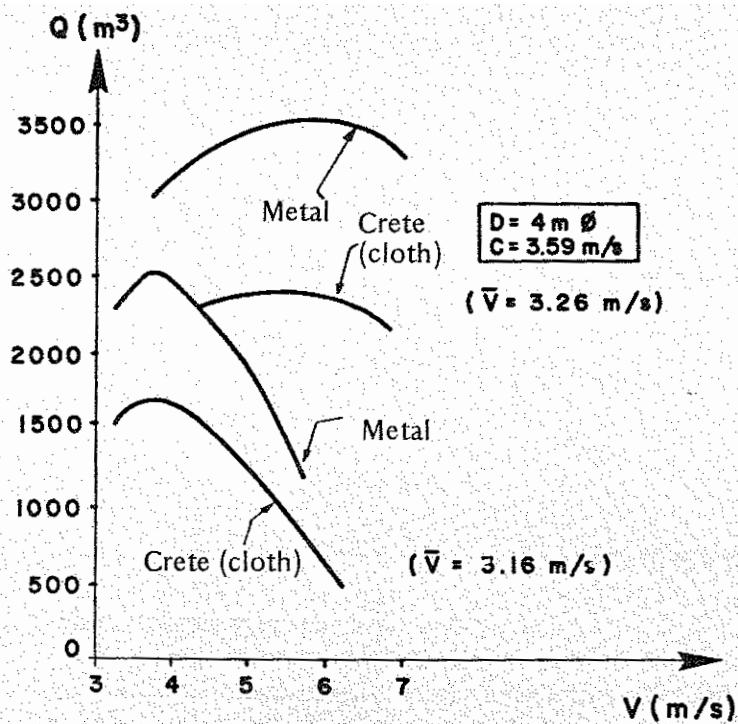


Figure 74 – Influence of Rotor Aerodynamics

3.6 INFLUENCE OF PUMP FEATURES

In a curve S, d_p the behavior of various pumps with diverse strokes have been graphed for a rotor having a fixed geometry and constant V_d and H. See Figure 75.

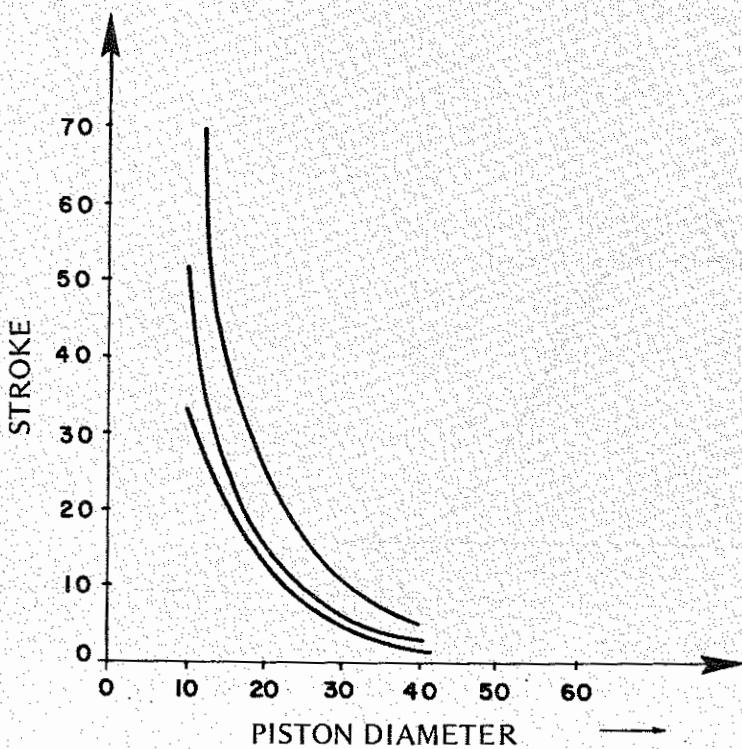


Figure 75 – Influence of Pump Features

3.7 INFLUENCE OF PUMP DIAMETER

It can be observed that on increasing the constant rotor diameter, the stroke is decreased when the piston diameter is increased; this effect is more pronounced with smaller pump diameters.

A more exhaustive study of the pump used to raise water is presented in Chapter 5 of this document.