



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO Y ANALISIS DE UN CONVERTIDOR
SOLAR FOTOTERMICO DE
ENFOQUE PUNTUAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTAN:

EDGARDO RUIZ VELASCO ROMO
ENRIQUE RUIZ VELASCO ROMO
JAVIER RUIZ VELASCO ROMO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	Pág.
NOMENCLATURA	1
INTRODUCCION	8
1. CONSIDERACIONES ASTRONOMICAS Y GEOGRAFICAS	12
1.1 La Mecánica del Sistema Solar	12
1.2 Determinación de los Parámetros Requeridos para la Medición de la Energía Solar Incidida	18
1.3 Tipos de Montura para Seguir la Trayectoria del Sol	26
1.4 Análisis Vectorial de la Captación de la Energía Solar.	31
1.5 Análisis Vectorial de las Monturas	42
2. COMPORTAMIENTO DE LA RADIACION SOLAR A LO LARGO DEL DIA	50
2.1 Características de la Radiación Solar	50
3. SUPERFICIE REFLEJANTE	58
3.1 Objetivo de la Superficie Reflejante	58
3.2 La Parábola de Revolución para obtener <u>Concentra</u> ción en un punto	60
3.3 Imagen formada en el Foco	64
3.4 Método Propuesto para la Colocación de Espejos Fraccionados sobre Superficies Parabólicas	67
3.5 Método matemático para la colocación de espejos hexagonales sobre una superficie parabólica	72
4. ABSORBEDOR SOLAR	
4.1 Objetivo	93
4.2 Desarrollo Matemático de la Simulación Solar	96
4.2.1 Simulación teórica del sistema térmico	122
4.2.2 Método numérico empleado para la solución de ecuaciones	123
4.3 Interpretación de Resultados	148

5.	MODELO FISICO DEL SISTEMA	167
5.1	Diseño de la Montura Ecuatorial	167
5.2	Memoria de Cálculo del Mecanismo de Seguimiento	187
5.3	Memoria Fotográfica del Sistema	199
6.	CONCLUSIONES	206
	BIBLIOGRAFIA EN GENERAL	210

NOMENCLATURA

Variable texto	Variable programa	Descripción	Unidades
A	A	Area proyectada de la parábola	m^2
Ab	AB	Area de la base del generador que no esta en contacto con el foco	m^2
Abase	ABASE	Area de la base del generador	m^2
Abarra	ABARRA	Sección de los soportes del generador	m^2
Af	AF	Area focal	m^2
α	ALFA	Absortancia de la base del generador	%
Are	ARE	Area exterior del recipiente del generador con aislante	m^2
Are/Atot	AREAT	Porcentaje del area exterior del <u>re</u> cipiente	%
Ari	ARI	Area interior del recipiente	m^2
Ate	ATE	Superficie exterior de la tubería con aislante	m^2
Ati	ATI	Superficie interior de la tubería	m^2
Ar1	AR1	Area exterior del recipiente	m^2
At1	AT1	Area exterior de la tubería	m^2
β	BETA	Coefficiente de expansión volumétrica del agua	$^{\circ}C^{-1}$
β_f	BETAF	Coefficiente de expansión volumétrica del agua a temperatura de ebullición	$^{\circ}C^{-1}$
β_g	BETAG	Coefficiente de expansión volumétrica del vapor seco	$^{\circ}C^{-1}$
β_0	BETA0	Coefficiente de expansión volumétrica del agua a temperatura ambiente	$^{\circ}C^{-1}$
c	C	Concentración del espejo parabólico	
c_p	CP	Calor específico del agua	Joule/Kgm $^{\circ}C$

Cpa	CPA	Calor específico del aislante del generador	Joule/Kgm °C
Cpat	CPAT	Calor específico del aislante de la tubería	Joule/Kgm °C
Cpb	CPB	Calor específico de la base del generador	Joule/Kgm °C
Cpf	CPF	Calor específico del agua a temperatura de ebullición	Joule/kgm °C
Cpg	CPG	Calor específico del vapor seco	Joule/Kgm °C
Cpr	CPR	Calor específico del recipiente	Joule/Kgm °C
Cpt	CPT	Calor específico de la tubería	Joule/Kgm °C
Cpo	CPO	Calor específico del agua a temperatura ambiente	Joule/Kgm °C
D	D	Parámetro utilizado en el Hexágono	m
δ	DELTA	Declinación de la tierra	Grados
Δp	DELTAP	Caída de presión en la tubería	Kg/cm ²
Δx_a	DXA	Espesor del aislante del generador	m
Δx_{asb}	DXASB	Espesor del asbesto de los soportes	m
Δx_{atub}	DXATUB	Espesor del aislante de la tubería	m
Δx_b	DXB	Espesor de la base del generador	m
Δx_r	DXR	Espesor del recipiente del generador	m
Δx_{tub}	DXTUB	Espesor de la tubería	m
E	E	Parámetro utilizado en el hexágono	m
ee	EE	Energía eléctrica generada	Watts
η_{ge}	EGE	Eficiencia del generador eléctrico	%
EMAX	EMAX	Parámetro utilizado en el hexágono	m
EMIN	EMIN	Parámetro utilizado en el hexágono	m
ϵ_1	EMIT1	Emisividad del ambiente al generador por radiación	%
ϵ_2	EMIT2	Emisividad del calor de la base del generador al ambiente	%
η_{mv}	EMV	Eficiencia del motor de vapor	%
F	F	Parámetro utilizado en el hexágono	m
ϕ	F1	Latitud del lugar	Grados
.	GAMA	Factor de intersección	%
.	GAMMA	Angulo azimutal	Grados

Grf	GRL	Número de Grashof	
h	H	Entalpía del vapor al principio del intervalo	Joule/kgm
Hb	HB	Radiación directa del sol en sup. horizontal	Watts/m ²
Hbmax	HBMAX	Radiación directa promedio sobre superficie horizontal	Watts/m ²
Hb x Rb	HBRB	Radiación directa incidida en la superficie del captador	Watts/m ²
Hb vap	HBVAP	Entalpía del vapor a presión baja después de la expansión isentrópica	Joule/kgm
hc	HCNAT	Coefficiente de convección natural del agua	Watts/m ² °C
Hct	HCT	Coefficiente de convección en la tubería	Watts/m ² °C
Hcv	HCV	Coefficiente de convección en la base del generador	Watts/m ² °C
Hf	HF	Entalpía del vapor húmedo a presión alta	Joule/kgm
Hfb	HFB	Entalpía del vapor húmeda a presión baja	Joule/kgm
hg	HG	Entalpía del vapor seco a presión alta	Joule/kgm
hgb	HGB	Entalpía del vapor seco a presión baja	Joule/kgm
hH20	HH20	Entalpía del vapor en el generador	Joule/kgm
Hi	HI	Radiación directa incidida del sol	Watts/m ²
Hv	HV	Entalpía del vapor en la tubería	Joule/kgm
Hvap	HVAP	Entalpía del vapor a la salida del regulador de presión	Joule/kgm
hx	HX	Entalpía del vapor sin considerar las pérdidas de calor en la tubería	Joule/kgm
ho	HO	Entalpía del agua a temperatura ambiente	Joule/kgm
k	K	Constante de la parábola	m ⁻¹
ka	KA	Conductividad del aislante del generador	Watts/m °C
kasb	KASB	Conductividad del asbesto de los sopor - tes	Watts/m °C
Kat	KAT	Conductividad del aislante de la tubería	Watts/m °C
Kb	KB	Conductividad de la base del generador	Watts/m °C
Kr	KR	Conductividad del recipiente	Watts/m °C
Kt	KT	Conductividad de la tubería	Watts/m °C

l	L	Longitud característica del generador	m
		Longitud de la parábola	m
l_{tub}	LTUB	Longitud de la tubería	m
ma	MA	Masa del aislante del generador	Kg
mat	MAT	Masa del aislante de la tubería	Kg
mb	MB	Masa de la base del generador	Kg
m_{H2O}	MH2O	Masa de agua	Kg
mr	MR	Masa del recipiente del generador	Kg
mt	MT	Masa de la tubería	Kg
μ	MU	Viscosidad dinámica del agua	Kg/m s
μ_f	MUF	Viscosidad dinámica del vapor húmedo	Kg/m s
μ_g	MUG	Viscosidad dinámica del vapor seco	Kg/m s
μ_o	MUO	Viscosidad dinámica del agua a tem. amb.	Kg/m s
N	N	Número de periferia para colocar hexágonos	
nd	ND	Número del día	
NF	NF	Número final de periferia de hexágonos	
P	P	Distancia focal de la parábola	m
Pr	PR	Número de Prandtl	
q_{ab}	QAB	Calor almacenado en la base del generador	Watts
q_{at}	QAT	Calor almacenado en la tubería	Watts
q_{cb}	QCB	Pérdidas de calor por convección en la base del generador	Watts
q_{cf}	QCF	Pérdidas de calor por convección en el foco	Watts
q_i	QI	Calor incidido en la base del generador	Watts
q_k	QK	Calor conducido en la base del generador	Watts
q_{maxv}	QMAXV	Energía del vapor sin pérdidas	Watts
q_{pt}	QPT	Pérdidas de calor por convección en la tubería	Watts
q_{rb}	QRB	Pérdidas de calor por radiación en la base	Watts
q_{rf}	QRF	Pérdidas de calor por radiación en el foco	Watts
q_{st}	QST	Pérdidas de calor por los soportes del generador	Watts
q_u	QU	Calor útil que entra al generador	Watts
q_{vap}	QVAP	Energía entregada por el vapor	Watts

Red	RED	Número de Reynolds	
re	RE	Radio exterior del generador con ais_lante	m
ret	RET	Radio exterior de la tubería con ais_lante	m
ri	RI	Radio interior del generador	m
Rit	RIT	Radio interior de la tubería	m
ρ	ROD	Reflectancia del espejo	%
r1	R1	Radio exterior del generador	m
R1T	RIT	Radio exterior de la tubería	m
s	S	Angulo de inclinación del captador	Grados
		Entropía del vapor	Joule/kgm °C
sf	SF	Entropía del vapor húmedo a alta pre_sión	Joule/kgm °C
sfb	SFB	Entropía del vapor húmedo a baja pre_sión	Joule/kgm °C
sg	SG	Entropía del vapor seco a alta presión	Joule/kgm °C
sgb	SGB	Entropía del vapor seco a baja presión	Joule/kgm °C
σ	SIGMA	Coefficiente de transmisión de calor por radiación	watt/m ² °K ⁴
svap	SVAP	Entropía del vapor durante la expan_sión	Joule/kgm °C
T	T	Temperatura del agua al inicio del in_tervalo	°C
tb	TB	Temperatura promedio de la base del generador	°C
td	TD	Largo del día	Horas
θ	TETA	Angulo formado entre la radiación so_lar y la normal del captador	Grados
θ_n	TETAN	Angulo formado entre la radiación so_lar y la normal del lugar	Grados
Ti	TI	Temperatura del agua al final del in_tervalo	°C
T _∞	TINF	Temperatura del ambiente	°C
Tmax	TMAX	Temperatura en el area focal	°C
Tpmax	TPMAX	Temperatura en la base del generador	°C
Tst	TST	Temperatura de los soportes del generador	°C
T1	T1	Temperatura interior del generador	°C

T2	T2	Temperatura exterior del generador	°C
T3	T3	Temperatura exterior del aislante del generador	°C
T12	T12	Temperatura promedio del metal del generador	°C
T23	T23	Temperatura promedio del aislante del generador	°C
T1T	T1T	Temperatura interior de la tubería	°C
T2T	T2T	Temperatura exterior de la tubería	°C
T3T	T3T	Temperatura exterior del aislante de la tubería	°C
T12T	T12T	Temperatura promedio del metal de la tubería	°C
T23T	T23T	Temperatura promedio del aislante de la tubería	°C
U _T	UT	Coefficiente global de transmisión de calor del recipiente del generador	Watts/m ² °C
U _{tub}	UTUB	Coefficiente global de transmisión de calor en la tubería	Watts/m ² °C
v	V	Volumen específico del agua y vapor	m ³ /kgm
V _{vapor}	VELT	Velocidad promedio del vapor en la tubería	m/s
v _F	V _F	Volumen específico del vapor húmedo	m ³ /kgm
v _g	V _G	Volumen específico del vapor seco	m ³ /kgm
V _{0L}	VOL	Volumen del generador y tubería (capacidad)	m ³
v _V	VV	Velocidad del viento	m/s
v _x	VXM	Volumen específico medio del vapor en la tubería	m ³ /kgm
v ₀	V0	Volumen específico del agua a temperatura ambiente	m ³ /kgm
ω	ω	Angulo Horario	Grados
WΔp	WDP	Energía de presión perdida en la tubería	Watts
x	X	Radio de la parábola	m
		Calidad del vapor en el generador	%
x ₁ v _{1p}	XBVAP	Calidad del vapor a presión baja en el proceso de expansión isentrópico	%

XMAX	XMAX	Radio máximo de la parábola	m
X_v	XV	Calidad del vapor en la tubería incluyendo las pérdidas de calor en la misma	%
x_{vap}	XVAP	Calidad del vapor a la salida del regulador de presión	%
Z	Z	Altura del generador	m
Z_{ext}	ZEXT	Parámetro para la colocación de los hexágonos	m

1. INTRODUCCION

Este trabajo constituye un estudio del aprovechamiento de la energía solar mediante el uso de un espejo parabólico para generar vapor a presiones superiores a la atmosférica y posteriormente utilizar la energía del vapor al expandirla en un motor de vapor que esté acoplado, a su vez, a un dispositivo mecánico, tal como una bomba de agua o un generador eléctrico.

Esto implica que el sistema está constituido por diversos elementos con una función específica cada uno de ellos; y al conjugarlos se logra la transformación de la energía solar a energía mecánica por medio de un motor de vapor. Esta transformación no es inmediata porque es necesario calentar agua a alta temperatura y así obtener el vapor a alta presión y con este último hacer la transformación a la energía mecánica. Mediante el uso del espejo parabólico se puede obtener una tem-

peratura de equilibrio superior a la que se podría alcanzar con otros tipos de captadores solares. Para obtener el vapor se utiliza la reflexión de los rayos solares a través de un espejo parabólico, el cual sigue la trayectoria del Sol con la utilización de una montura ecuatorial acoplada al espejo.

Debido a las características del espejo que concentra la radiación solar en una pequeña superficie, el agua que es contenida en el generador, que es un recipiente metálico, es calentada por la acción de la energía solar. Una vez que se llega a la temperatura de ebullición del agua, la cual depende de la presión de trabajo deseada, el vapor se libera a través de una tubería que lo conduce hasta el motor, el cual convierte la energía de presión del vapor en energía mecánica.

Una de las características de la parábola es que la distancia del foco es constante y por tanto es necesario acoplar la parábola y el generador sobre la montura para que siempre exista la transferencia de calor del foco al generador. Debido a que la montura sostiene al espejo, al generador y al contrapeso que los balancea, la estructura queda sometida a grandes esfuerzos, por lo cual se diseñó una estructura tubular que es capaz de soportar los dispositivos y al mismo tiempo se logra que la estructura sufra deformaciones mínimas. De este modo, se obtiene un excelente seguimiento solar, mediante el giro de un eje a velocidad angular constante a lo largo del día, haciendo un previo ajuste del eje de la declinación antes de iniciar el seguimiento cada día.

Dividimos el estudio del sistema en cuatro unidades fundamentales: la estructura, el generador de vapor, la superficie reflejante y los resul-

tados obtenidos. A continuación se detallará por capítulos.

El capítulo 1 describe aspectos astronómicos y geográficos relacionados con el Sol y la Tierra, así como los parámetros de la medición de la radiación solar que llega a la Tierra. Lo anterior se hace con el objeto de diseñar la montura que se emplea para el sistema de seguimiento.

En el capítulo 2 se hace un análisis del comportamiento de la radiación solar a lo largo del día utilizando la información que proporcionan los medidores de energía solar que se encuentran colocados sobre una superficie horizontal, y con base en la información anterior se determina el comportamiento de la radiación solar suponiendo que los medidores siguen la trayectoria del sol a lo largo del día. En este capítulo también se hace un estudio de los sistemas de rastreo solar que pueden ser empleados para obtener una mejor exactitud en el seguimiento.

En el capítulo 3 se analiza la superficie reflejante que cubre a la parábola donde se muestran las ventajas de la utilización de espejos fraccionados en este caso. Se hace un estudio de las características matemáticas de la parábola y se propone un método para la colocación de espejos fraccionados sobre la superficie parabólica.

En el capítulo 4 se estudia el comportamiento térmico del generador de vapor y sus componentes; son analizados los flujos de calor hasta la cantidad de trabajo mecánico que puede entregar el vapor. También se muestra un análisis de la distribución de las temperaturas durante el proceso; mediante la utilización de la computadora, se hace posible la

simulación del sistema de una forma global para poder determinar el comportamiento del sistema mediante el estudio de los parámetros y del comportamiento que resulta de variar algunos de ellos; se interpretan los resultados obtenidos en el capítulo 4, al final.

En el capítulo 5 se muestra la memoria de cálculos para la fabricación de la montura ecuatorial y del mecanismo reductor que se emplea para - dar movimiento al sistema de seguimiento. También se muestran los planos de fabricación y detalles de los mismos.

Finalmente se condensan en el capítulo 6 las conclusiones y recomendaciones que se derivan de este trabajo.

1. CONSIDERACIONES ASTRONOMICAS Y GEOGRAFICAS

1.1 La Mecánica del Sistema Solar

El sistema solar consta del Sol, los planetas y sus satélites. La palabra "solar" indica que el Sol es el elemento principal: contiene aproximadamente 99% de toda la materia del sistema. La masa de to dos los planetas y satélites comprende el otro 1%. Como resultado de esta distribución de masa, el "Sol masivo" es casi estacionario mientras que los otros cuerpos giran alrededor de él, por ser más ligeros.

La palabra "sistema" denota que todos los cuerpos conservan gran regu laridad en sus movimientos. De gran importancia, entre las diversas leyes que describen estos movimientos, están las leyes de Kepler.

La primera ley establece que las órbitas de los planetas son de forma elíptica y en ellas el Sol ocupa uno de sus focos.

La segunda ley habla de la velocidad de los planetas en sus órbitas respectivas. La velocidad a lo largo de la trayectoria orbital no es constante, ya que los planetas se mueven más aprisa cuando se encuentran - más cerca del Sol. La velocidad máxima de cualquier planeta se obtiene cuando está más próximo al Sol, y la mínima cuando se encuentra más alejado. Al punto de la órbita más próximo al Sol se le llama "perihelio"; al más alejado, "afelio".

Aunque las velocidades de los planetas en sus órbitas no sean constantes, hay otro aspecto relacionado con la velocidad que sí lo es: la velocidad con la cual la recta que une al Sol con cualquier planeta en particular barre áreas iguales. Lo anterior se expresa en la versión formal de la segunda ley de Kepler: "El radio vector de cada planeta - pasa sobre áreas iguales en intervalos de tiempo iguales".

La velocidad media de la Tierra en su órbita es de 29.8 km/seg. Puesto que la órbita es casi un círculo, su velocidad casi no varía, en toda su ruta. En el afelio la Tierra se mueve sólo 0.8 km/seg más despacio que en el perihelio.

La tercera ley de Kepler habla de la relación entre el período de un planeta y su distancia media al Sol. El período es el tiempo que tarda un planeta en completar una revolución alrededor del Sol. Para la Tierra, su período es de 365.26 días.

El Sol es un gigantesco horno rodeado de paredes gaseosas en el que, al cambiar su estructura interna, los cuerpos simples que lo forman producen un desprendimiento de energía en forma de luz y calor.

Los gases de la superficie del Sol poseen una temperatura que alcanza hasta los $6,000^{\circ}\text{C}$, emitiendo una luz muy brillante. En su interior, la temperatura del Sol es más alta, llegando hasta $20,000,000^{\circ}\text{C}$.

Debido a la proximidad de la Tierra con el Sol, podemos recibir de éste no sólo la energía lumínica, sino principalmente la calórica.

La radiación solar no nos llega uniformemente. Debido a la rotación de la Tierra, en las latitudes bajas y medias se suceden, dentro del término aproximado de 24 horas, un período de día con radiación solar, y otro período de noche con la ausencia de ésta. Además, como el movimiento de rotación tiene lugar alrededor de un eje inclinado sobre el plano del movimiento de traslación, las 4 estaciones suceden en latitudes medias en las que se alternan un período cálido y otro frío, con dos de temperaturas intermedias, y en las altas latitudes este mismo hecho da lugar a los días y noches de seis meses.

La naturaleza de las variaciones de la radiación solar, que motiva el cambio de estaciones, es debido, por tanto, a la inclinación del eje de rotación de la Tierra, y al movimiento de traslación. Ver fig 1.1.1.

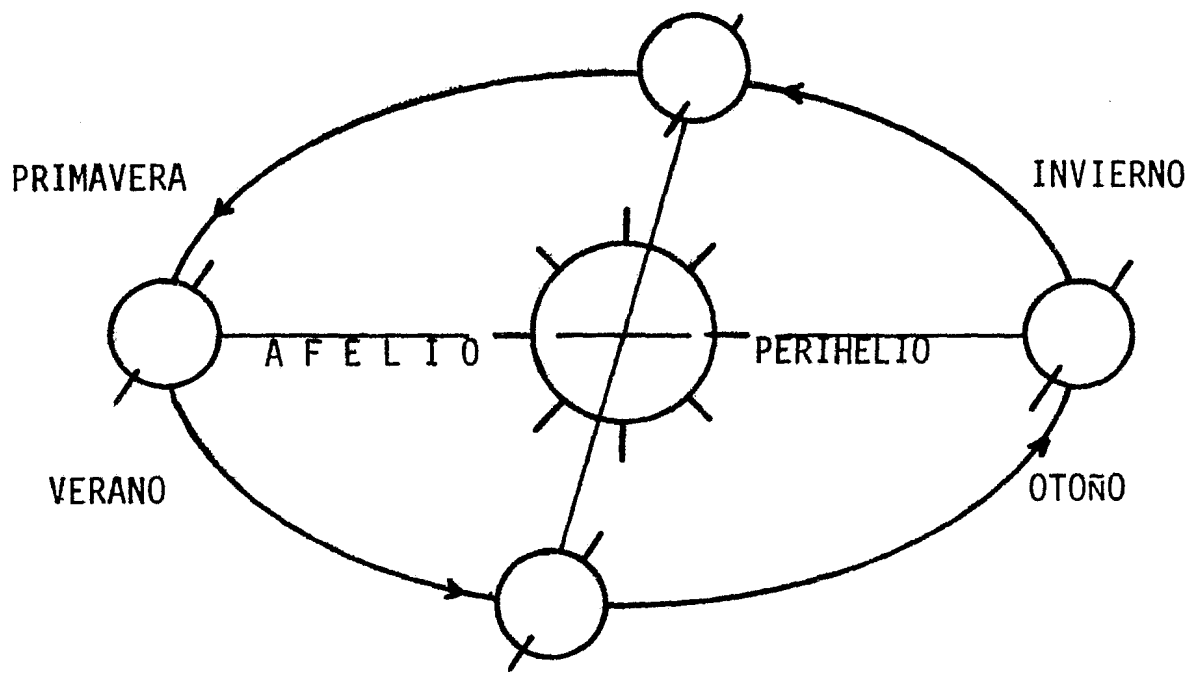


Fig 1.1.1 Movimiento de traslación de la Tierra y Estaciones del año.

Hablando estrictamente, todas las formas de energía provienen del Sol; las formas más comunes de energía, que son los combustibles a partir de fósiles, recibieron energía solar hace mucho tiempo y han cambiado sus características de tal manera que actualmente se encuentran en un alto grado de concentración. Pero este aparente almacenamiento de combustibles no es suficiente debido a que en la actualidad se están utilizando diferentes formas de energía concentrada en grandes cantidades. Esto implica que en un futuro no muy lejano, haya que utilizar nuevas formas de obtención de energía. Esto es, habrá que obtener energía que no se encuentra almacenada en la naturaleza, sino que se debe captar directamente de la fuente más poderosa que es el Sol.

La energía se define en la termodinámica clásica como la capacidad de realizar un trabajo. Desde un punto de vista práctico, constituye el ingrediente básico para las sociedades industrializadas. Antes de que las fuentes de energía no renovable se agoten, se debe incrementar el uso de fuentes permanentes de energía. Los tipos más significativos de estas fuentes son la energía nuclear y la energía solar. La energía nuclear requiere un alto grado de tecnología así como altos costos de operación y un alto grado de riesgo en su utilización. La energía solar representa una prometedora y conveniente fuente de energía sin la necesidad de los requerimientos de tan alta tecnología y con la facilidad de que su utilización pueda generalizarse; además no tiene efectos significativos de contaminación.

La energía solar es la fuente de energía permanente más abundante en el mundo. La suma total de energía solar que es interceptada por la atmósfera

fera de la Tierra es de 170 trillones de kilowatt, que es aproximadamente 5,000 veces mayor que la suma de todas las energías disponibles. De la energía recibida por el Sol, 30% es reflejada al espacio, 47% es convertida a baja temperatura y se radia al espacio, y 23% se convierte para el ciclo de evaporación/precipitación en la biosfera; menos de 1/2% se presenta en la energía cinética del viento y las olas y para la fotosíntesis en las plantas. La suma de la energía interceptada por la Tierra, por tanto, es solo una pequeña fracción- un mil de un millón - del total, radiada durante la conversión de 4 millones de toneladas por segundo de hidrógeno a helio en el Sol.

La energía solar es transmitida a través del espacio en forma de radiación electromagnética. Debido a que la energía es atenuada cuando penetra en la atmósfera de la Tierra, las dimensiones del sistema usado para convertir en calor la energía recibida son relativamente grandes. Los colectores de concentración tienden a reducir las pérdidas de calor al usar una pequeña área en el absorbedor, pero tienen el inconveniente de que sólo pueden aprovechar la radiación solar directa y que tienen que utilizar un mecanismo de seguimiento.

Debido a que la energía solar sólo está disponible durante el día, y durante períodos en los cuales el Sol no es oscurecido por las nubes, se requiere un medio que pueda proveer calor en forma continua. Actualmente la energía solar representa el único recurso de energía inextinguible que puede ser usada para suplir los incrementos en la demanda de energía de la sociedad en una forma económica, dado que estos incrementos necesarios son más difíciles de obtener por las fuentes de energía usadas conven

cionalmente. Hablando en forma comparativa, la energía recibida por la Tierra excede los requerimientos energéticos de la población mundial.

1.2 Determinación de los Parámetros Requeridos para la Medición de la Energía Solar Incidida

La composición de cualquier sistema de captación solar depende grandemente de la radiación de que puede disponer. La radiación solar se caracteriza por su variabilidad. Aún cuando es abundante, ésta varía durante el día alcanzando su máximo al medio día. Aún cuando el captador se esté moviendo continuamente hacia el Sol, sus cambios de altitud y el azimut hacen reducir el calor captado por debajo del máximo potencial. Las horas de luz de día también varían según la estación, siendo más cortas en el invierno, cuando las necesidades de energía son mayores, en el hemisferio norte. De lo anterior se deduce que la radiación solar recibida depende directamente de la posición en la que se encuentra el captador de energía respecto de la dirección de los rayos solares. Para poder obtener el máximo aprovechamiento de la energía solar es necesario determinar la posición de captación en un momento determinado, conocer ciertos ángulos que pueden ser medidos con respecto al lugar en estudio y de esta forma relacionar estos ángulos entre sí, para determinar la importancia que tiene cada uno de ellos.

A continuación se describen los ángulos que van a intervenir para poder determinar la cantidad de la radiación solar que puede incidir.

Latitud:

La situación geográfica de un lugar de la superficie terrestre puede determinarse por su distancia al norte o al sur de la línea del Ecuador. La latitud aumenta desde cero grados en el Ecuador hasta 90 grados al norte en el polo norte y hasta -90 grados al polo sur. Las líneas que sirven para indicar la latitud se denominan "paralelos" por ser éstos planos paralelos entre sí con respecto al Ecuador. La distancia de un grado de latitud en kilómetros es aproximadamente la misma cerca del Ecuador o de los polos. Sin embargo, la superficie terrestre es un poco más curva cerca del Ecuador que en las regiones polares, por lo que un grado de latitud en el Ecuador es un poco más corto (110.57 km) que un grado cercano al polo (110.70 km), siendo ambas distancias medidas sobre la superficie terrestre. Ver fig 1.2.1.

Declinación:

Se define como el ángulo que se forma con el plano del Ecuador y los rayos solares. Los cambios de estaciones son debidos a la inclinación del eje de rotación de la Tierra, que es de 23.45 grados, el cual debido al movimiento de traslación modifica su valor de declinación de $+23.45^\circ$ a -23.45° con respecto a los rayos solares. Un gran cambio en la radiación extraterrestre aparente es causada por la distancia a que se encuentra el Sol de la Tierra, por lo que se dan los cambios de estaciones, al variar la radiación incidida a través del espacio. Debido a lo anterior también existen cambios debidos a la altura del sol y a los ángulos azimutales relativos al colector solar, así como a los cambios de duración del tiempo

en que el Sol permanece en el horizonte. La declinación tiene un efecto importante sobre la radiación total que se recibe en cada punto geográfico. Ver fig 1.2.2.

Cuando la declinación adquiere un valor positivo, la Tierra empieza a mostrar el polo norte a los rayos solares y oculta el polo sur; esto sucede en la primavera y los valores cambian de 0° hasta + 23.45°. En verano, van de +23.45° hasta 0°. En otoño se modifica de 0° hasta -23.45°. Y, por último, en invierno comienza con -23.45 y finaliza con 0°. El ciclo completo de la declinación se cumple cada año por el movimiento de traslación de la Tierra. Por lo anterior, el casquete norte recibe menor cantidad de energía del Sol en invierno que el casquete sur, mientras que en verano sucede lo contrario.

La declinación dada en un año difiere de la del año anterior inmediatamente aproximadamente en un cuarto de día. Por eso cada cuatro años hay un factor de corrección, debido a que la declinación se repite exactamente igual en ciclos de cuatro años. El valor de la declinación en un día dado, se puede obtener a partir de tablas, medidas con anterioridad, o también utilizando la ecuación de Cooper, que es:

$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left\{ 360 \frac{284 + n}{365} \right\}$$

donde:

"n" (ND) es el día del año cuya declinación se desea conocer

"δ" (DELTA) es el ángulo de la declinación (en grados)

* Nota: La nomenclatura en paréntesis y con mayúsculas es la usada en los programas de cómputo.

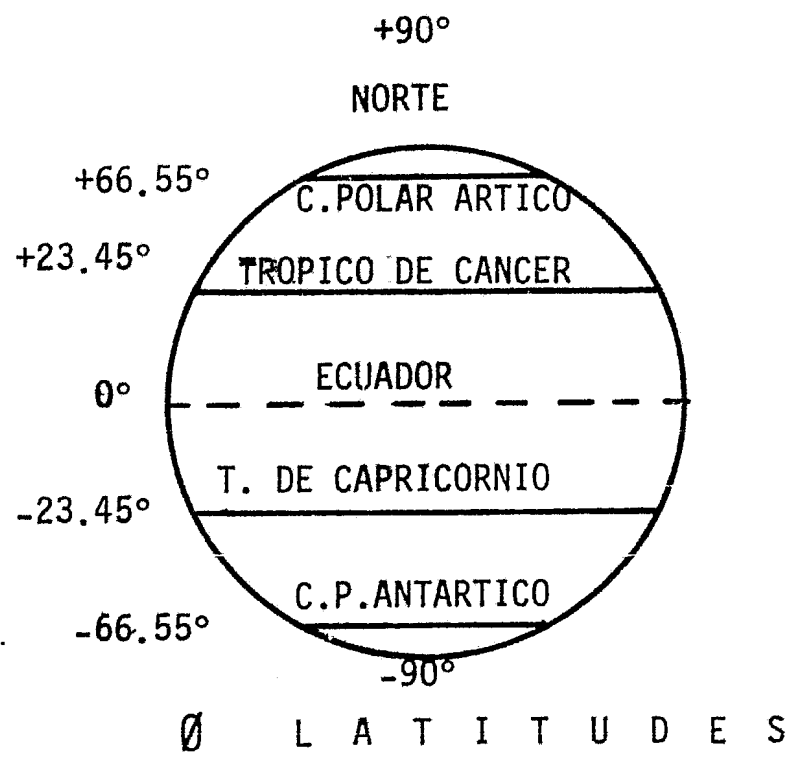


Fig 1.2.1 Latitud del lugar.

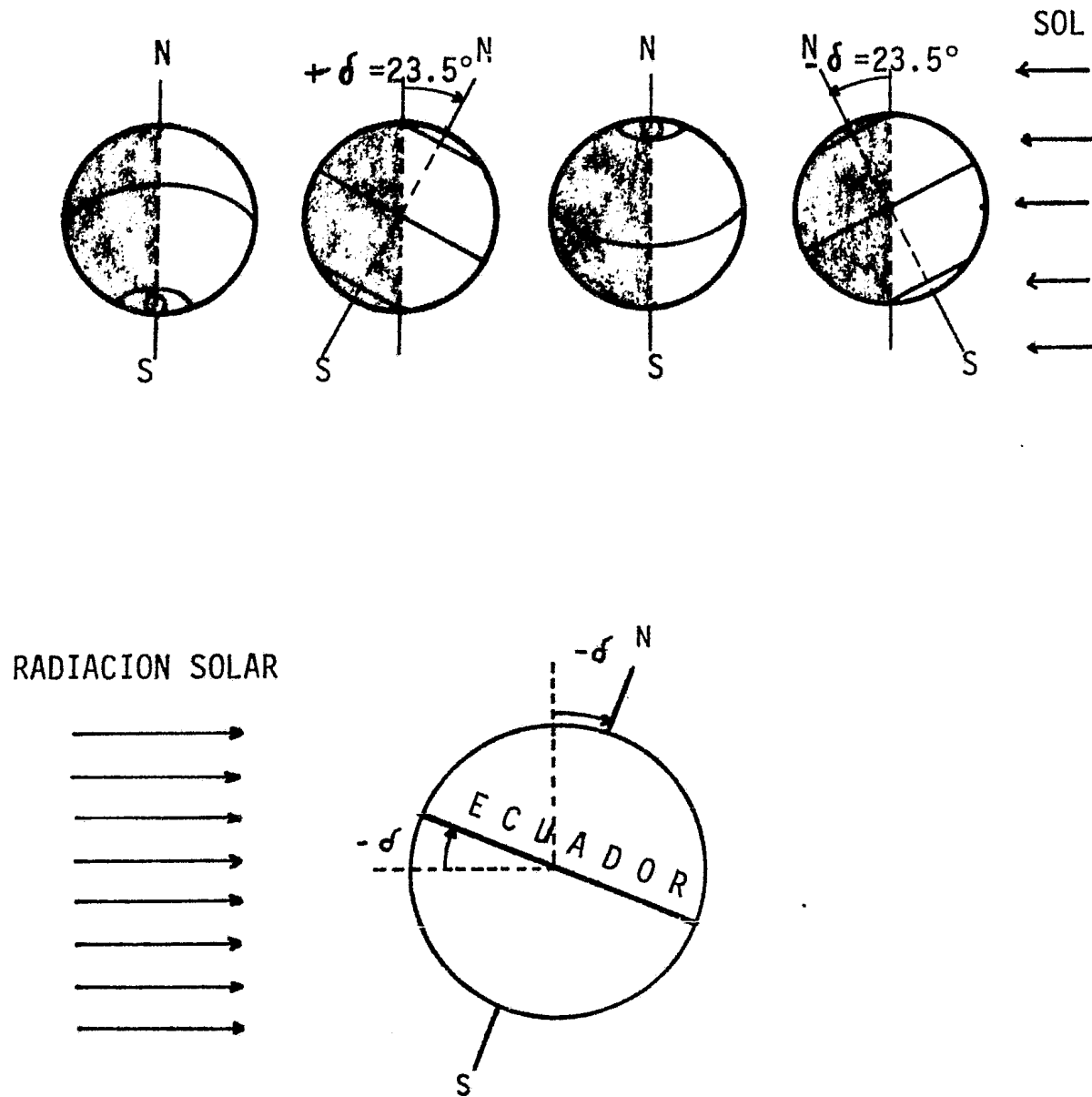


Fig 1.2.2. Declinación de la Tierra con respecto al Sol.

Largo del día:

Debido a la combinación de la declinación de la Tierra y la latitud del lugar geográfico en estudio, la radiación que se recibe en la Tierra va modificando la hora en que sale y se oculta el Sol en el horizonte del lugar en estudio a lo largo del año; se puede tener luz de día de 0 a 24 horas en los polos, mientras que en el Ecuador siempre dura 12 horas. Para encontrar cual es la longitud del día que corresponde a un lugar - sólo intervienen los ángulos de la latitud y la declinación. El valor de la duración del día se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$T_d = \frac{2}{15} \cos^{-1} \{-\tan\phi \tan \delta\}$$

donde:

- " ϕ " (FI) es la latitud del lugar
- " δ " (DELTA) es la declinación de la Tierra
- " T_d " (TD) largo del día (en horas)

Cuando la declinación es nula, la duración del día es de 12 hrs (en cualquier lugar), esto es, para el equinoccio de primavera y otoño. Cuando la declinación es máxima suceden los solsticios de verano e invierno.

Angulo horario:

Es el ángulo de rotación de la Tierra, que tiene una velocidad angular de giro constante y como eje de giro el eje polar, que es perpendicular al plano del Ecuador y completa una revolución cada 24 horas, es decir, cada hora gira 15° . Ver fig 1.2.3.

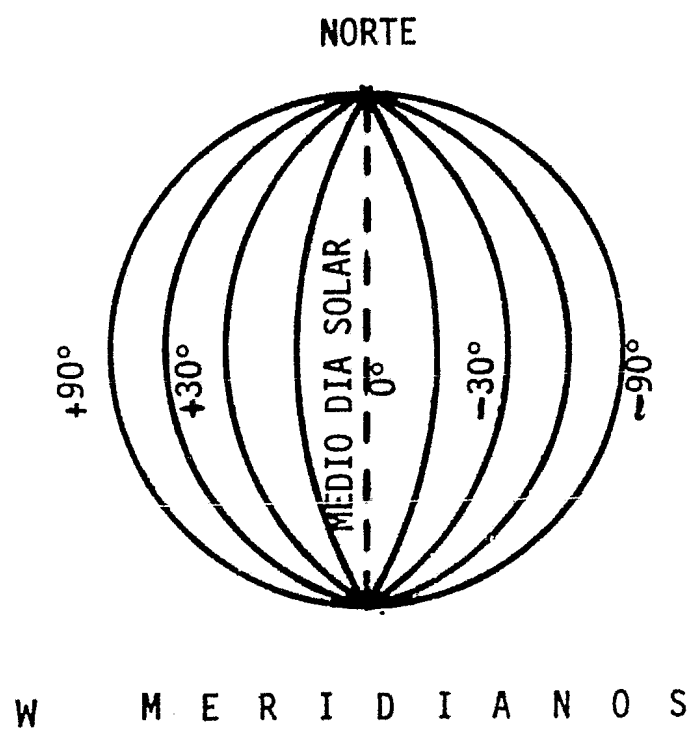


Fig 1.2.3 Angulo de rotación de la Tierra.

Para determinar este ángulo es necesario conocer la hora solar del lugar en estudio que corresponde a su meridiano. Por medio de la siguiente expresión matemática se obtiene directamente el valor correspondiente del ángulo horario en grados, teniendo que cumplir con la siguiente condi - ción: cuando el Sol apunta sobre la mitad del día solar, son las 12 ho - ras solares, el meridiano del lugar queda alineado al Sol y por tanto el ángulo horario es de cero grados. En las mañanas el valor del ángulo ho - rario es positivo (de + 180° a 0°) y por las tardes es negativo de (0° a -180°).

$$\omega = (12 - \text{hora}) \times 15$$

donde:

"hora" es el valor decimal de la hora solar (hrs)

" ω " es el ángulo horario (en grados)

Nótese que la hora solar no coincide con la hora local, ya que la Tierra se divide en 24 husos horarios y cada uno de éstos es de 15 grados de longitud. Se admite teóricamente que a la zona comprendida en un huso horario se le asigna la misma hora, además de que, por cuestiones polí - ticas, los países adelantan o atrasan la hora local. Una manera de obte - ner la hora solar es recurriendo a las cartas astronómicas.

Los ángulos anteriores nos permiten relacionar la zona geográfica " ϕ ", el movimiento de rotación " ω ", y el de traslación de la Tierra " δ " que - permiten conocer la posición del observador en esa zona geográfica con - respecto al Sol. De esta manera se puede calcular teóricamente el ángu - lo de incidencia de los rayos solares " θ " en el lugar considerado y a lo

largo del día.

Además existen otros ángulos importantes que no son geográficos y que corresponden al acomodo del captador. Ver fig 1.2.4.

El primero que se debe considerar es el ángulo de inclinación del captador con respecto a la superficie del lugar. "S" es el ángulo que se forma entre la superficie del lugar y el captador. Si el captador se levanta hacia el sur el ángulo es positivo, mientras que si se levanta hacia el norte es negativo.

El segundo es el ángulo azimutal " γ " que se forma entre la recta que une al Sol y el plano del meridiano del lugar en estudio. Si el Sol se encuentra hacia el este el ángulo azimutal es positivo, mientras que si se encuentra hacia el oeste es negativo. Este ángulo resulta del giro del captador sobre la superficie del lugar tomando como eje de giro la vertical del lugar y teniendo como referencia el eje sur.

Así, " γ " (GAMMA) es el ángulo azimutal (en grados)

"S" (S) es el ángulo de inclinación o del captador (en grados)

1.3 Tipos de Montura para Seguir la Trayectoria del Sol

En este capítulo se presenta la investigación que se realizó sobre los tipos de montura que normalmente se utilizan para seguir la trayectoria del Sol.

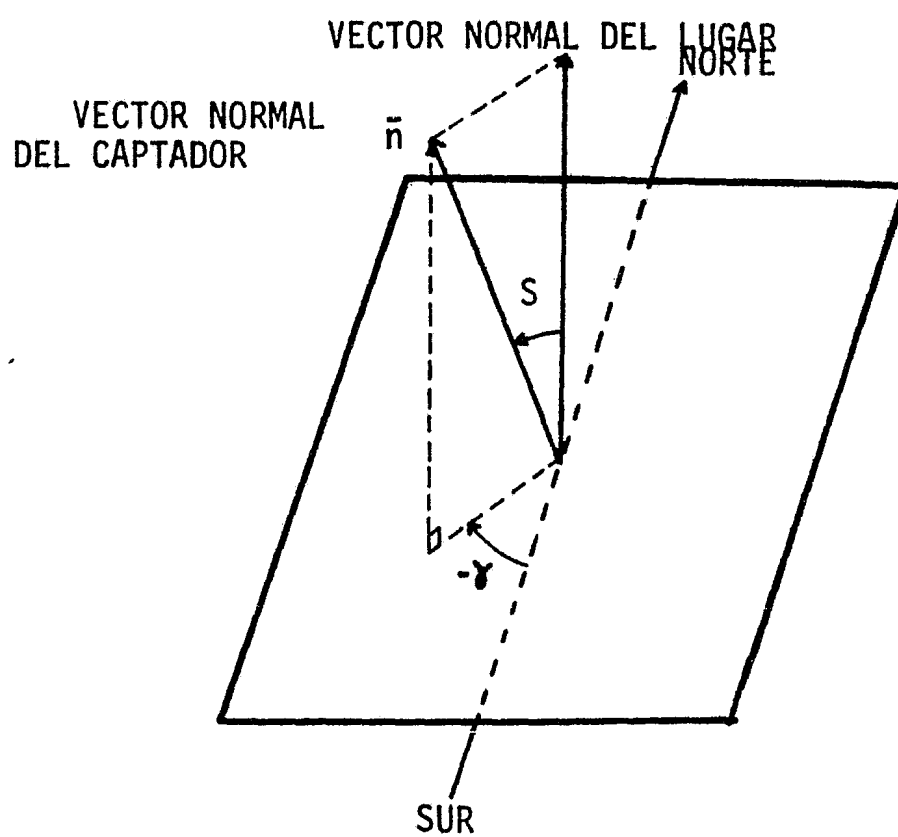


Fig 1.2.4 Angulos que intervienen en la colocación del captador.

Para comprobar el funcionamiento de estas monturas, se hizo un análisis matemático en función de los ángulos conocidos como: declinación, ángulo horario, latitud y movimientos del captador sobre la superficie del lugar. Véase la información en el punto 1.2.

Para aprovechar al máximo la radiación solar directa a lo largo del día, es necesario mover continuamente el plano de captación y tenerlo apuntado hacia el Sol. Para lograr lo anterior es necesario acoplar el captador a una estructura que forma una sola unidad a la que llamaremos montura. Una montura debe tener dos ejes de giro perfectamente determinados con la superficie del lugar. En el transcurso del tiempo los movimientos relativos de la Tierra con respecto al Sol harán que se modifique el ángulo de incidencia de los rayos solares con respecto al captador, por lo que será necesario ajustar continuamente los ejes de la montura para asegurar un seguimiento eficiente. La estructura que sostendrá al plano de captación en una posición perpendicular a los rayos del Sol, debe diseñarse para que se pueda dirigir a cualquier parte del cielo desde el horizonte hasta el zenit y hacia todo el azimut desde 0 - hasta 360 grados.

La unidad más sencilla para lograr lo anterior consiste en la combinación de un eje vertical y otro horizontal. Este tipo de montura es la llamada azimutal, pero no se puede usar para seguimientos prolongados - del movimiento del Sol, puesto que implicaría ajustar continuamente los dos ejes de la estructura. Ver fig 1.3.1.

La montura ecuatorial está especialmente diseñada para seguir el movimiento de una estrella, en nuestro caso el Sol, por períodos prolongados de tiempo haciendo un solo ajuste en el eje del ángulo horario de la montura. La montura debe girarse debido al movimiento de rotación, cuya velocidad angular constante es de 15 grados por hora. La montura ecuatorial consta de dos ejes perpendiculares: en el eje polar, que se coloca en posición paralela al eje de rotación de la Tierra, se corrige el ángulo horario (su movimiento va del este al oeste); el segundo eje es conocido como eje de la declinación y se ajusta una vez cada día. Ver fig 1.3.2.

Al analizar la posición del Sol en un día y tomando la superficie horizontal como referencia, se ve que la trayectoria del Sol es curva y que cada día se modifica debido al cambio de la declinación.

Un inconveniente de la montura azimutal es que para seguir al Sol se tendrán que ajustar sus dos ejes a la vez y a diferentes velocidades angulares, que son variables a lo largo del día y de un día al otro.

La gran ventaja de la montura ecuatorial consiste en que se ajusta la declinación del día en estudio y solo es necesario hacer el giro del ángulo horario a una velocidad angular constante de 15 grados por hora, que equivalen a una vuelta por día en sentido contrario al de la rotación de la Tierra.

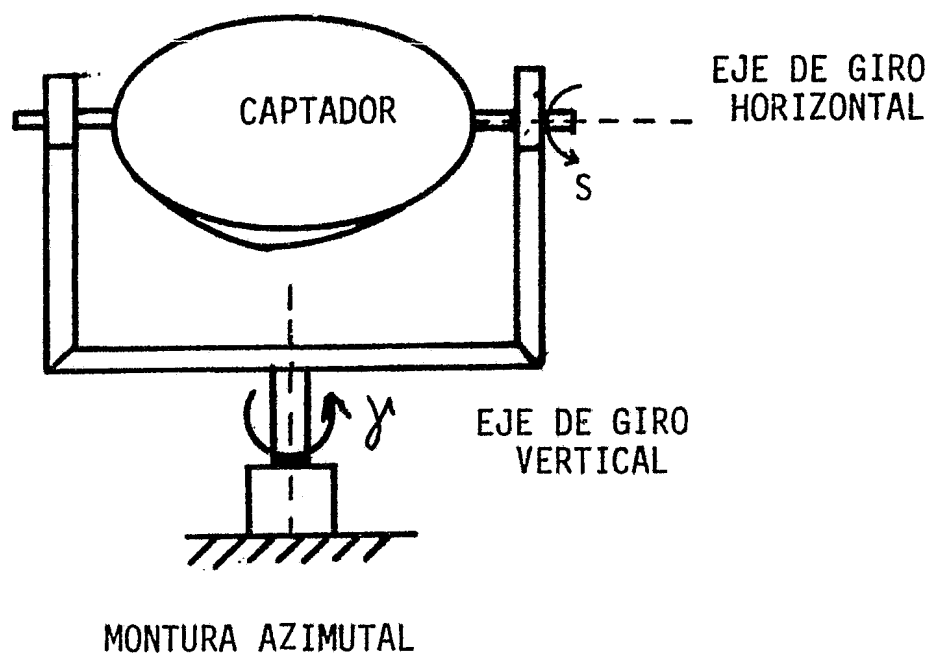


Fig 1.3.1 Montura azimutal

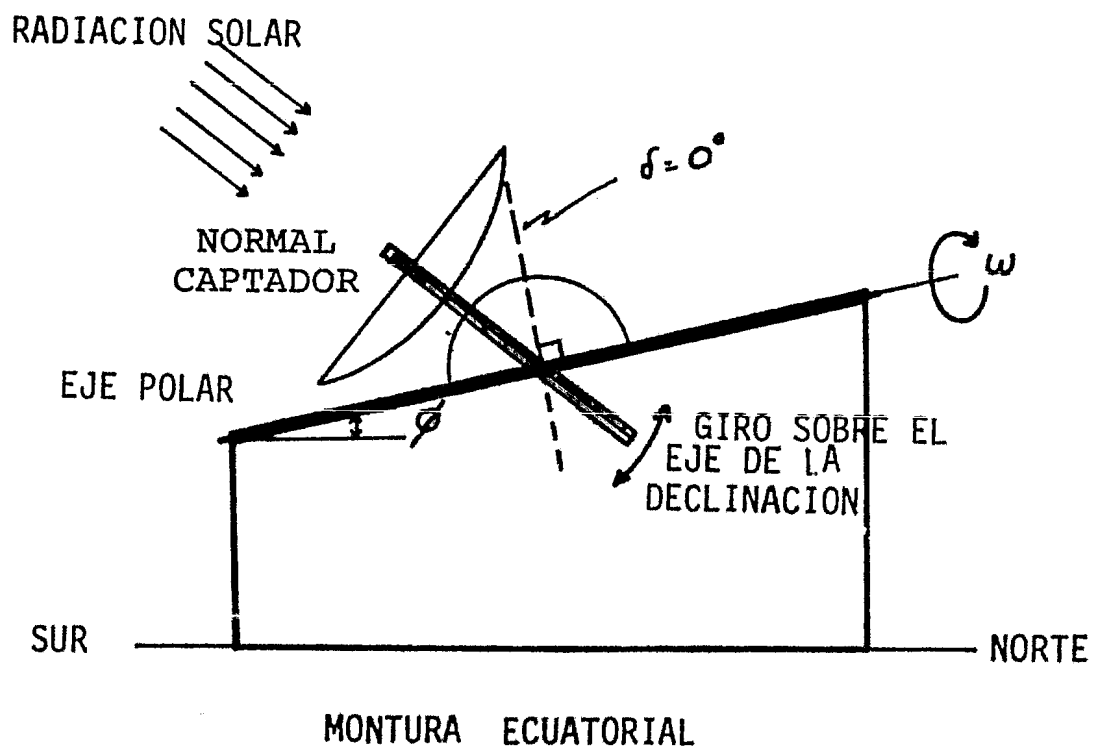


Fig 1.3.2 Montura ecuatorial

1.4 Análisis Vectorial de la Captación de la Energía Solar

El procedimiento seguido para la determinación teórica del ángulo de incidencia θ de los rayos solares con respecto al plano de captación queda definido por los ángulos de declinación δ , el ángulo horario ω , la latitud ϕ , ángulo de inclinación del captador β , y ángulo azimutal γ .

En el análisis matemático se utiliza el cálculo vectorial, que consiste en dar la dirección del plano de captación en función de los puntos geográficos (meridianos, paralelos) y los movimientos sobre la superficie horizontal del lugar, tomando en cuenta los tres ejes ortogonales de referencia. En este caso, los rayos solares tienen la dirección del primer eje de referencia, es decir, $\{1,0,0\}$.

La secuencia de cálculo consistirá en ir encontrando los vectores que definen la dirección del plano del captador dando los movimientos angulares uno a la vez. Veremos que esto está modificando la dirección del captador con los rayos solares, pero conociendo esta dirección se podrá determinar el ángulo de incidencia, que se encuentra con cualquier eje de referencia.

Los vectores se forman cartesianamente, es decir con las proyecciones del vector en estudio sobre los ejes de referencia. El vector está compuesto de magnitud, sentido y dirección. Si la magnitud es unitaria el vector definirá la dirección cartesiana con los tres ejes de referencia. La incidencia de los rayos solares está determinada por la primer componente de los vectores de posición.

El primer ángulo involucrado debido a la inclinación del eje y a la traslación de la Tierra es la declinación. El vector V_1 corresponde a la dirección vertical sobre el círculo ecuatorial, en el lugar del observa - dor. Ver fig 1.4.1

$$V_1 = \{1,0,0\} \cos(-\delta) + \{0,0,1\} \sin(-\delta)$$

$$V_1 = \{\cos(-\delta), 0, \sin(-\delta)\}$$

También se puede obtener la dirección del eje de rotación de la Tierra

$$V_{EJE} = \{0,0,1\} \cos(-\delta) - \{1,0,0\} \sin(-\delta)$$

$$V_{EJE} = \{-\sin(-\delta), 0, \cos(-\delta)\}$$

El vector V_2 es la dirección de una línea contenida en el plano ecuato - rial, pasando por el centro de la Tierra y formando un ángulo ω con res - pecto a la dirección vertical (o de V_1). Ver fig 1.4.2.

ω queda definido por:

$$\omega = (12 - \text{hora}) \times 15$$

donde:

ω es positivo en las mañanas.

Ver figura para el vector V_2 .

El vector V_1 coincide con la vertical en el Ecuador. El ángulo δ que de fine la declinación es el ángulo formado entre la dirección de los rayos solares al mediodía y la dirección de V_1 . Ver fig 1.4.1.

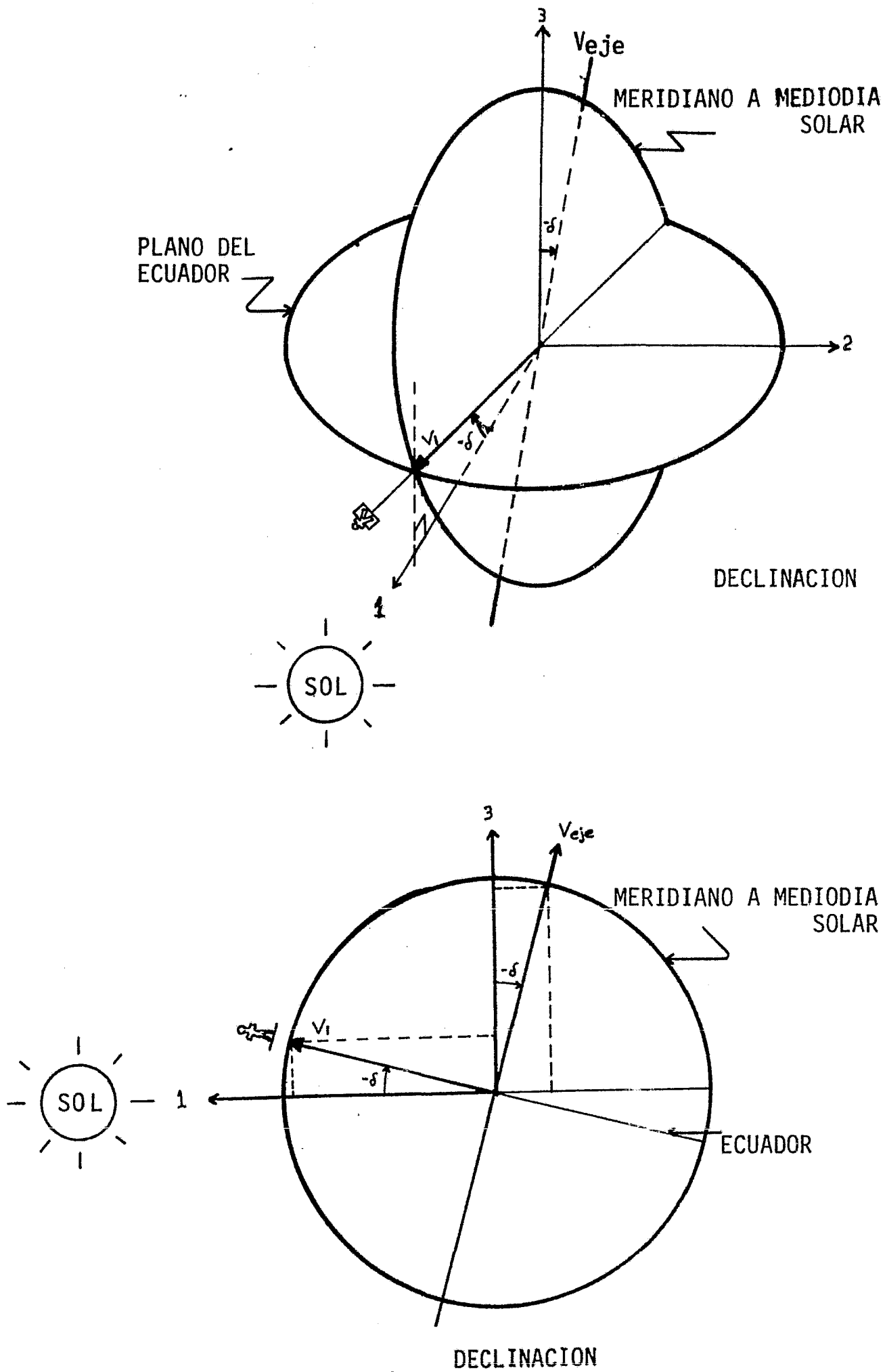


Fig 1.4.1 Declinación de la Tierra con respecto al Sol definido por la dirección del Vector V_1 .

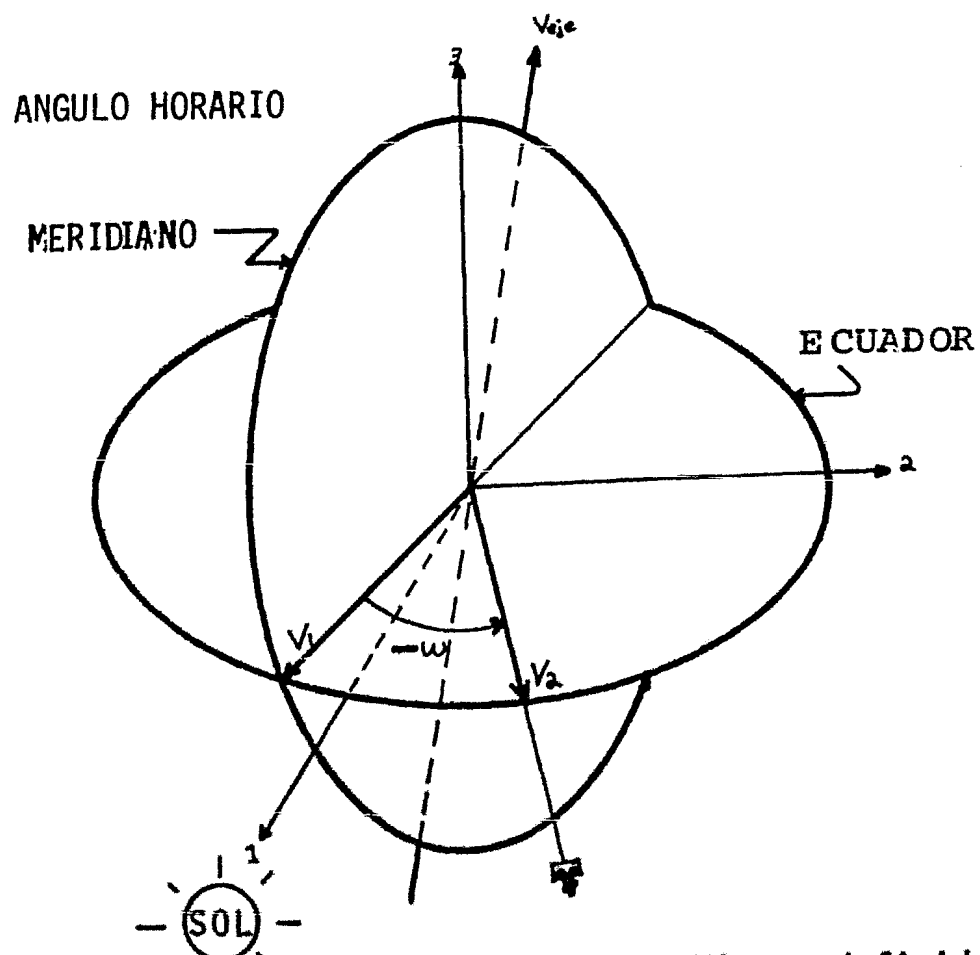
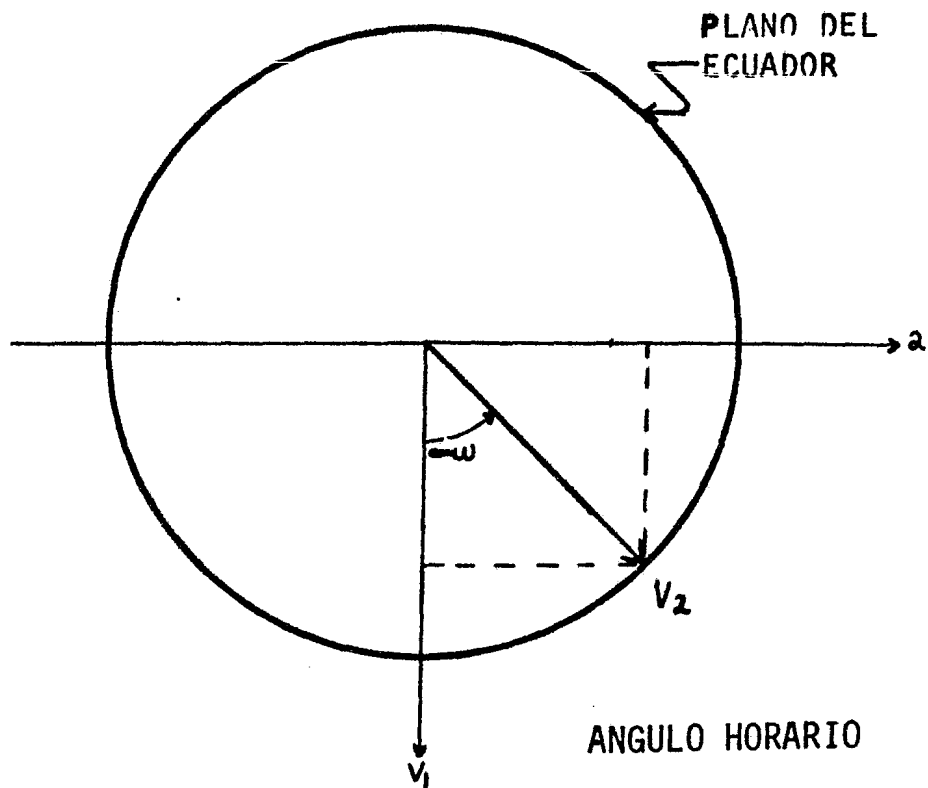


Fig 1.4.2 'Angulo de rotación de la Tierra definido por la dirección del vector V_2 .

El vector V_2 pasa, como el vector V_1 , por el centro de la Tierra, y está contenido en el plano del Ecuador; su dirección se determina midiendo un ángulo igual a ω , en sentido contrario a la rotación de la Tierra (o sea, $-\omega$) entre las posiciones de V_1 y V_2 .

$$V_2 = \{V_1\} \cos(-\omega) + \{0,1,0\} \operatorname{sen}(-\omega)$$

$$V_2 = \{\cos(-\delta) \cos(-\omega), \operatorname{sen}(-\omega), \operatorname{sen}(-\delta) \cos(-\omega)\}$$

La latitud cambia subiendo o bajando sobre el plano del meridiano, siendo positiva hacia el polo norte y negativa hacia el polo sur. En el Ecuador, por consiguiente, la latitud es cero. Ver figura 1.4.3

$$V_4 = \{V_2\} \cos \phi + \{V_{EJE}\} \operatorname{sen} \phi$$

$$V_4 = \left[\begin{array}{l} \cos(-\delta) \cos(-\omega) \cos \phi - \operatorname{sen}(-\delta) \operatorname{sen} \phi, \\ , \operatorname{sen}(-\omega) \cos \phi, \\ , \operatorname{sen}(-\delta) \cos(-\omega) \cos \phi + \cos(-\delta) \operatorname{sen} \phi \end{array} \right]$$

Si sobre el meridiano se inclina el captador un ángulo S , quedará determinado el vector V_3 . Ver fig 1.4.4.

$$V_3 = \left[\begin{array}{l} \cos(-\delta) \cos(-\omega) \cos(\phi-S) - \operatorname{sen}(-\delta) \operatorname{sen}(\phi-S), \operatorname{sen}(-\omega) \cos(\phi-S), \\ , \operatorname{sen}(-\delta) \cos(-\omega) \cos(\phi-S) + \cos(-\delta) \operatorname{sen}(\phi-S) \end{array} \right]$$

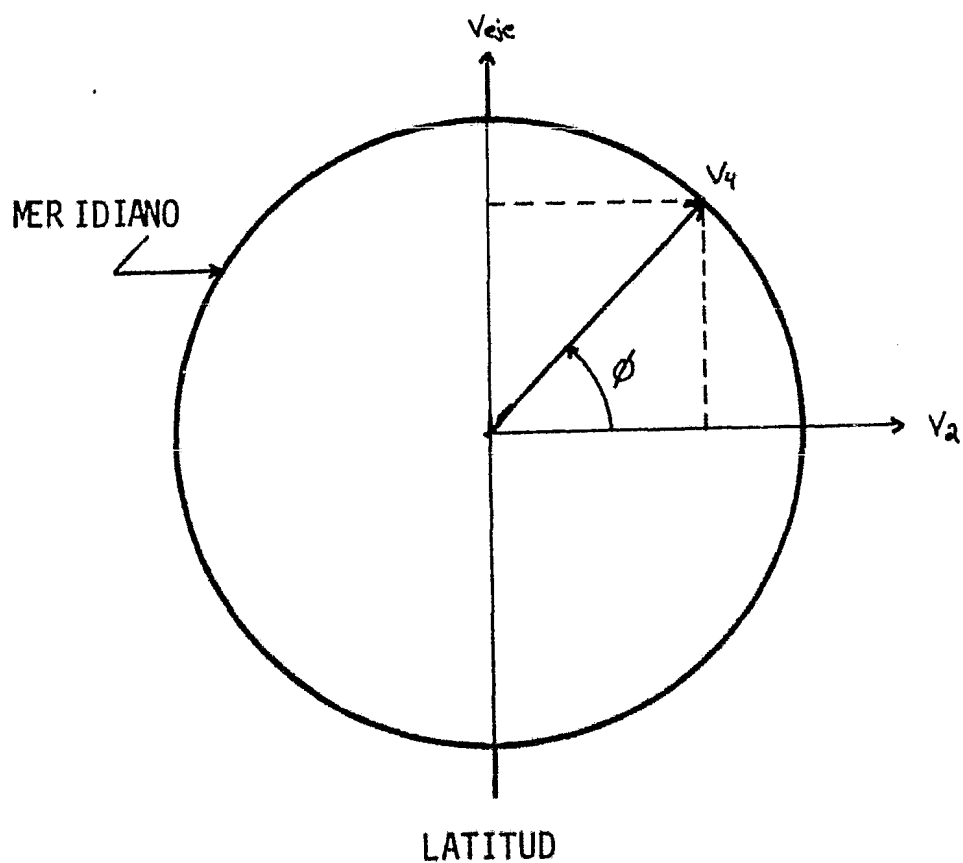
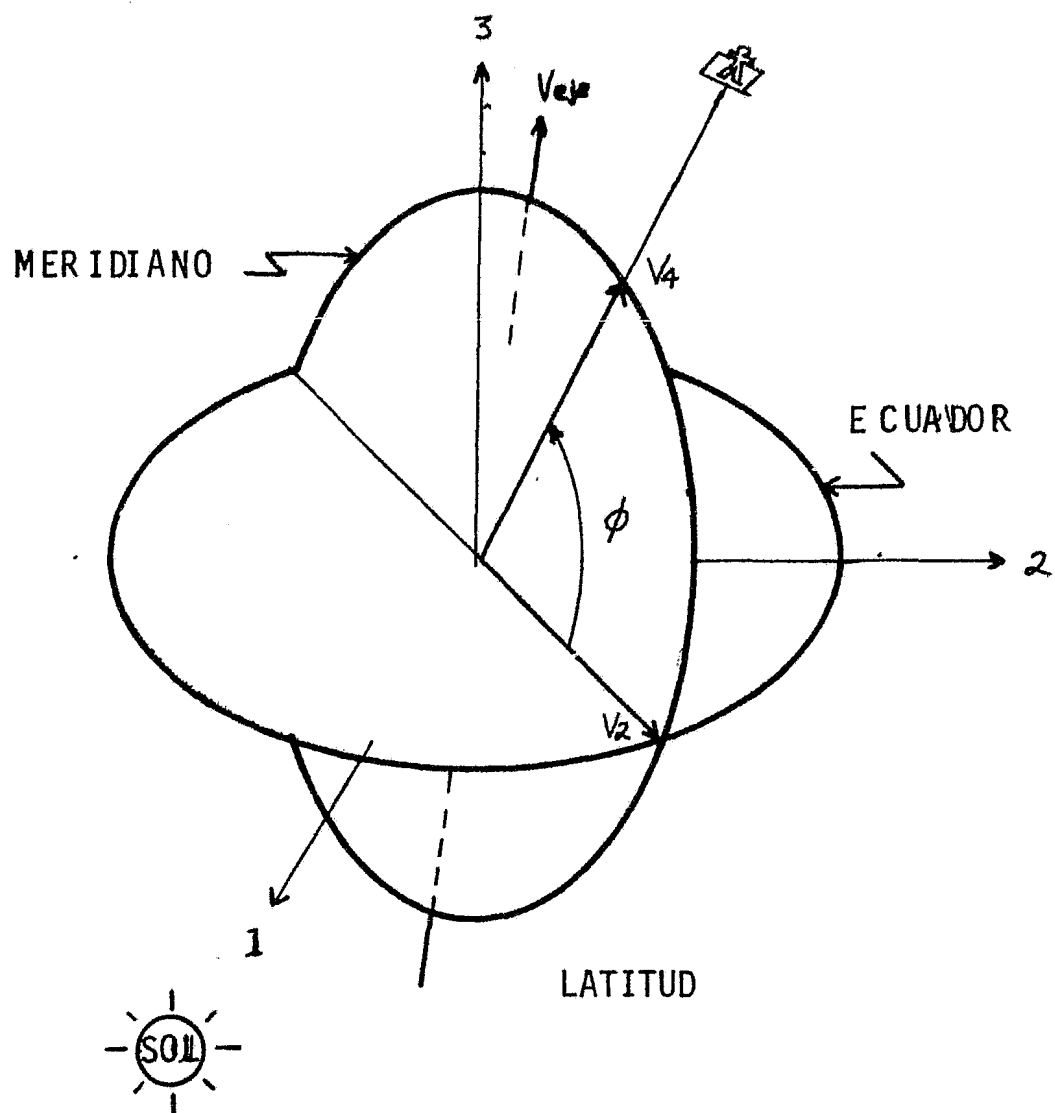


Fig 1.4.3 Latitud del lugar en estudio definida por la direcci3n del Vector V_4 .

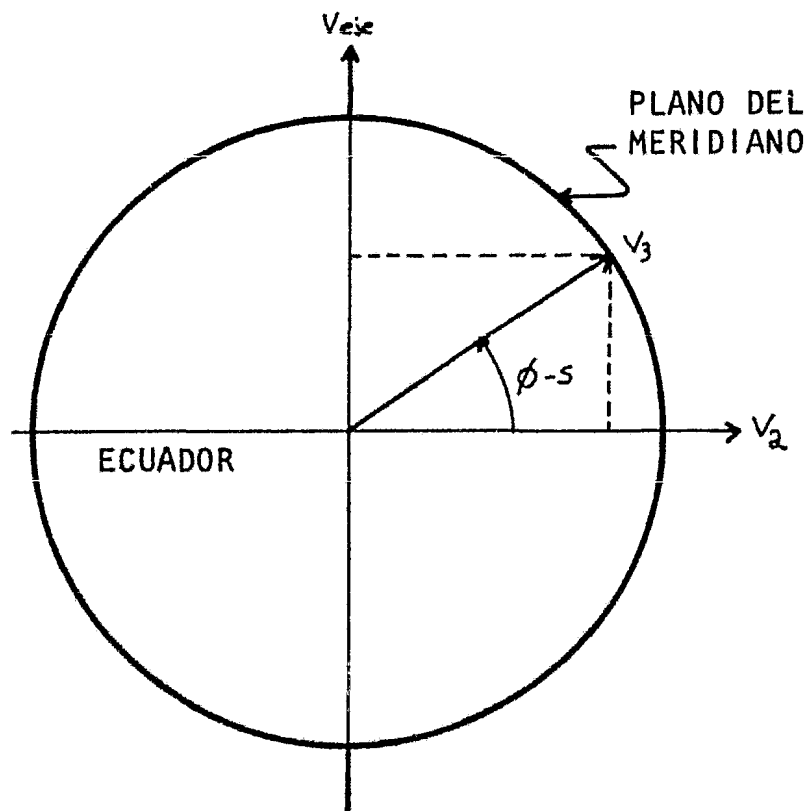
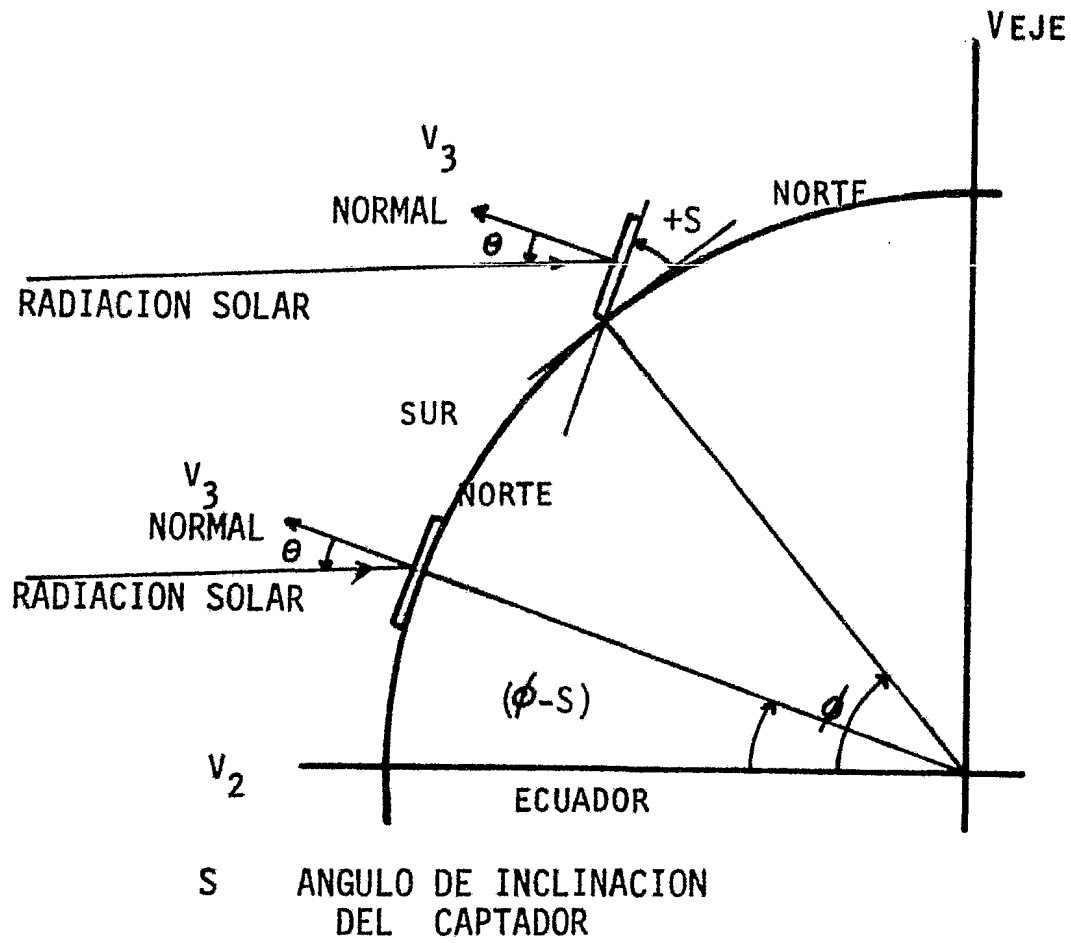


Fig 1.4.4 El vector V_3 define la dirección del captador al inclinarse hacia el norte o hacia el sur en el lugar en estudio.

Para mover el captador sobre la superficie horizontal del lugar es necesario tener las referencias de los puntos cardinales, en este caso el vector norte y el vector oeste.

El vector oeste es perpendicular al vector vertical del lugar V_2 y perpendicular al eje de la Tierra V_{EJE} . Se observa mediante el producto cruz entre vectores. Ver fig 1.4.5

$$V_{OESTE} = \{V_2\} \times \{V_{EJE}\}$$

$$V_{OESTE} = \{\cos(-\delta) \operatorname{sen}(-\omega), -\cos(-\omega), \operatorname{sen}(-\delta) \operatorname{sen}(-\omega)\}$$

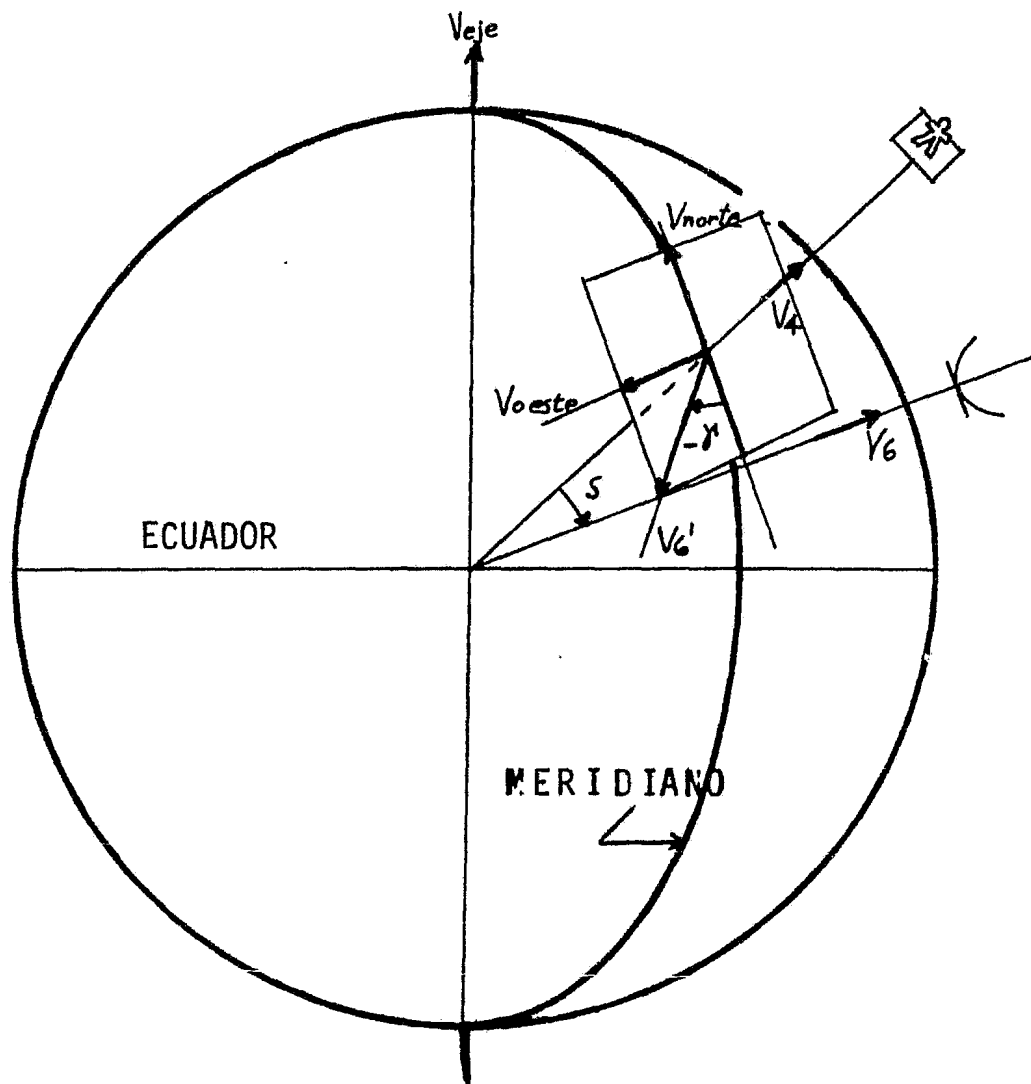
A su vez el vector norte es perpendicular a la normal del lugar V_4 y perpendicular al vector oeste V_{OESTE} .

$$V_{NORTE} = \{V_{OESTE}\} \times \{V_4\}$$

$$V_{NORTE} = \left[\begin{array}{l} -\operatorname{sen}(-\delta) \cos \phi - \cos(-\delta) \cos(-\omega) \operatorname{sen} \phi, \\ , -\operatorname{sen}(-\omega) \operatorname{sen} \phi, \\ , \cos(-\delta) \cos \phi - \operatorname{sen}(-\delta) \cos(-\omega) \operatorname{sen} \phi \end{array} \right]$$

Al mover el captador sólo el ángulo S , el vector que define la dirección es el V_3 , anteriormente descrito.

Si además de inclinar el captador el ángulo S se hace girar sobre la superficie del lugar, se obtiene el movimiento azimutal γ . El giro azimutal γ hacia el este es positivo y hacia el oeste es negativo con el origen en la dirección del sur. Ver fig 1.4.5.



S ANGULO DE INCLINACION DEL CAPTADOR
 γ ANGULO AZIMUTAL " "

Fig 1.4.5 Movimientos del captador sobre la superficie del lugar en estudio. La normal del captador queda definida por la dirección del vector V_6 .

La dirección del captador en función de los ángulos δ , ω , ϕ , S y γ corresponde al vector V_6 que se calcula a continuación:

$$V_6 = \{V_4\} \cos(+S) + \{V_6'\} \sin(+S)$$

A su vez:

$$V_6' = - \{V_{\text{NORTE}}\} \cos(-\gamma) + \{V_{\text{OESTE}}\} \sin(-\gamma)$$

Sustituyendo la anterior:

$$V_6 = \{V_4\} \cos(+S) - \{V_{\text{NORTE}}\} \cos(-\gamma) \sin(+S) + \{V_{\text{OESTE}}\} \sin(-\gamma) \sin(+S)$$

El vector normal del plano de captación resulta:

$$\begin{aligned} V_6 = & \cos(-\delta) \cos(-\omega) \cos\phi \cos(+S) - \sin(-\delta) \sin\phi \cos(+S) + \\ & + \cos(-\delta) \sin(-\omega) \sin(+S) \sin(-\gamma) + \sin(-\delta) \cos\phi \sin(+S) \cos(-\gamma) + \\ & + \cos(-\delta) \cos(-\omega) \sin\phi \sin(+S) \cos(-\gamma) , \\ & \sin(-\omega) \cos\phi \cos(+S) + \sin(-\omega) \sin\phi \sin(+S) \cos(-\gamma) + \\ & - \cos(-\omega) \sin(+S) \sin(-\gamma), \\ & \sin(-\delta) \cos(-\omega) \cos\phi \cos(+S) + \cos(-\delta) \sin\phi \cos(+S) + \\ & + \sin(-\delta) \cos(-\omega) \sin\phi \sin(+S) \cos(-\gamma) + \\ & - \cos(-\delta) \cos\phi \sin(+S) \cos(-\gamma) + \\ & + \sin(-\delta) \sin(-\omega) \sin(+S) \sin(-\gamma) \end{aligned}$$

Al hacer los giros del captador se encuentra su dirección, ver fig. 1.4.5.

El ángulo de incidencia θ de los rayos solares se obtiene mediante el producto punto entre los vectores V_6 y $\{1,0,0\}$, dando por resultado la primer componente del vector V_6 .

Aplicando las siguientes identidades trigonométricas:

$$\text{sen } (-A) = - \text{sen } A$$

$$\text{cos } (-B) = \text{cos } B$$

y sustituyendo sobre la primer componente del vector resulta:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } \delta \quad \text{sen} \phi \quad \cos S \\ & - \text{sen } \delta \quad \text{cos} \phi \quad \text{sen } S \quad \cos \gamma \\ & + \cos \delta \quad \cos \omega \quad \text{cos} \phi \quad \cos S \\ & + \cos \delta \quad \cos \omega \quad \text{sen} \phi \quad \text{sen } S \quad \cos \gamma \\ & + \cos \delta \quad \text{sen } \omega \quad \text{sen } S \quad \text{sen } \gamma \end{aligned} \quad (1.4.1)$$

donde:

θ es el ángulo que se forma entre la dirección de los rayos solares y la normal del captador.

Anteriormente mencionamos en forma separada los ángulos que definen la posición del captador. El objetivo final de este análisis consiste en relacionar todos los ángulos que definirán la dirección del captador para poder determinar el ángulo de incidencia " θ " que existe entre los rayos solares y la normal del captador.

La ecuación que define el ángulo de incidencia de los rayos solares " θ " nos proporciona un valor numérico que queda en función de la rotación " ω ", la traslación " δ ", la latitud " ϕ " y los giros del captador sobre la superficie del lugar " σ " y " γ ". Ver ecuación 1.4.1.

1.5 Análisis Vectorial de las Monturas

1.5.1 Montura azimutal

Ahora podemos observar que corrigiendo los ángulos σ , γ el plano de captación se puede apuntar hacia el Sol. Esto se logra mediante una montura azimutal que consta de dos ejes: uno vertical y el otro horizontal, para hacer el ajuste de los ángulos γ y σ respectivamente.

Conocemos el vector vertical del lugar V_4 y la dirección $\{1, 0, 0\}$ de los rayos solares, así como el ángulo formado entre ellos, que es el ángulo σ .

$$\cos \sigma = V_4 \cdot \{1, 0, 0\}$$

$$\cos \sigma = \cos(-\delta) \cos(-\omega) \cos\phi - \sin(-\delta) \sin\phi$$

Para encontrar el ángulo γ necesitamos conocer un vector perpendicular a los anteriores

$$V_7 = \{1, 0, 0\} \times \{V_4\}$$

$$V_7 = \frac{1}{|V_7|} \left[0, -\sin(-\delta) \cos(-\omega) \cos\phi - \cos(-\delta) \sin\phi, \sin(-\omega) \cos\phi \right]$$

A su vez la magnitud de este vector es:

$$|V_7| = \sin \sigma$$

El ángulo formado entre el vector V_7 y el vector sur $\{-V_{\text{NORTE}}\}$ es $(90 - \gamma)$ y resolviendo el producto escalar encontraremos el ángulo γ

$$\cos(90 - \gamma) = \text{sen } \gamma$$

$$\text{sen } \gamma = \{-V_{\text{NORTE}}\} \cdot \{V_7\}$$

sustituyendo y desarrollando lo anterior:

$$\text{sen } \gamma = \frac{\text{sen } \omega \cos \delta}{\text{sen } S}$$

Los valores del ángulo γ encontrados están referidos al eje sur.

Para encontrar los valores de S y γ que cumplan con las condiciones (S es positivo hacia el sur, γ hacia el sur vale cero y hacia el este es positivo) se deben utilizar las siguientes ecuaciones:

Definimos el valor de A como el resultado del producto escalar entre el vector norte $\{V_{\text{NORTE}}\}$ y la dirección de los rayos solares. A adquiere valor positivo cuando el captador tiene proyección hacia el norte y es negativo cuando tiene proyección hacia el sur. El valor de A sirve para modificar el signo del ángulo S .

$$A = \{V_{\text{NORTE}}\} \cdot \{1, 0, 0\}$$

$$A = \text{sen } \delta \cos \phi - \cos \delta \text{ sen } \phi \cos \omega \quad (1.5.1)$$

$$\cos S = - \frac{A}{\text{ABS}|A|} \left[\text{ang } \cos (\cos \delta \cos \omega \cos \phi + \text{sen } \delta \text{ sen } \phi) \right] \quad (1.5.2)$$

$$\gamma = \text{ang } \text{sen} \left(\frac{\text{sen } \omega \cos \delta}{\text{sen } S} \right) \quad (1.5.3)$$

Para seguir la trayectoria del Sol con la montura azimital es necesario ajustar continuamente los ángulos δ y γ a lo largo del día con los valores calculados continuamente en las ecuaciones 1.5.1, 1.5.2, y 1.5.3. Un ejemplo de este tipo de montura se muestra en la fig 1.5.1

Existe otro tipo de montura la cual consta de dos ejes perpendiculares. Uno de ellos tiene la misma dirección del eje de rotación de la Tierra o eje polar, y para lograr esto el eje debe pertenecer al meridiano del lugar y levantarse, con respecto al plano horizontal, el equivalente a la latitud del lugar hacia el sur.

Con el eje polar de la montura se ajusta continuamente el ángulo horario a una velocidad angular constante de 15 grados por hora que corresponde al movimiento de rotación de la Tierra, pero en sentido contrario. Lo anterior se hace con el objeto de contrarrestar el movimiento de la Tierra con respecto al Sol.

El otro eje de la montura que es perpendicular al eje polar es el eje de la declinación, el cual requiere de un ajuste diario para poder seguir la trayectoria del Sol. Esto es válido porque la inclinación del eje de la Tierra varía muy poco de un día a otro con respecto al Sol.

Para comprobar lo anterior a continuación se detalla el desarrollo vectorial que simula una montura ecuatorial; pero esto se logra al efectuar los siguientes tres pasos.

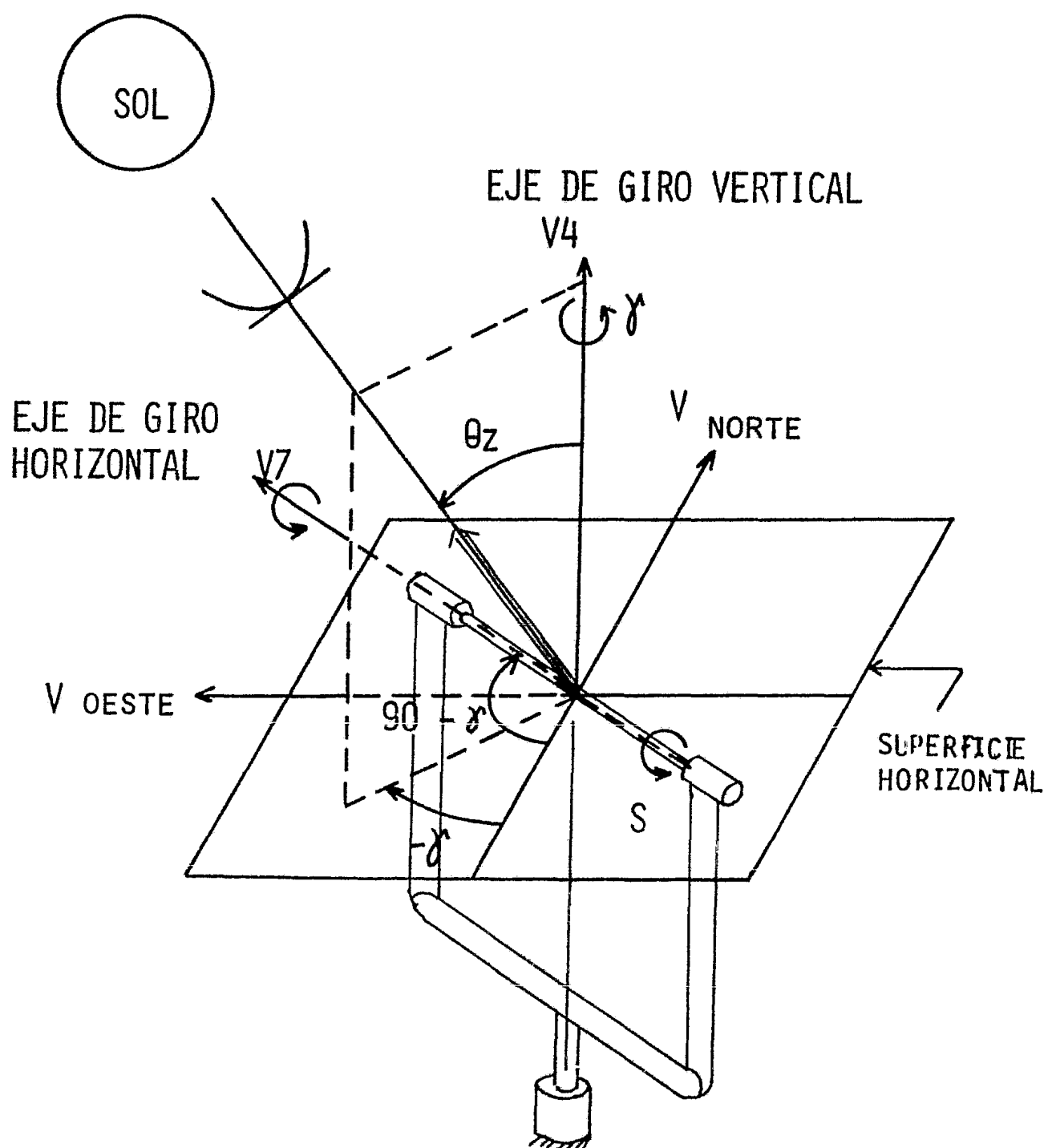


Fig 1.5.1. MONTURA AZIMUTAL

El eje polar de la montura debe ser paralelo al eje de la Tierra. De este modo para la latitud deseada es necesario levantar el eje norte el equivalente al ángulo de la latitud del lugar hacia el sur. Con este movimiento se observa que el captador que tenía la dirección vertical del lugar o la dirección del vector V_4 , adquiere la dirección vertical del Ecuador o la dirección del vector V_2 , esto es,

$$V_2 = \{V_{EJE}\} \times \{V_{OESTE}\}$$

V_2 es el vector que define la dirección del plano del captador sin involucrar el ángulo de giro ω de la montura, y cuando la declinación en la montura se encuentre a cero grados $\delta = 0$.

A continuación el vector V_2 se verá afectado por los movimientos de la montura; el primer movimiento, que es el ángulo horario y que consiste en hacer el giro ω sobre el eje polar, hará que la dirección del vector V_2 cambie. A este vector se le llamará V_8 . Posteriormente el vector V_8 se modificará por el movimiento de la declinación sobre el eje de la declinación de la montura y el vector resultante V_9 será la dirección del plano de captación final a los movimientos del ángulo horario y de la declinación en la montura ecuatorial. Ver figura 1.5.2.1.

$$V_8 = \{V_2\} \cos(+\omega) - \{V_{OESTE}\} \text{sen} (+\omega)$$

y sustituyendo:

$$V_8 = \{\cos(-\delta), 0, \text{sen}(-\delta)\}$$

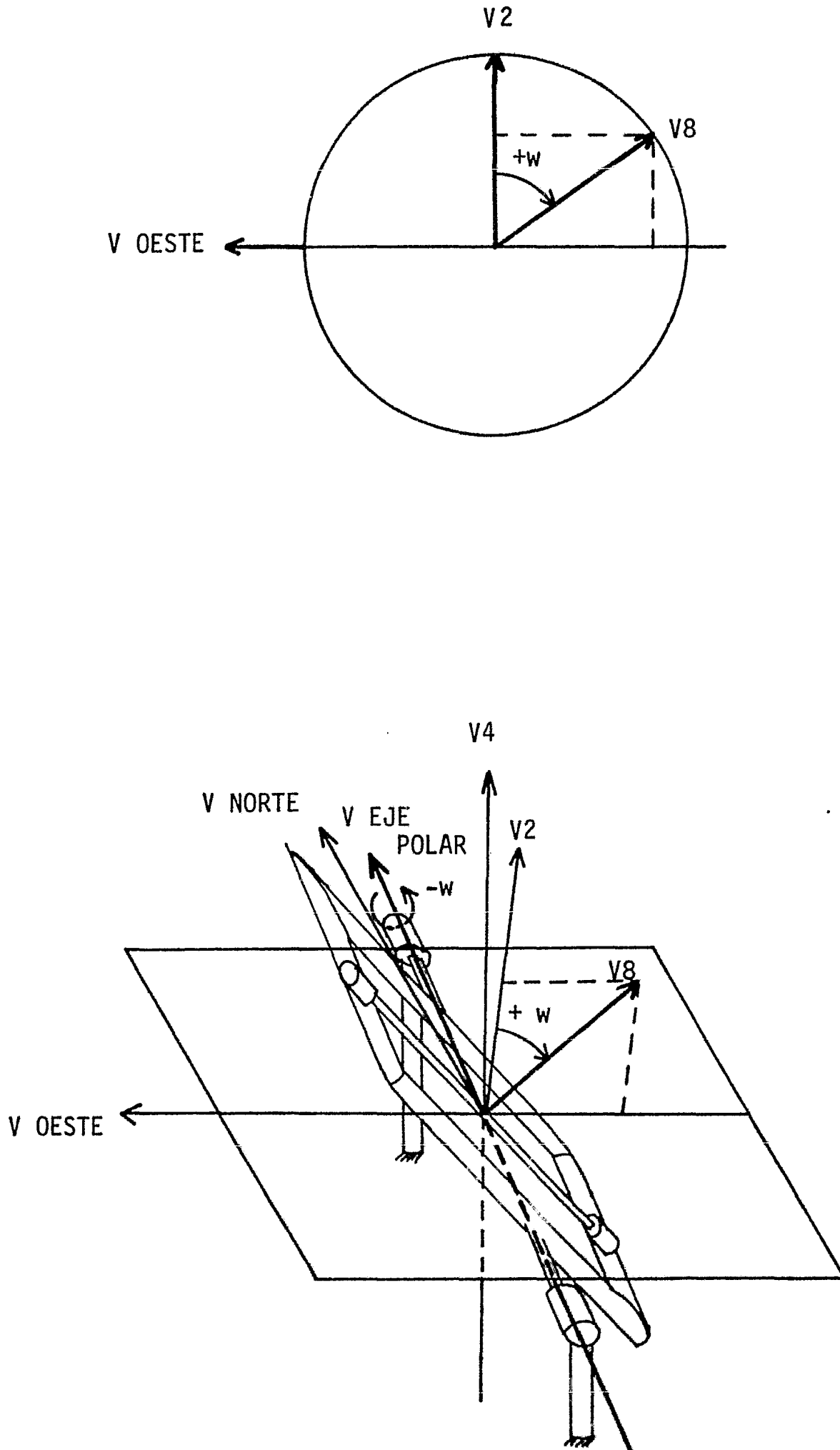


Fig 1.5.2.1 MONTURA ECUATORIAL

Ver figura 1.5.2.2.

$$V_9 = \{V_8\} \cos(-\delta) - \{V_{EJE}\} \operatorname{sen}(-\delta)$$

finalmente:

$$V_9 = \{1, 0, 0\}$$

Nótese que la dirección del plano de captación es la misma que la dirección de los rayos solares, por lo que el ángulo de incidencia es de cero grados.

Póngase atención en el hecho de que hay que ajustar diariamente la declinación en la montura ecuatorial y el ángulo horario ω debe girarse a velocidad constante del este hacia el oeste.

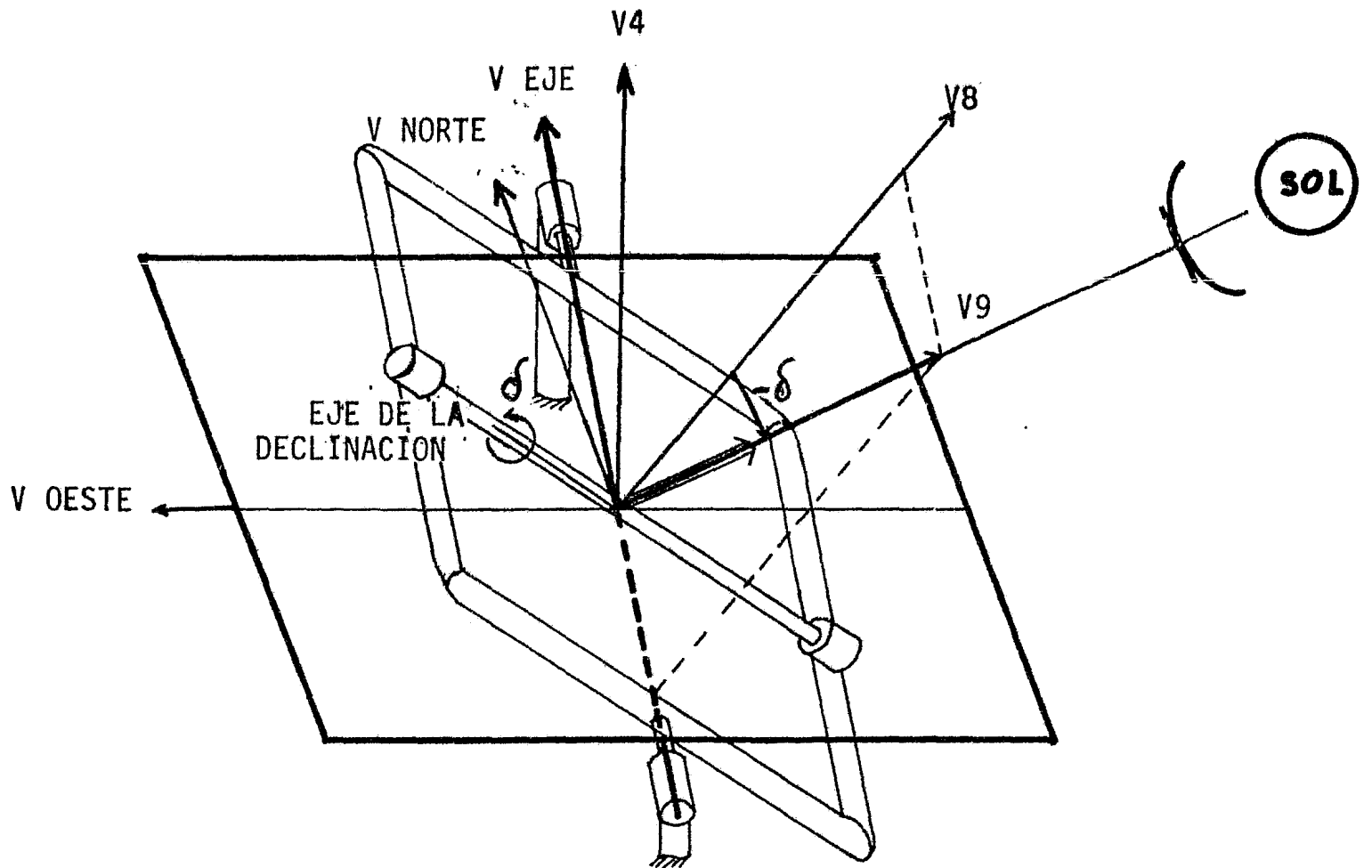
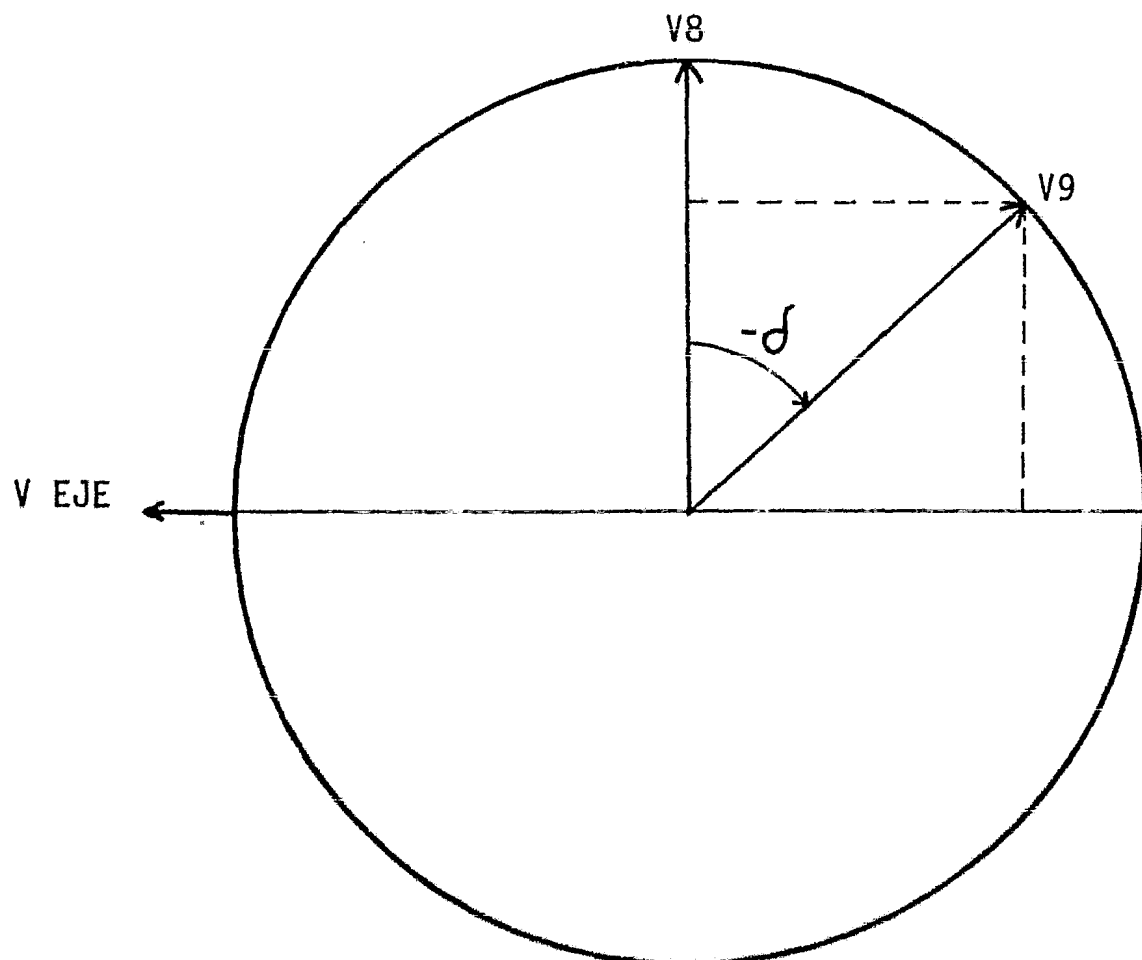


Fig 1.5.2.2 MONTURA ECUATORIAL



2. COMPORTAMIENTO DE LA RADIACION SOLAR A LO LARGO DEL DIA

2.1 Características de la Radiación Solar

La estructura y características del Sol determinan la naturaleza de la energía que es radiada hacia el espacio. El Sol es una esfera de materia gaseosa de alta intensidad cuyo diámetro es de 1.39×10^6 Km. En su superficie la temperatura es de 5762°K . La temperatura es transmitida fuera de la superficie y posteriormente radiada hacia el espacio. La radiación básica en el Sol se encuentra entre los rayos X y GAMMA del espectro de ondas electromagnéticas.

Debido a la excentricidad de la órbita de la Tierra, la distancia entre esta y el Sol varía 3%. A la distancia de una unidad astronómica, que es la distancia media entre la Tierra y el Sol, el Sol puede verse desde la Tierra con un ángulo de 32 minutos, según lo muestra la fi

gura 3.3.1. Las características del Sol y sus relaciones espaciales con la Tierra traen como resultado los cambios en la intensidad de la radiación solar aún fuera de la atmósfera de la Tierra. La constante solar "Isc" es la energía que proviene del Sol por unidad de tiempo - recibida en un área unitaria cuya superficie es perpendicular a la radiación en el espacio, a la distancia media entre la Tierra y el Sol. El valor de "Isc" se ha estimado con una diferencia de $\pm 1.5\%$ como 1353 W/m^2 . Este valor es producto de numerosas mediciones de la radiación directa a través de la atmósfera con diferentes ángulos de zenit; de este modo, las diferencias medidas entre ellas son directamente causadas por la atenuación debida a la atmósfera. Estas mediciones han sido confirmadas por observaciones hechas por cohetes, globos y pruebas espaciales.

La radiación extraterrestre del Sol se aproxima a la radiación de un cuerpo negro a 5762°K , pero también en las mediciones se muestran picos y valles en el espectro de la incandescencia de los gases del Sol. El valor de la constante solar varía sobre un pequeño porcentaje en función del tiempo, debido a que no se han podido comprender bien los fenómenos astronómicos, pero esas variaciones se han podido promediar a través de un gran número de mediciones. La radiación solar aparente I_0 varía a lo largo del año dependiendo de la distancia entre el Sol y la Tierra, siendo aproximadamente 3.5% mayor que la Isc en enero y 3.5% menor en junio. La radiación solar aparente se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$I_0 = I_{sc} \left\{ 1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \times N}{370} \right) \right\}$$

donde

"n" es el día del año.

La radiación con una incidencia normal recibida en la superficie de la Tierra está sujeta a variaciones debidas a la distancia entre el Sol y la Tierra, a las variaciones en la atmósfera debido al esparcimiento de moléculas de aire, de vapor de agua y polvo, y también por las variaciones en la absorción de la atmósfera por O_2 , O_3 , agua y CO_2 . Nótese que la presión atmosférica, la masa de aire, la concentración de polvo y el vapor de agua entre otros, afectan de una manera exponencial para la determinación de la radiación incidida. Debido a los componentes de la atmósfera existe una porción de la energía solar que se dispersa, alcanza el suelo y posibilita la existencia de la radiación difusa, aún en períodos de cielo sumamente limpio.

La radiación difusa puede definirse como la radiación recibida del Sol después de que su dirección ha sido cambiada por la reflexión, la dispersión y la disipación en la atmósfera.

La radiación directa a su vez se define, como la radiación incidida del Sol, sin ningún cambio de dirección.

En suma, puede decirse que la radiación total recibida en la Tierra es la suma de sus componentes: directa y difusa. Como puede observarse, la componente directa de la radiación se ve afectada por la disminución de energía que llega a través de la atmósfera, pero depende también de la posición del plano de captación, es decir, si se logra apuntar el plano hacia el Sol es posible obtener la máxima radiación directa

ta.

El ángulo de incidencia de los rayos solares θ queda en función de los ángulos δ , ω , ϕ , S ; γ que son los que determinan la posición del plano de captación sobre la superficie de la Tierra (ver capítulo 1.2). Supóngase en este caso que el plano de captación se encuentra sobre el lugar con el ángulo S de abatimiento y el ángulo de azimut γ deseado.

Existe un factor de corrección que depende del ángulo θ formado entre la radiación solar, la normal del plano de captación y el ángulo θ_z formado entre la dirección de la radiación solar y la vertical del lugar, ver fig 2.1.1.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

donde R_b es el factor de corrección para poder determinar la radiación directa que incide en el plano de captación conociendo la radiación directa incidida en la superficie horizontal del lugar.

Y

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \omega \cos \phi + \sin \delta \sin \phi$$

Para calcular la radiación total H_t incidida sobre la superficie horizontal del lugar se calcula como la suma de la radiación directa y difusa medidas sobre el plano horizontal, y se expresa de la siguiente forma:

$$H_t' = H_b R_b + H_d$$

$$H_t = H_b + H_d$$

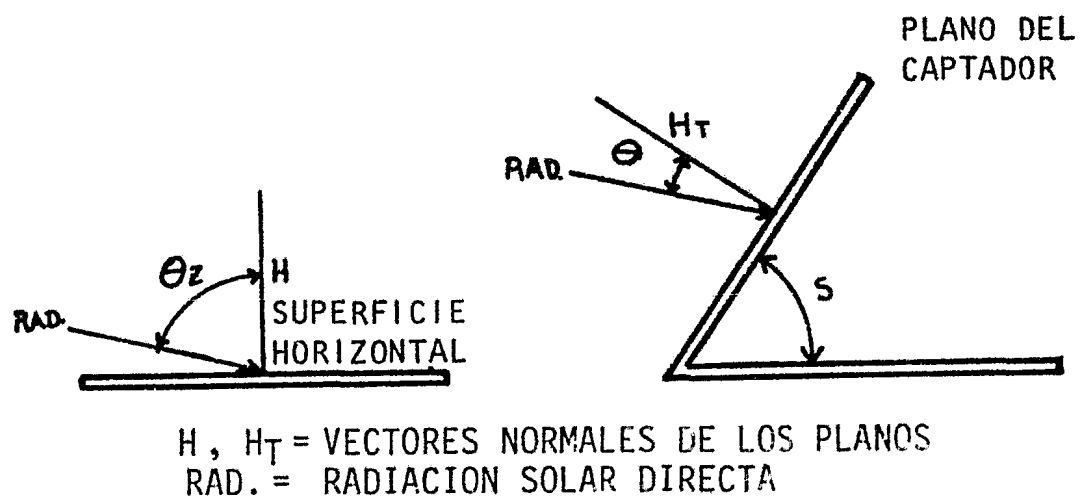


Fig 2.1.1 Angulos de incidencia de la radiación solar sobre la superficie horizontal y sobre el plano de captación.

donde

Ht es la radiación total recibida en la superficie horizontal

Hd es la radiación difusa recibida en la superficie horizontal

Hb es la radiación directa recibida en la superficie horizontal

Hb Rb es la radiación directa que incide en el plano de captación

Ht' es la radiación total que incide en el plano de captación

Debido a que la radiación total y la difusa solo pueden medirse con los medidores de radiación, se calculará la radiación directa. De los valores obtenidos por las mediciones se calculan los valores promedio de la radiación recibida, siendo HtM la radiación total promedio medida a lo largo del día y HdM el promedio de la radiación difusa.

La radiación total incidida sobre el plano horizontal (Ht) se puede calcular a lo largo del día solar, quedando en función de la siguientes ecuaciones:

$$H_t = H_{tM} \times \cos \left(\omega \frac{12}{T_d} \right)$$

de igual forma: (para la radiación difusa)

$$H_d = H_{dM} \times \cos \left(\omega \frac{12}{T_d} \right)$$

donde ω es dada en grados dado por $-\frac{T_d}{2} 15 \leq \omega \leq \frac{T_d}{2} 15$.

Para obtener finalmente la radiación directa en el plano horizontal, Hb se calcula conociendo tanto la radiación total como la difusa: haciendo su diferencia

$$H_b = (H_t - H_d)$$

$$H_b = (H_{tM} - H_{dM}) \cos \left(\omega \frac{12}{T_d} \right)$$

de otra forma:

$$H_b = H_{bmax} \cos \left(\omega \frac{12}{T_d} \right)$$

donde H_{bmax} es el valor de la radiación directa promedio calculada a lo largo del día.

El ángulo de incidencia θ entre los rayos solares y la normal del plano de captación relaciona la radiación directa que viene del Sol H_I y la radiación directa H_{bRb} que incide en el plano de captación:

$$H_{bRb} = H_I \cos \theta$$

despejando y sustituyendo los valores de H_{bRb} se obtiene la radiación

H_I :

$$H_I = \frac{H_{bmax} \cos \left(\omega \frac{12}{T_d} \right)}{\cos \theta}$$

donde H_I es la radiación directa que viene del Sol en $\{\text{Watts/m}^2\}$. A

su vez:

$$H_I = \frac{H_b \cos \theta}{\cos \theta} = \frac{H_b}{\cos \theta}$$

Además, siguiendo al Sol con la montura ecuatorial y acoplando los medidores junto con el plano de captación, la energía que viene del Sol, será la energía incidida sobre ellos, siendo $\cos \theta = 1$.

$$HI = (H_b R_b) \text{ con seguimiento}$$

Hasta este momento sólo se ha representado la radiación que incide sobre la Tierra, pero sin tomar en cuenta los efectos causados por la atmósfera como son la refracción, la absorción, la dispersión, etc de la radiación solar.

Tomando en consideración algunas de las mediciones obtenidas en el Instituto de Ingeniería (Ciudad Universitaria, D.F.) se puede ajustar la curva de radiación teórica total H_t que es senoidal elevándola a la potencia de 1.5, obteniendo así una buena representación teórica comparada con la real. Este exponente compensa todas las pérdidas de radiación debidas a la atmósfera. Calculamos "HI" en función de "Hb medida".

La radiación directa HI en la Ciudad de México quedaría representada por:

$$HI = \frac{H_{bmax} \cos^{1.5} \left(\omega \frac{12}{T_d} \right)}{\cos \delta \cos \omega \cos \phi + \sin \delta \sin \phi}$$

donde: la radiación directa medida sobre la superficie horizontal

"Hb medida" es representada como:

$$H_{bmedida} = H_{bmax} \cos^{1.5} \left(\omega \frac{12}{T_d} \right)$$

3. SUPERFICIE REFLEJANTE

3.1 Objetivo de la Superficie Reflejante

Como se plantea anteriormente, uno de los objetivos de este proyecto es lograr la concentración de los rayos solares en un punto para lo cual es necesario aprovechar una propiedad física de los espejos que consiste en que el mayor porcentaje de luz y calor (ondas electromagnéticas) que incide sobre ellos es reflejado y por lo tanto puede ser utilizado. La ineficiencia del espejo radica en que la parte restante de la energía la absorbe y la transmite.

Lo que se busca es lograr una alta concentración de energía, para lo cual los espejos deberán ser colocados sobre una parábola de revolución, para que adquieran esta forma geométrica, dando la posibilidad de reflejar los rayos solares que incidan sobre el espejo hacia el punto focal de la parábola.

El acomodamiento de las superficies reflejantes se puede hacer de dos formas: la primera sería la obtención de un solo espejo de geometría parabólica y la segunda consistiría en ir armando la superficie reflejante sobre una parábola con espejos fraccionados. Para el primer caso se necesita una tecnología muy desarrollada para que se puedan construir espejos de gran tamaño y de una sola pieza, lo que tendría el inconveniente de que los costos para la fabricación del espejo serían muy elevados. Además tendría otras desventajas relacionadas con los esfuerzos mecánicos a que sería cometida cuando se apuntara hacia el Sol debido a la dilatación térmica. Por lo anterior resulta más ventajoso el segundo caso que consiste en lo siguiente: se construye una parábola y sobre su superficie se pegan espejos de dimensiones pequeñas que la cubren completamente, obteniéndose finalmente un espejo parabólico fraccionado que para los fines que se persiguen puede tener una concentración tan eficiente como un espejo de una sola pieza, pero a un costo más bajo.

En el caso que nos ocupa se contó con un espejo parabólico de una sola pieza y de una calidad excelente, del cual se obtuvo un molde de fibra de vidrio sobre el cual se fabricó el modelo final de la parábola que se está utilizando (su diámetro es de 1.6 metros).

La parábola que se obtuvo tiene poco espesor, por lo que fue necesario fabricarle unos soportes de madera formando una estructura con el fin de darle la resistencia requerida y evitar así que se deforme y vaya perdiendo precisión en el punto focal.

3.2 La Parábola de Revolución para obtener Concentración en un punto

Como se mencionó anteriormente, se obtuvo una parábola de fibra de vidrio. Fue necesario conocer sus características para cuantificar la cantidad de superficie reflejante que se requiere para la parábola con espejos fraccionados y localizar el foco de la misma.

Primeramente se obtuvieron ciertos valores a partir de mediciones hechas en el modelo real. Fueron medidos ciertos puntos para obtener la ecuación de la parábola en estudio. Las mediciones fueron las siguientes.

Puntos	X	Y	ΣY	ΣX^2
A	0	0	0.9955	2.586
B	0.1	0.005		
C	0.2	0.016		
D	0.3	0.0345		
E	0.4	0.062		
F	0.5	0.096		
G	0.6	0.137		
H	0.7	0.186		
I	0.76	0.219		
J	0.78	0.24		

Valores en metros

Con los puntos que se seleccionaron en las mediciones anteriores, estuvieron dadas desde la altura máxima hasta la mínima. De esta forma se puede determinar la ecuación de la curva en el origen de los ejes coordenados haciendo las siguientes consideraciones: la ecuación será de la forma:

$$Y = K X^2$$

Despejando "K" de la ecuación anterior y poniendo en función de la sumatoria de los puntos obtenidos de la medición, se tendrá:

$$K = \frac{\sum Y}{\sum X^2}$$

y resolviendo la ecuación se tiene que

$$K = 0.3849 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

por lo que la ecuación que representa a la parábola será finalmente

$$Y = 0.3849 X^2$$

Conocida la ecuación de la parábola se puede determinar los siguientes parámetros:

Para determinar la distancia focal de la parábola se utiliza la ecuación correspondiente, siendo esta

$$Y = \frac{1}{4P} X^2$$

donde P es la distancia de la directriz de la parábola al vértice. Despejando el valor de P se obtiene la distancia a la que se encuentra el foco de la parábola

$$P = \frac{1}{4K}$$

En este caso P resulta ser, por lo tanto, de 0.6495 m.

Una vez conocidos los parámetros de la parábola se calcula su longitud para determinar la colocación de los espejos fraccionados sobre su superficie. La longitud de la parábola "L" se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L = K \left[X \sqrt{X^2 + a^2} + a^2 \text{Ln}(X + \sqrt{X^2 + a^2}) - a^2 \text{Ln } a \right]$$

donde:

$$a = \frac{1}{2K}$$

"X" es el radio de la parábola (en metros)

"L" es la longitud de la parábola (en metros)

"a" es constante

Ver figura 3.2.1.

Ahora interesa conocer la cantidad de material reflejante requerida para cubrir la parábola; para ello es necesario conocer la superficie de la parábola. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\pi}{6 K^2} \left[(4K^2 X^2 + 1)^{3/2} - 1 \right]$$

donde:

"A" es el área de la parábola en (m²). Ver figura 3.2.2.

Con el análisis anterior se calcularon las características de la parábola obteniendo los siguientes resultados:

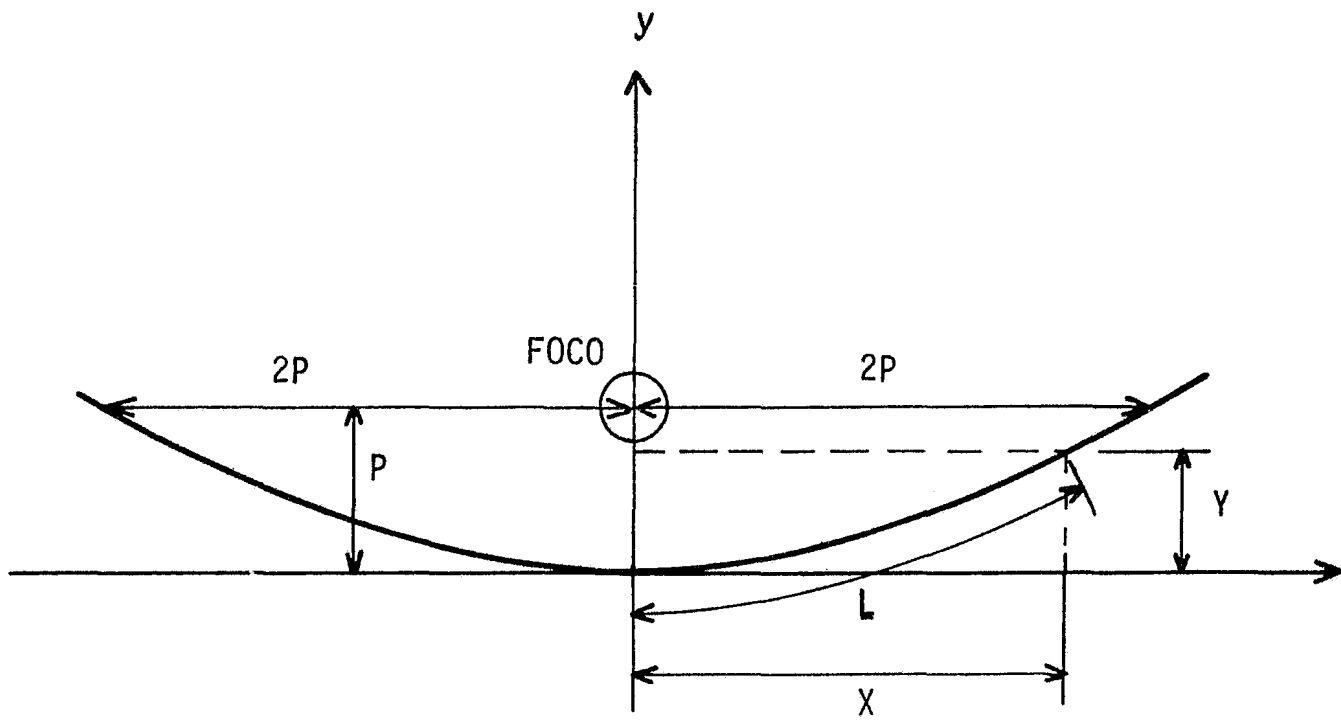


Fig 3.2.1 CARACTERISTICAS DE LA PARABOLA

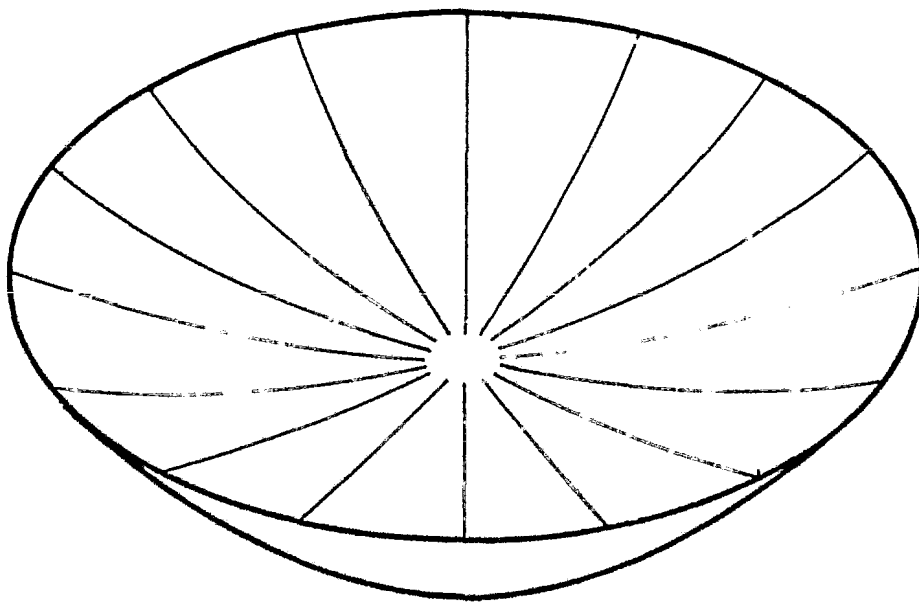


Fig 3.2.2 AREA DE LA PARABOLA

$$\begin{aligned}
 k &= 0.3849 && \text{(constante de la parábola) (m}^{-1}\text{)} \\
 Y &= 0.3849 X^2 && \text{(ecuación de la parábola)} \\
 X &= 0.78 && \text{(radio de la parábola (m))} \\
 L &= 0.8246 && \text{(longitud de la parábola (m))} \\
 A &= 2.074 && \text{(área de la parábola (m}^2\text{)). Por lo tanto se ne} \\
 &&& \text{cesita 2.074 m}^2 \text{ de material reflejante para cu} \\
 &&& \text{brirla)} \\
 P &= 0.6495 && \text{(distancia focal (m))}
 \end{aligned}$$

En esta parte del capítulo se reúnen las características físicas que permiten conocer la parábola. Estas posteriormente serán utilizadas en el cálculo matemático para determinar el tamaño y la colocación de los espejos.

3.3 Imagen formada en el Foco

La parábola, por definición, es el lugar geométrico de los puntos que se encuentran a la misma distancia de un punto llamado foco y de una recta fija llamada directriz. La parábola es la única superficie de reflexión que puede concentrar los rayos paralelos a su eje de simetría en un solo punto.

Debido a que en la radiación solar no se tienen rayos paralelos, puesto que éstos tienen formado un ángulo de 32' entre sí, la imagen que se formará en el foco de la parábola no será un punto, sino que tendrá una forma elipsoidal, ver fig 3.3.1. Una imagen teórica del Sol creada por

cualquier sistema óptico es de tamaño finito y depende de las dimensiones del disco solar y de la geometría del sistema. Para calcular la imagen teórica se tiene la siguiente ecuación:

$$w = \frac{2r \tan 16'}{\cos \phi}$$

donde "w" es el tamaño de la imagen teórica.

La distancia "r" de cualquier punto del reflector hacia el foco de la parábola, se calcula como:

$$r = \frac{2p}{1 + \cos \phi}$$

donde

"p" es la distancia focal de la parábola

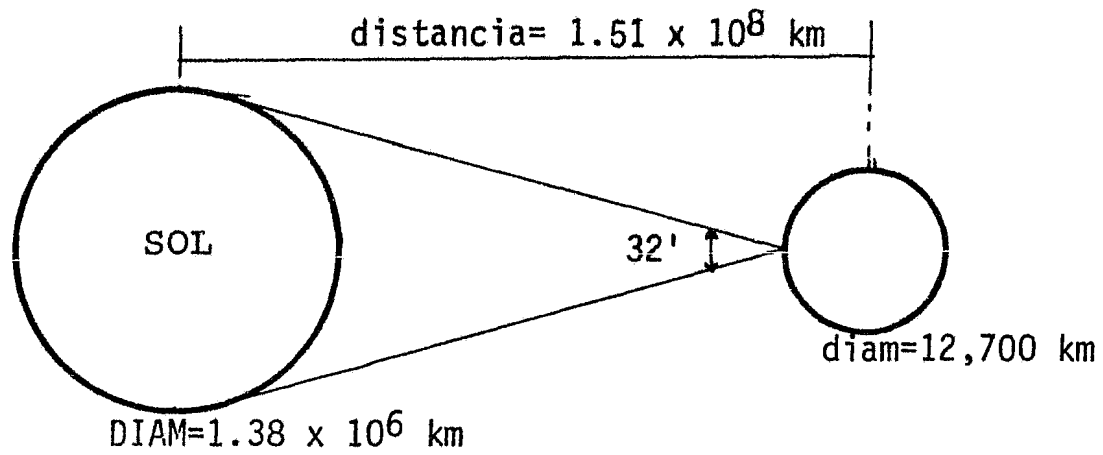
"φ" es el ángulo formado por el eje de simetría de la parábola con el rayo reflejado hacia el foco. Ver fig 3.3.2.

Definimos concentración "C" como el cociente entre el área total de la superficie reflejante entre el área del foco de la parábola (Af)

$$C = \frac{A}{Af}$$

Para obtener la concentración de la parábola utilizada se obtuvieron las siguientes medidas:

$$\begin{aligned} \phi &= 62.2717^\circ \\ r &= 0.8872 \text{ {m}} \\ w &= 0.01775 \text{ {m}} \end{aligned}$$



INCIDENCIA DE LOS RAYOS SOLARES EN LA TIERRA

Fig 3.3.1 Incidencia de los rayos solares en la Tierra.

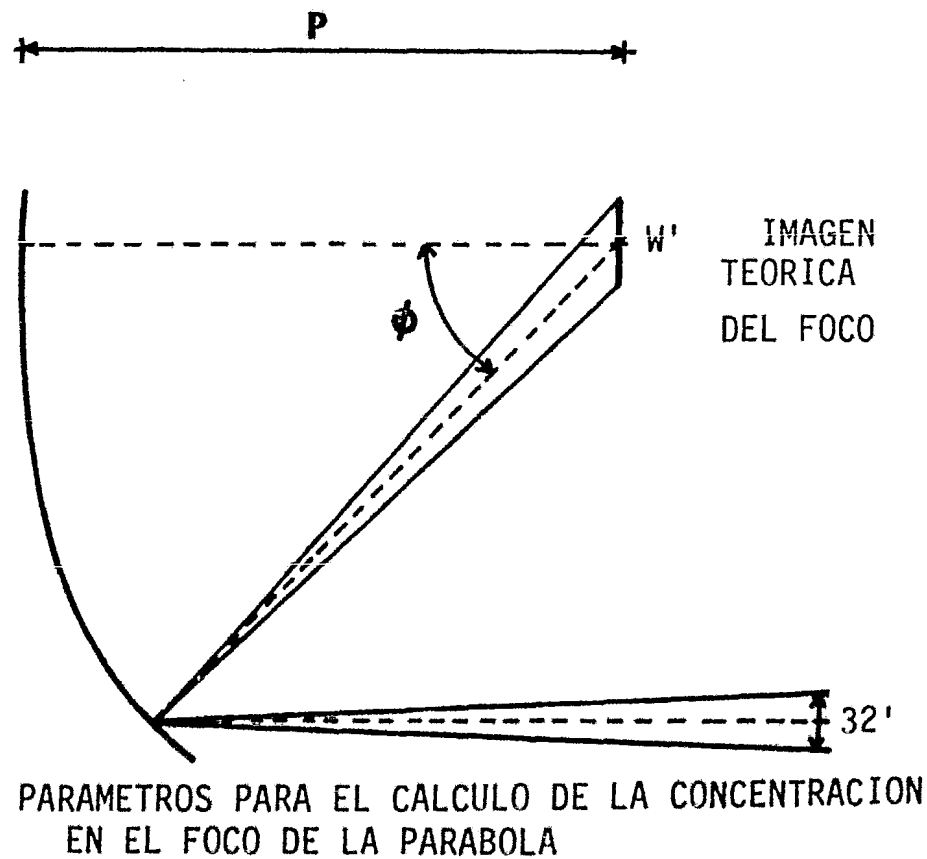


Fig 3.3.2 Parámetros para el cálculo de la concentración en el foco de la parábola.

Con "w" puede calcularse el área del foco, si ésta la consideramos como una circunferencia.

$$A_f = \frac{\Pi}{4} (w)^2$$

$$A_f = 0.00025 \text{ m}^2$$

Y la concentración de la parábola será:

$$C = \frac{1.96 - 0.1001}{0.00025}$$

$$C = 7,439.61$$

3.4 Método Propuesto para la Colocación de Espejos Fraccionados sobre Superficies Parabólicas

Para acomodar la superficie reflejante sobre la parábola hay que tomar en cuenta las siguientes limitantes: Cualquier figura geométrica que se quiera pegar sobre la superficie se encontrará sometida a deformación debido a la curvatura de la superficie de la parábola. Entre más grande sea la figura, mayor será la deformación a la que se someterá.

Por lo anterior se recomienda cubrir la superficie de la parábola con pequeños espejos fraccionados.

Los tipos de figuras que se pueden utilizar, considerando solamente las figuras regulares, pueden ser el triángulo equilátero, el cuadrado y el hexágono regular.

Para que cumplan con el método, las figuras deben ajustarse perfectamente sobre una superficie plana. Las tres figuras regulares que se

mencionaron son las únicas que se cumplen con esta distribución sobre un plano. En este capítulo se diseñó el método para la colocación de los hexágonos regulares. Si se compara la distancia que tiene una figura de su centro a un vértice y del centro a un lado, se notará que entre el triángulo y el cuadrado la diferencia de estas distancias es mayor que en el hexágono. Si se hiciera una comparación con un círculo, esta diferencia de distancias medidas sería cero y esto ofrece una mejor distribución de esfuerzos debido a que la deformación de la figura sería más uniforme. En este aspecto el hexágono se asemeja más al círculo comparado con las otras dos figuras. Otra ventaja consiste en que sus vértices son obtusos y no agudos, con lo cual se minimizan las posibilidades de que se despeguen de la superficie.

Como la superficie de la parábola se abate por su curvatura, al acomodar los espejos sobre la superficie se observa que se pueden encimar al tratar de ajustarlos entre ellos, o también se pueden ajustar sin que se encimen pero existirán huecos sobre la superficie de la parábola que no cubren los hexágonos. Esto sucede al utilizar un tamaño único de espejos. Ver fig 3.4.1.

Para evitar que se encimen o que existan separaciones entre los espejos, se propone el siguiente método de colocación de los hexágonos sobre la superficie de la parábola.

Como referencia se coloca un hexágono en el centro de la parábola y alrededor del hexágono anterior se colocan los siguientes 6 hexágonos que son los que forman la primera periferia de hexágonos. Se hace notar que el número de la periferia corresponde a la letra "n". Para la se

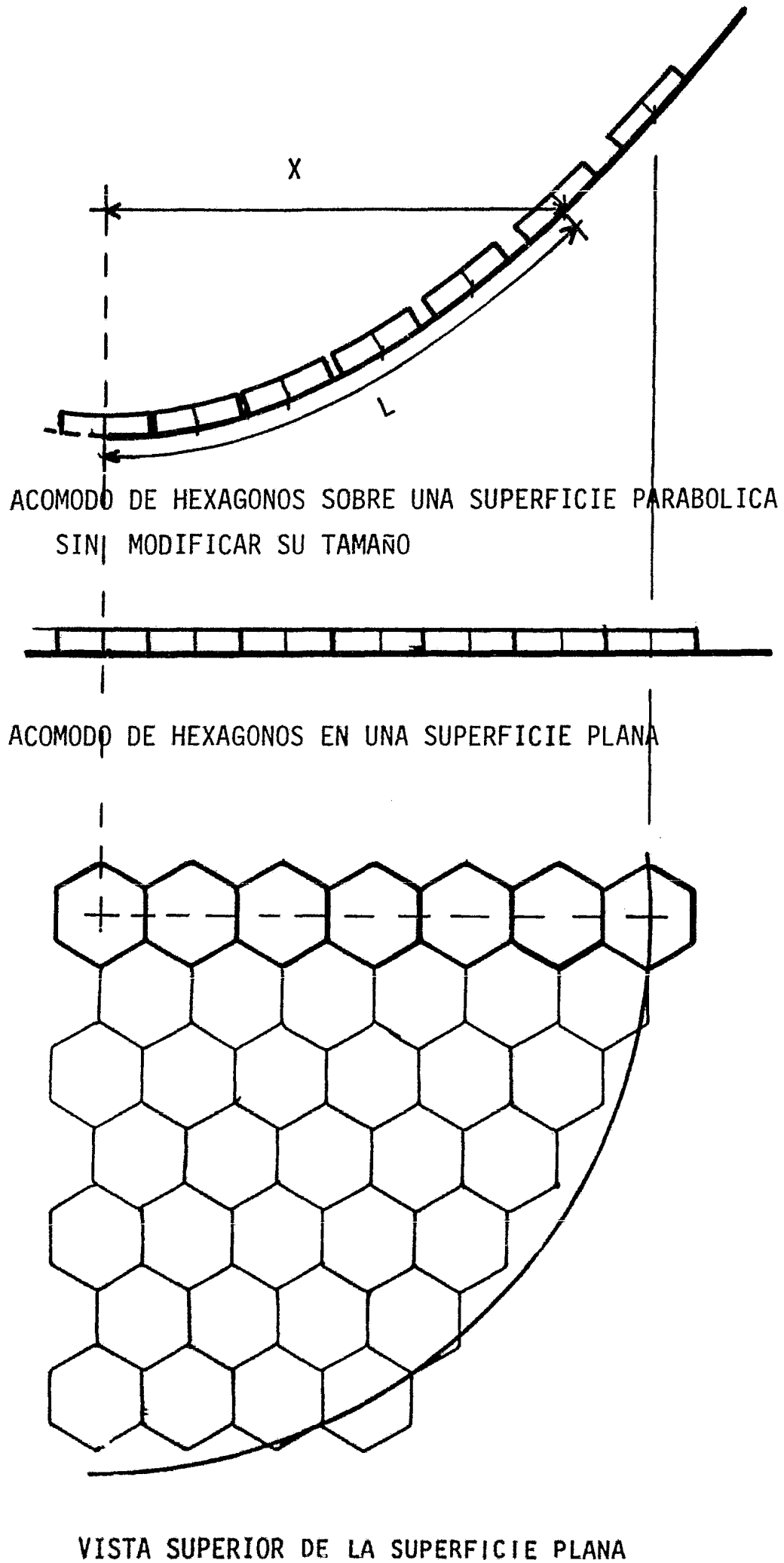


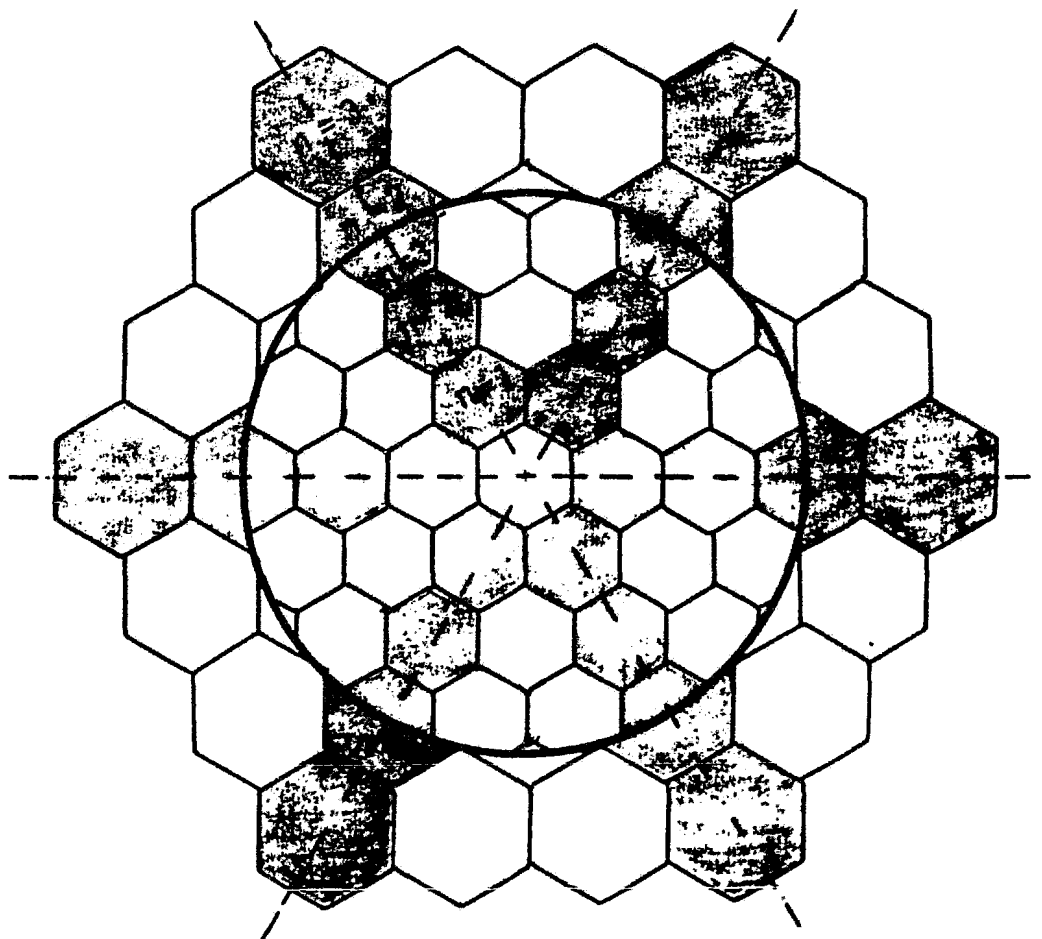
Fig 3.4.1 Comparación del acomodo de los espejos en un plano y en la parábola.

gunda periferia se hace $n = 2$ y ésta consta de 12 hexágonos, y así sucesivamente hasta cubrir la parábola.

Como se desea obtener una óptima colocación de los espejos regulares se calcula el tamaño de ellos para cada periferia. Por lo anterior, conforme aumenta el número de la periferia los hexágonos van disminuyendo de tamaño al grado que en números de periferias grandes se tienen que acomodar muchos espejos pequeños. Para facilitar el acomodo en número de periferias grandes se puede modificar el tamaño inicial del espejo por otro de mayor tamaño cambiando el número de la órbita por una menor. El análisis continúa con las nuevas dimensiones de espejos para las siguientes periferias. Ver fig 3.4.2.

Para colocar los espejos en la superficie de la parábola se divide ésta en seis partes iguales con 6 líneas que parten del centro hacia los extremos. Posteriormente se trazan los círculos concéntricos que corresponden a cada periferia calculada. Con las marcas anteriores se proceden a colocar los espejos por periferias partiendo del centro hacia los extremos.

El problema se resuelve numéricamente con un programa de computadora, el cual calcula la longitud " l " y el radio de la parábola " x " al cual deben colocarse los hexágonos sobre ésta. También determina el tamaño de los hexágonos en cada periferia. El programa parte con los datos iniciales que son: la constante de la parábola " k ", el radio de la parábola " x ", los tamaños del hexágono mínimo y máximo " E_{MIN} " y " E_{MAX} " respectivamente con el número de periferia inicial " n ".



División del perímetro en 6 partes iguales
del círculo base para la colocación de los Hexágonos

Fig 3.4.2 Cambio de tamaño de los hexágonos y su
colocación.

Cuando el tamaño del hexágono calculado es menor que el valor mínimo de - seado "EMIN", el programa modifica el número de la periferia "n" para que el hexágono crezca hasta el tamaño máximo "EMAX".

El programa termina cuando queda cubierta la superficie de la parábola.

3.5. . Método matemático para la colocación de espejos hexagonales so - bre una superficie parabólica

Para formar el hexágono se parte de un círculo que se divide en 6 partes iguales. Los parámetros obtenidos se muestran en la siguiente figura

3.5.1.

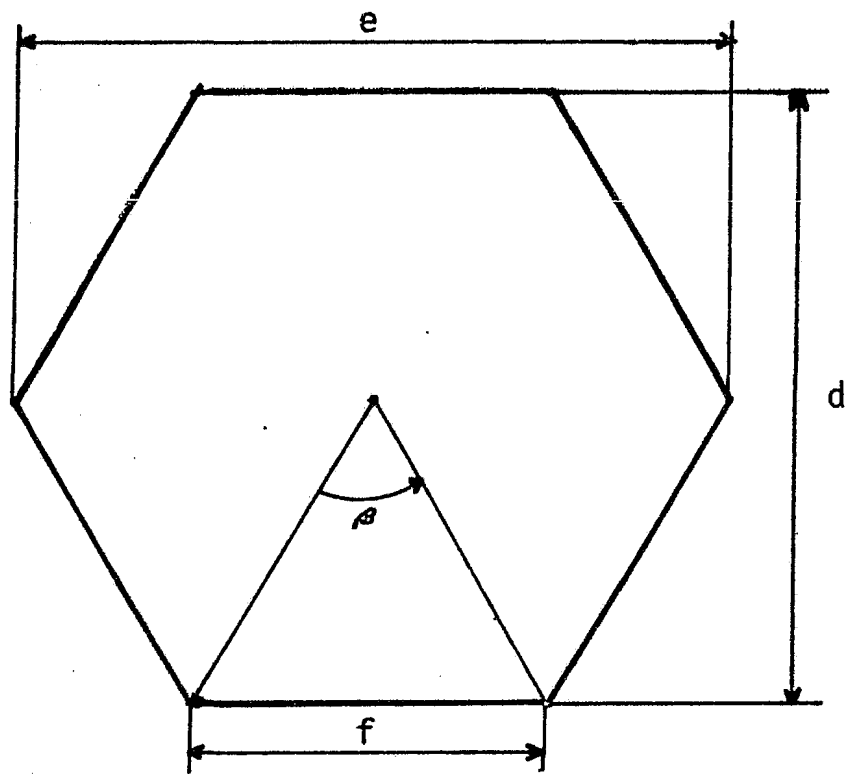
Analizando las figuras se obtienen las relaciones matemáticas entre los parámetros del hexágono

$$d = e \times \cos 30^\circ$$

$$f = e/2$$

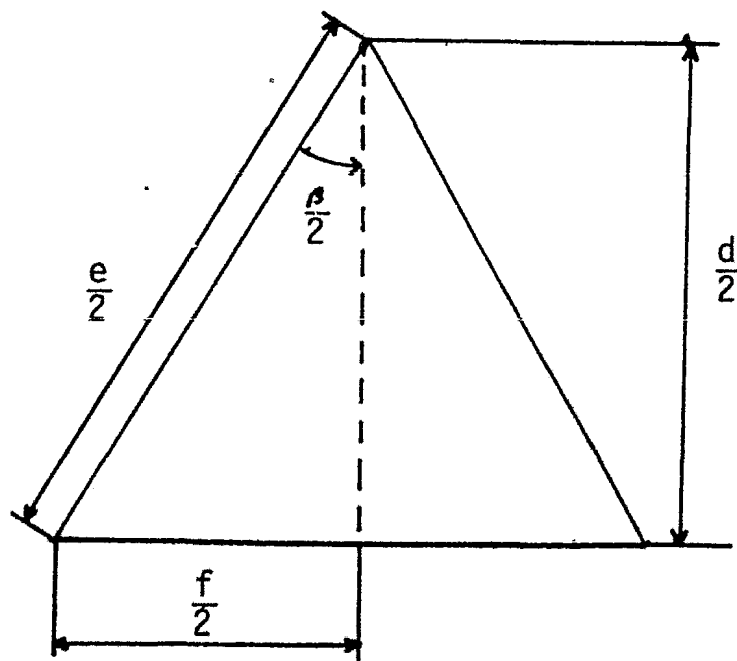
$$d = 2f \times \cos 30^\circ$$

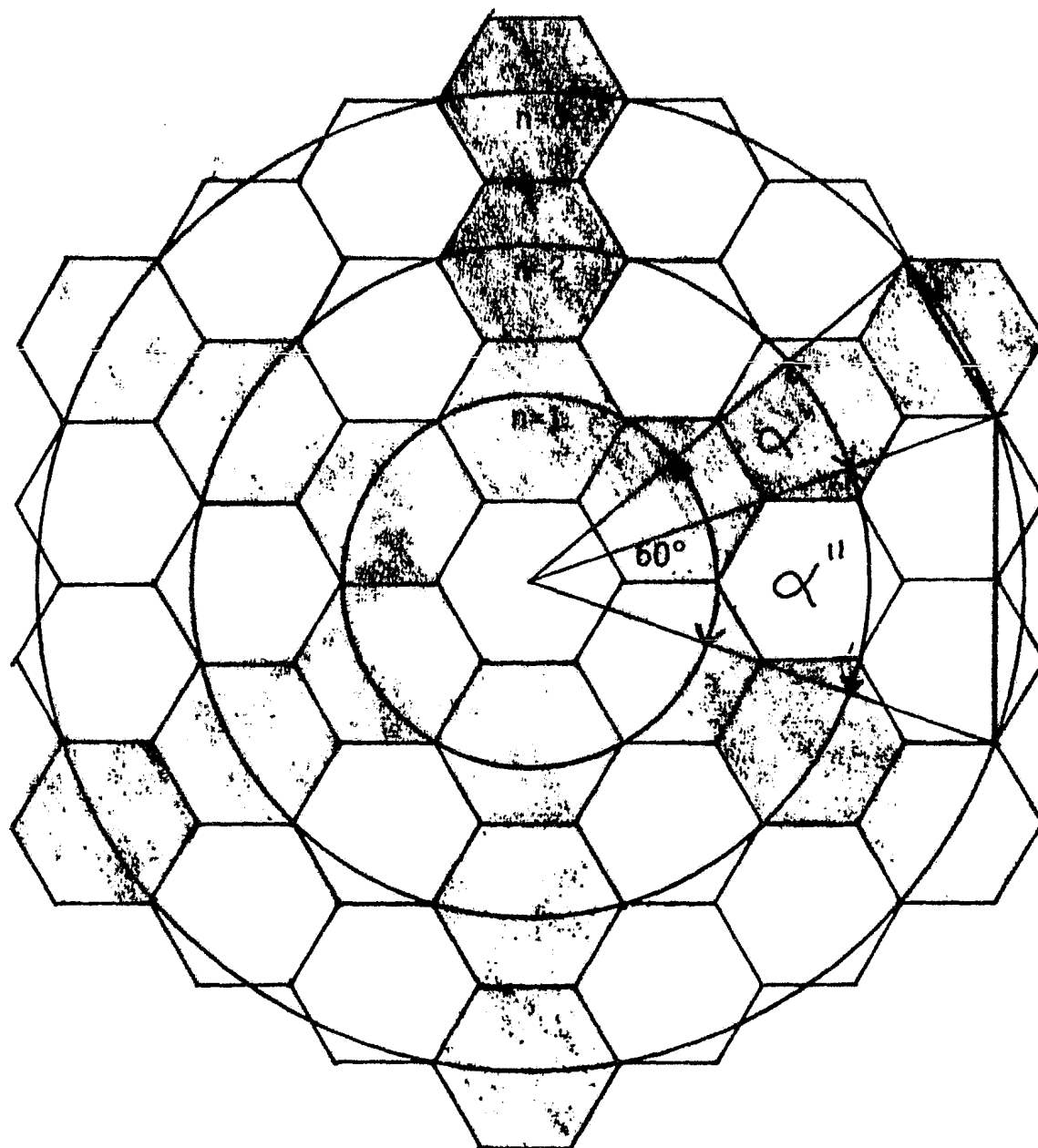
Para determinar el acomodo de los hexágonos se toma como base su colocación sobre una superficie plana para conocer su distribución. Véase - la figura 3.5.2, . donde se analiza una sexta parte del acomodo de cada periferia. Las otras 5 sextas partes tienen el mismo comportamiento. El hexágono que se encuentra en el centro se denomina el hexágono central. A continuación, los siguientes hexágonos serán colocados por periferias. Puede decirse que el número de hexágonos que se tienen por periferia es - el producto del número de la periferia n por 6.



DIMENSIONES DEL HEXAGONO

Fig 3.5.1 Dimensiones del hexágono.





DISTRIBUCION DE LOS HEXAGONOS EN LAS PERIFERIAS

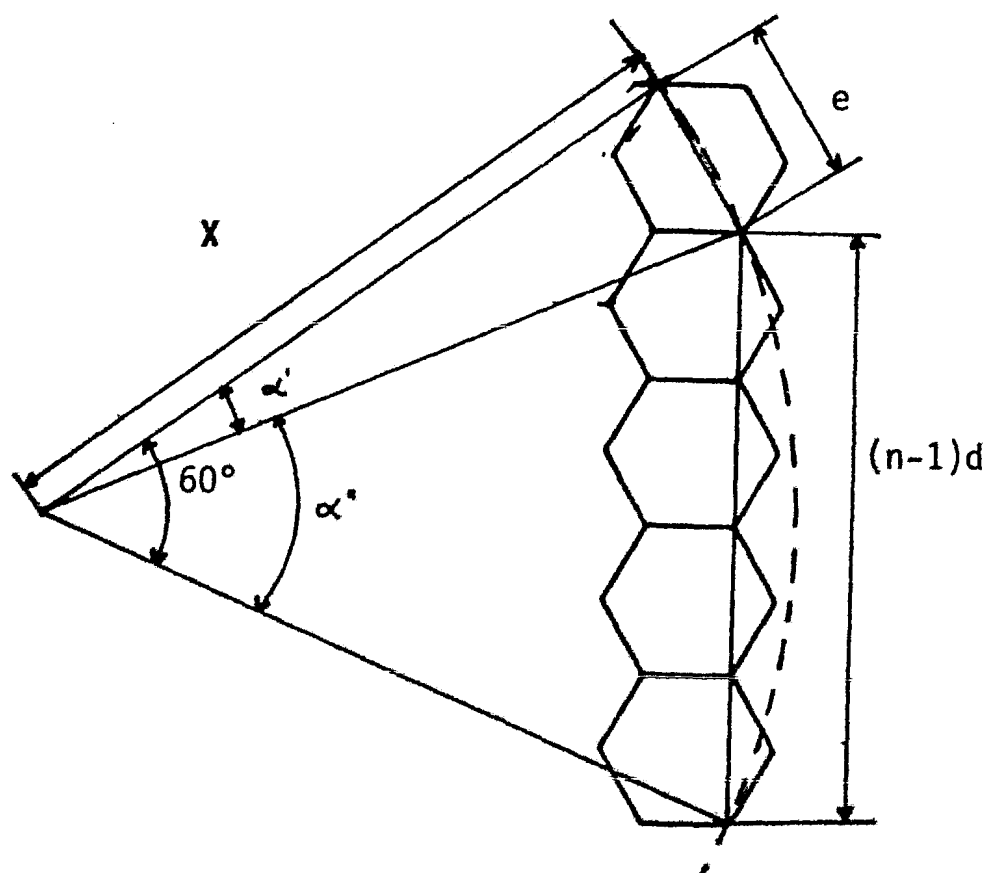


Fig. 3.5.2 Colocación de hexágonos

$$NP = n \times 6$$

donde NP es el número de hexágonos por periferia.

Para desarrollar el método matemático se toma como base una sexta parte del acomodo, la cual equivale a un ángulo de 60 grados que será el ángulo α . A su vez este ángulo será subdividido en el ángulo α' que corresponde al formado por un hexágono base y la diferencia de los anteriores es el ángulo α'' que abarca los demás hexágonos de esta parte de la periferia. Las siguientes figuras 3.5.3 muestran esta distribución. Matemáticamente se llega a las siguientes relaciones de α' y α'' .

$$\alpha' = 2 \times \text{ang} \text{ sen } \left\{ \frac{e}{2 \times X} \right\}$$

$$\alpha'' = 2 \times \text{ang} \text{ sen } \left\{ \frac{(n-1)}{2 \times X} \times e \times \cos 30^\circ \right\}$$

Como se mencionó anteriormente, se debe cumplir con la siguiente condición:

$$\alpha = 60^\circ = \alpha' + \alpha''$$

Se sustituyen α' y α'' en la ecuación anterior, luego se iguala a cero y se obtiene la siguiente expresión

$$\cos \left\{ \text{ang} \text{ sen} \left(\frac{e}{2X} \right) \right\} - n \times \frac{e}{X} \times \cos 30^\circ = 0$$

Las variables involucradas son:

- e longitud máxima del hexágono entre vértices
- X radio del círculo base de la periferia en estudio
- n número de la periferia.

En la ecuación anterior se encuentran representadas las variables que corresponden al radio de la parábola "X", el tamaño del hexágono "e" y el número de la periferia "n". Al cumplir con esta igualdad se garantiza el ajuste de la periferia. El programa de computadora resuelve la ecuación anterior conociendo dos variables y calcula el valor de la tercera en forma iterativa.

Hasta esta parte, el análisis corresponde a la colocación de los hexágonos sobre superficies planas donde el tamaño de los hexágonos se calcula una sola vez y permanece constante.

A continuación se analiza el acomodo de los hexágonos sobre una superficie parabólica. Para determinar la colocación de los hexágonos es necesario conocer los parámetros de la parábola que se van a emplear, como son la constante de la parábola "K" con la distancia focal P. Conociendo el círculo base sobre el cual se colocan los espejos (X es el radio del círculo base), hace falta conocer la longitud l sobre la superficie de la parábola desde el centro hasta la intersección del círculo base. Lo anterior se resuelve utilizando la ecuación que permite conocer la longitud de la parábola l conociendo el radio X de la misma, ver punto 3.2.

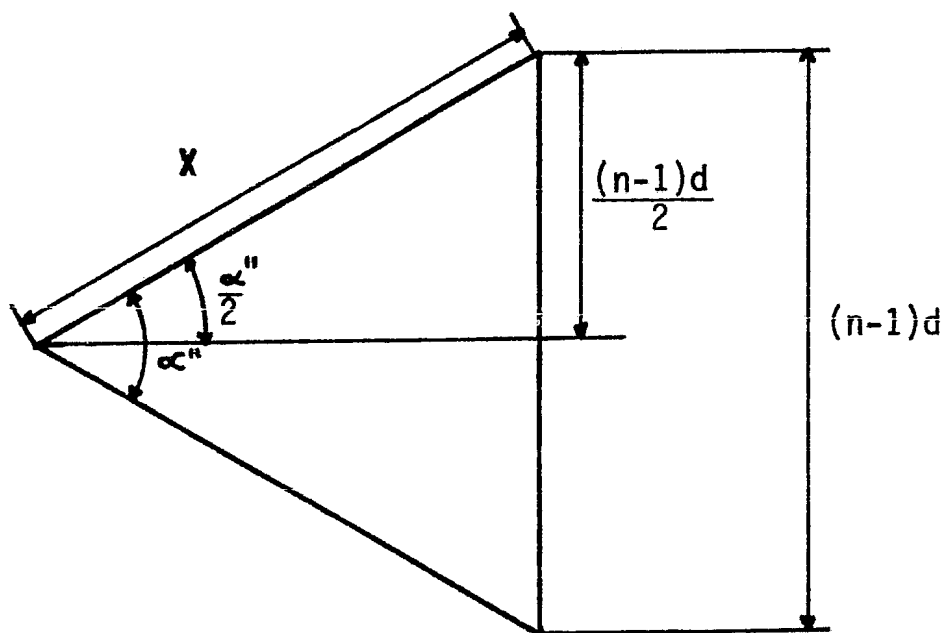
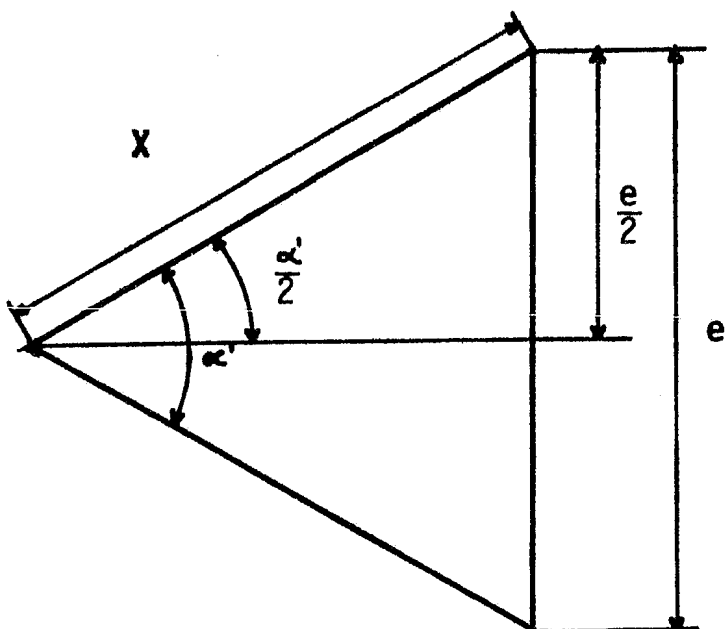


Fig 3.5.3 Detalle para la colocación de los hexágonos por periferia.

Conociendo ℓ y el tamaño del hexágono e puede calcularse la distancia exterior Z_{EXT} que sirve de referencia para la colocación de las periferias. Esta se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Z_{EXT} = \sqrt{\ell^2 - \frac{e^2}{4}} + e \times \frac{\cos 30^\circ}{2}$$

ver figura 3.5.4.

Para que dos periferias queden juntas es necesario que la distancia interior de la periferia exterior Z_{INTP} sea la misma distancia que la parte exterior Z_{EXT} del acomodo interno.

El procedimiento que se siguió para evaluar numéricamente la colocación de los hexágonos por medio de un programa de computadora es el siguiente:

Se fija el tamaño del espejo e y el número de la periferia n para calcular de una forma iterativa el valor del radio del círculo base X . El programa empieza con la periferia n y la va incrementando hasta un valor máximo de nF . Una vez encontrado el valor de X se obtiene el valor de la longitud ℓ y con ésta Z_{EXT} . Para la siguiente periferia se incrementa la periferia con $n = n + 1$ y la distancia Z_{EXT} se convierte en la distancia interior Z_{INT} . Con la nueva periferia n y con el tamaño anterior del hexágono e se calcula iterativamente el nuevo radio del círculo base X , se calcula la distancia ℓ para determinar la distancia interior Z_{INTP} correspondiente a la periferia y se compara con la distancia exterior de la periferia anterior Z_{EXT} . Si difieren significa que hay un hueco entre periferias, por lo que es necesario disminuir

el tamaño de los hexágonos e y volver a calcular iterativamente X , l y $Z_{INT P}$. Ver figura 3.5.5.

Como se describió anteriormente, hasta que las dos periferias se junten ($Z_{INT P} = Z_{EXT}$) el tamaño del hexágono e será el adecuado. El método se utiliza de la misma manera para el cálculo de las demás periferias y termina cuando n excede el número máximo de la periferia n_F o cuando la distancia X calculada sobrepasa el radio máximo de la parábola X_{MAX} .

Existen dos formas de comenzar el programa: la primera consiste en dar el tamaño del hexágono e y la órbita n por la que se desea comenzar para que el programa calcule el radio X y después encuentre todas las variables que se mencionaron anteriormente. La otra opción consiste en dar el radio X y la órbita n para que calcule el tamaño del hexágono e apropiado. En ambos casos el programa controla el tamaño del hexágono e para que siempre se encuentre dentro del rango mínimo e_{MIN} y el máximo e_{MAX} , para lo cual modifica el número de la periferia n .

El procedimiento anterior se puede resumir en un método que sirve para calcular y modificar el tamaño de los hexágonos en cada periferia, de tal forma que todas las órbitas queden unidas entre sí y se determinen los parámetros necesarios para colocar y cubrir una superficie parabólica con espejos fraccionados. En la fig 3.5.6 se muestra el diagrama de flujo de este proceso y a continuación, en la fig 3.5.7, el listado del programa de cómputo.

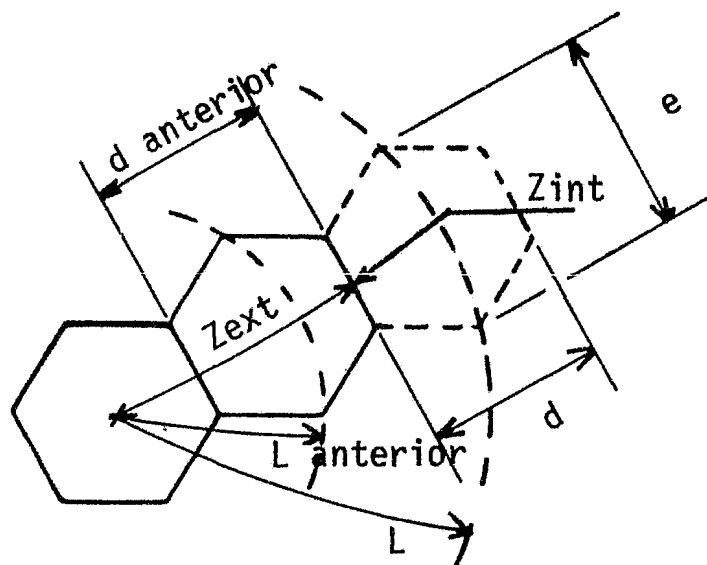


FIG 3.5.4 AJUSTE DE LOS HEXAGONOS
POR PERIFERIA

MARCAS DE REFERENCIA SOBRE LA
PARABOLA PARA LA COLOCACION DE
LOS HEXAGONOS

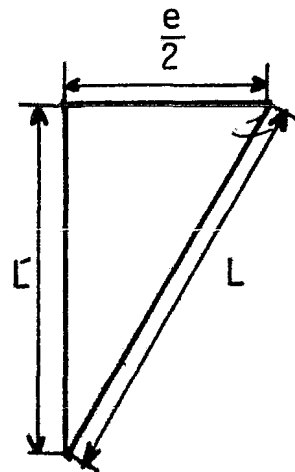
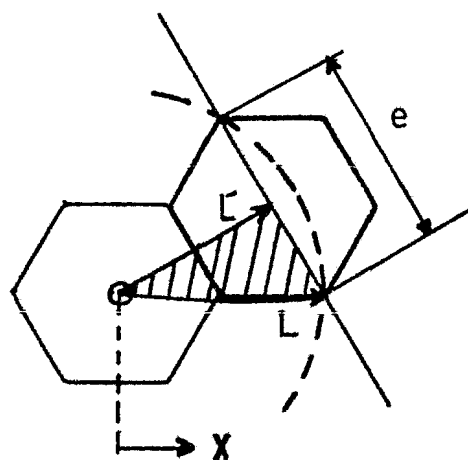
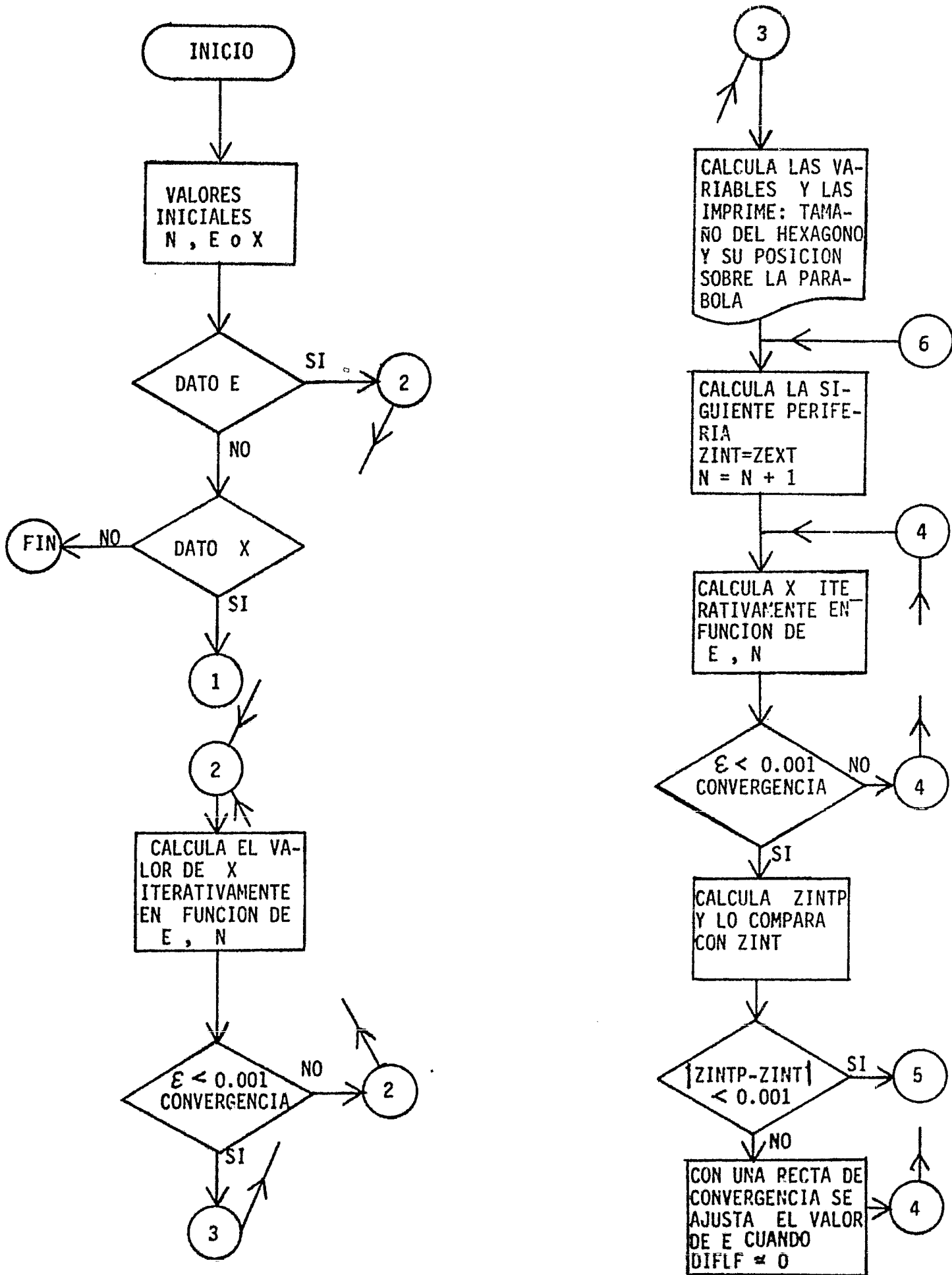
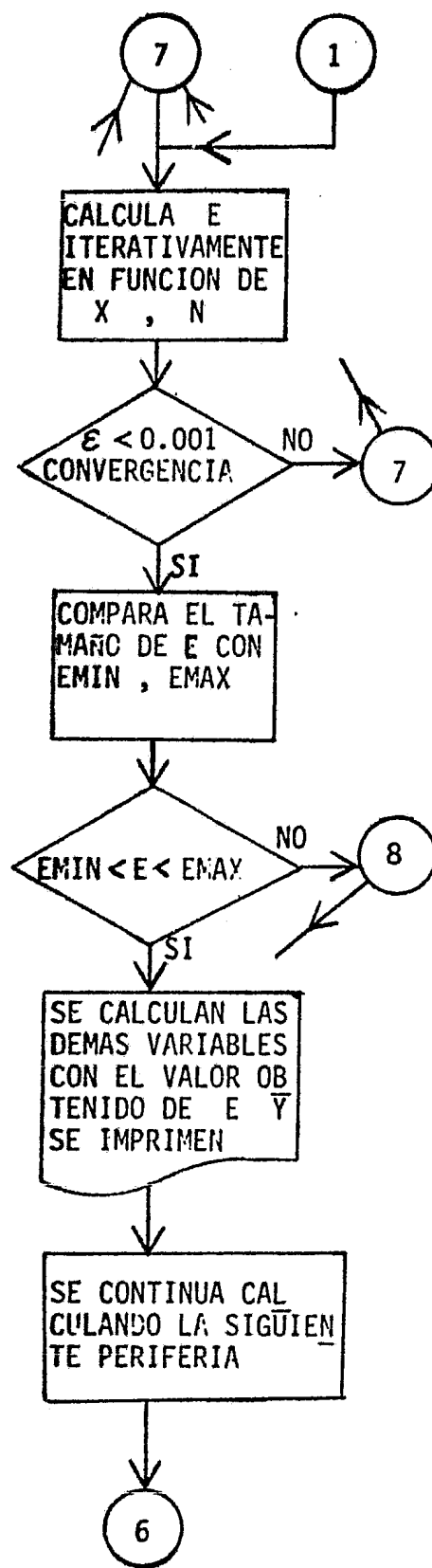
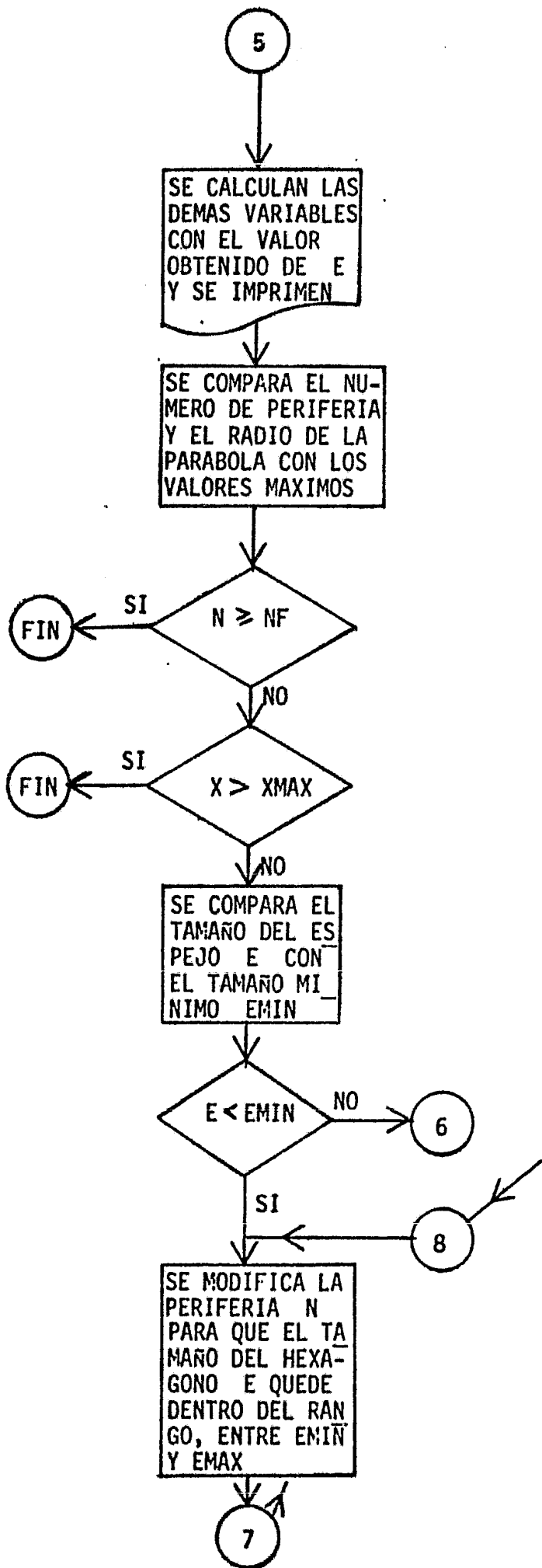


FIG 3.5.5 MARCAS DE REFERENCIA SOBRE LA PARABOLA
PARA LA COLOCACION DE LOS HEXAGONOS.

Fig 3.5.6 Diagrama de bloques para la obtención del tamaño de los hexágonos sobre la superficie parabólica.





USERID: JIFF.

10:33:26 LOT 6055 SYSTEM/FCITRAH.
CODE OCCUPIED: JUN 16, 1961 15:05:30 BY ALIOL 31.280
TASK TYPE: COMPUTE(CALL)

10:33:30 LOT 6055 SYSTEM/FCITRAH.
USERID: JIFF.
2.103 SECS. CPU, 2.523 SECS. IO, 2.990 SECS. IF PLAY QUEUE
131 LINES PRINTED
PER INITIAL: CODE=70.120, DATA=39.401
DATA ALLOWED IN GLOBAL; CODE ALLOWED IN GLOBAL
DATA OCCUPIED GLOBAL; CODE OCCUPIED GLOBAL
AVERAGE CPU USAGE: CPU=12332 DATA=6943
ELAPSED TIME: 00:00:18

10:33:39 LOT 6057 (JIFF)FCICIA IN CSC2.
CODE OCCUPIED: JUN 16, 1961 10:33:23 BY FCITRAH 31.280
TASK TYPE: DEPARTMENT TASK (PROCESS)

10:33:40 LOT 6057 (JIFF)FCICIA IN CSC2.
USERID: JIFF.
0.928 SECS. CPU, 2.067 SECS. IO, 1.553 SECS. IF PLAY QUEUE
21 LINES PRINTED
PER INITIAL: CODE=1.055, DATA=7.988
DATA ALLOWED IN GLOBAL; CODE ALLOWED IN GLOBAL
DATA OCCUPIED GLOBAL; CODE OCCUPIED GLOBAL
AVERAGE CPU USAGE: CPU=555 DATA=26.6
ELAPSED TIME: 00:00:11

10:33:47 LOT 6054 FCICIA.
USERID: JIFF.
0.504 SECS. CPU, 1.111 SECS. IO, 1.504 SECS. IF PLAY QUEUE
PER INITIAL: CODE=0.111, DATA=2.503
DATA ALLOWED IN GLOBAL; CODE ALLOWED IN GLOBAL
DATA OCCUPIED GLOBAL; CODE OCCUPIED GLOBAL
AVERAGE CPU USAGE: CPU=19 DATA=165.
ELAPSED TIME: 00:00:70

UNION LIST
=====

FILE 8=FILE8,UNIT=PPITFI,RECORD=22
FILE 9=FILE9,UNIT=PPITFI,RECORD=22

00001000 C FIB IS 0007 LOG
00002000 C FIB IS 0007 LOG
START OF SEGMENT 002

```
REAL R, L, LF
E=0
X=0.
X=0.15
K=0.3849
EMIN=0.1
EMAX=0.2
N=1
NF=10
ITEF1=15
XMAX=2.
P=0.25/P
IF(L.GT.(MAX) F=EMAX
WRITE(6,*// (13)) R, XMAX, EMIN, EMAX, NF
```

00003000 C
00004000 C
00005000 C
00006000 C
00007000 C
00008000 C
00009000 C
00010000 C
00011000 C
00012000 C
00013000 C
00014000 C
00015000 C
00016000 C

```
IF(L.GT.(.0) GO TO 90
IF(X.GT.(.4) GO TO 133
WRITE(6,*// (13)) L, X
GO TO 120
```

00017000 C
00018000 C
00019000 C
00020000 C
00021000 C
00022000 C
00023000 C
00024000 C

```
90 X=L*K
ITEF1=1
100 CONTINUE
CEFC=(COS(ARCSIN(L/2./X))-1*L/X*.866)/(F**2/./X**2/(4*L**2-L**2)
+1*(L/X**2*.866)
ITEF1=ITEF1+1
IF(ABS(CEFC).LT.(.001) GO TO 101
IF(ITEF1.GT.ITEF1) GO TO 110
X=X-CEFC
GO TO 100
```

00025000 C
00026000 C
00027000 C
00028000 C
00029000 C
00030000 C
00031000 C
00032000 C

```
101 L=C.25/F*(X*(X**2+4*P**2)+1.5+4*F**2*ALFC(L+(X**2+4*F**2)**0.5)
S=4*F**2/L(C(2*F))
P=F*.866
F=F/2.
ZIXT=(1**2-L**2/4.)*.5+1/2.
WRITE(6,*// (10)) F, L, E, F, X, L
WRITE(9,*// (13)) R, ZIXT, ITEF1, ITEF1
```

00033000 C
00034000 C
00035000 C
00036000 C
00037000 C
00038000 C
00039000 C
00040000 C

```
102 N=N+1
ZIXT=ZIXT
ITEF2=1
103 ITEF2=ITEF2+1
ITEF3=1
```

00041000 C
00042000 C
00043000 C
00044000 C
00045000 C
00046000 C
00047000 C
00048000 C

```
104 CEFC=(COS(ARCSIN(L/2./X))-1/L*.866)/(F**2/./X**2/(4*L**2-L**2)
+1*(L/X**2*.866)
ITEF3=ITEF3+1
IF(ABS(CEFC).LT.(.001) GO TO 100
IF(ITEF3.GT.ITEF3) GO TO 110
X=X-CEFC
GO TO 100
100 L=C.25/F*(X*(X**2+4*F**2)+1.5+4*F**2*ALFC(L+(X**2+4*F**2)**0.5)
S=4*F**2/L(C(2*F))
ZIXT=(1**2-L**2/4.)*.5+1/2.
```

00049000 C
00050000 C
00051000 C
00052000 C
00053000 C
00054000 C
00055000 C
00056000 C


```

132 L=0.21/(X*(X**2+4*X**2)*0.5+4*X**2*(C+(X**2+4*X**2)*0.5)
S=0.1**2*AL(C*(2*X))
C=C*0.800
F=F/2.
ZEXIT=(L**2-C**2/4.)*0.5+(1/2.
WRITE (F,*/(13)) F, I, X, L
WRITE (C,*/(13)) I, ZEXIT, ITEMP, ITEMP, ITEMP,
128 WRITE (C,*/(13)) ITEMP, ITEMP, I
107 WRITE (C,*/(13)) ITEMP2, ITEMP, I
105 WRITE (C,*/(13)) ITEMP3, ITEMP, I
127 WRITE (F,*/(13)) ITEMP4, ITEMP, ITEMP, I
120 CALL EXIT
END

```

```

00114600 C 002 0129 4
00115000 C 002 0137 4
00116000 C 002 0139 4
00117000 C 002 0139 4
00118000 C 002 0145 4
00119000 C 002 0145 4
00120000 C 002 0164 4
00121000 C 002 0164 4
00122000 C 002 0170 4
00123000 C 002 0170 4
00124000 C 002 0170 4
00125000 C 002 0170 4
00126000 C 002 0170 4
00127000 C 002 0188 4
00128000 C 002 0188 4
00129000 C 002 0196 4
00130000 C 002 0196 4

```

SECRET 002 IS 0106 1.010

START OF SEGMENT CCA
SEGMENT CCA IS 0000 LONG

NO ERRORS DETECTED. NUMBER OF CARDS = 131.
COMPILE TIME = 13 SECONDS ELAPSED, 1.0% LINES PROCESSED.
L2 STACK SIZE = 0 WORDS. FILE SIZE = 234 WORDS. ESTIMATED CORE STORAGE REQUIREMENT = 705 WORDS.
TOTAL PROGRAM CODE = 483 WORDS. DELAY STORAGE = 0 WORDS.
NUMBER OF PROGRAM SECTIONS = 9. NUMBER OF LINK SECTIONS = 47.
PROGRAM CODE FILE = C:\PROGRAMS\CCCA.DLL.CSC?
COMPILE COMPLETE 01/26/1971

I = .5449

XI AX=2.

II IN=0.1

I. AX=0.2

IF=10

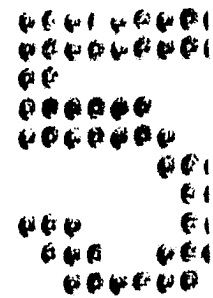
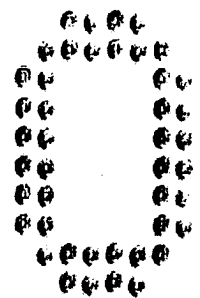
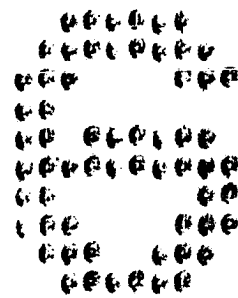
N=1	D=.1299	F=.075	F=.075	X=0.15	L=.1503327
N=2	F=.1293597	F=.1493761	F=.0746681	X=.692134	L=.2711282
N=3	F=.1277767	F=.1475909	F=.0737751	X=.5903675	L=.3901050
N=4	F=.1258295	F=.1452496	F=.0726497	X=.5085305	L=.5212350
N=5	F=.1235113	F=.1426277	F=.0713114	X=.6216567	L=.6446226
N=6	F=.1216464	F=.1397706	F=.0698612	X=.7296316	L=.7603507
N=7	F=.1195505	F=.1368905	F=.0684472	X=.8323155	L=.8801003
N=8	F=.1158065	F=.1337991	F=.0668629	X=.9283499	L=1.002208
N=9	F=.1151325	F=.1306370	F=.0653119	X=1.020277	L=1.117126
N=10	F=.1105450	F=.1276590	F=.0638251	X=1.107277	L=1.229504

n=1	ZFX T=.1957376	ITFI 4=1	ITLI 5=1	ITLFI N=15
n=2	ZFX T=.5293179	ITFI 2=4	ITLI 3=2	ITLFI N=15
n=3	ZFX T=.4951756	ITFI 2=3	ITLI 3=2	ITLFI N=15
n=4	ZFX T=.5790624	ITFI 2=3	ITLI 3=2	ITLFI N=15
n=5	ZFX T=.7068719	ITFI 2=3	ITLI 3=2	ITLFI N=15
n=6	ZFX T=.8236861	ITFI 2=3	ITLI 3=2	ITLFI N=15
n=7	ZFX T=.9428102	ITFI 2=2	ITLI 3=2	ITLFI N=15
n=8	ZFX T=1.057878	ITFI 2=2	ITLI 3=2	ITLFI N=15
n=9	ZFX T=1.171785	ITFI 2=3	ITLI 3=2	ITLFI N=15
n=10	ZFX T=1.283199	ITFI 2=3	ITLI 3=2	ITLFI N=15

0000000000	00	00	00000000
0000000000	000	00	0000000000
00	0000	00	00000000
00	00000	00	00000000
00000000	000000	00	00000000
00000000	0000000	00	0000000000
00	00000000	00	0000000000
00	000000000	00	0000000000
00000000000	00000000	00000000000	000000000000
00000000000	00000000	00000000000	000000000000

00
00

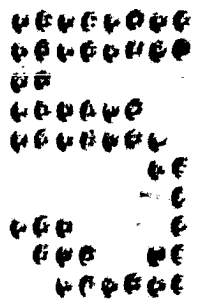
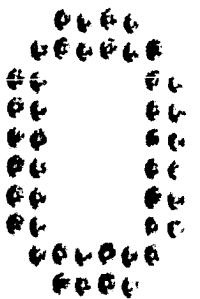
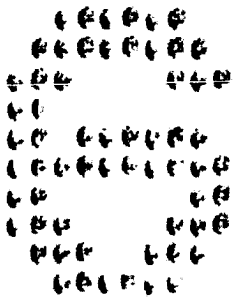
00
00



0000000000	00	00	00000000
0000000000	000	00	0000000000
00	0000	00	00000000
00	00000	00	00000000
00000000	000000	00	00000000
00000000	0000000	00	0000000000
00	00000000	00	0000000000
00	000000000	00	0000000000
00000000000	00000000	00000000000	000000000000
00000000000	00000000	00000000000	000000000000

00
00

00
00



4. ABSORBEDOR SOLAR

4.1 Objetivo

La energía que incide del Sol se puede aprovechar mediante la utilización de un espejo parabólico cuyo fin es aumentar la concentración de la energía, es decir, aumentar el flujo de radiación por unidad de área y lograr así un incremento considerable en la temperatura de equilibrio, que permita calentar el agua y producir vapor. Teniendo en consideración lo anterior, la base del generador de vapor debe estar colocada en la zona focal de la parábola. La energía que proviene del Sol va a ser reflejada por los espejos hacia el generador de vapor; una parte de esta energía se perderá por la ineficiencia de la reflexión de la radiación solar en los espejos y otra parte la determinará la calidad del acabado de la parábola. El factor ρ_D indica el porcentaje de la radiación neta reflejada por la parábola.

Otros factores que intervienen en el aprovechamiento de la energía son: el factor de intersección " γ " que es el porcentaje que representa la eficiencia del seguimiento solar. La energía que llega al punto focal es la reflejada por los espejos, con una eficiencia de reflexión " ρ_D ".

Otro porcentaje que afecta el aprovechamiento de la energía es la absorción " α " que es característica del material utilizado en la base del generador y depende también del acabado de éste, así como de la temperatura a la que sea sometido el material de la base del generador.

De lo anterior se obtiene la energía reflejada por el espejo con seguimiento solar que va a absorber el generador de vapor y le llamaremos energía incidida en el generador de vapor, " QI "; se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$QI = A \times HI \times \rho_D \times \gamma \times \alpha \quad (4.1.1)$$

donde

A es el área proyectada de la parábola en $\{m^2\}$

HI es el flujo de energía por unidad de área que proviene del sol
 $\{watts/m^2\}$

ρ_D reflectancia del espejo

γ eficiencia del seguimiento

α absorción de la base del generador

QI en $\{Watts\}$

Las consideraciones que siguen tienen como finalidad obtener un diagrama térmico o modelo matemático del fenómeno físico que permita evaluar y re

resolver numéricamente los flujos de calor y temperaturas del sistema.

El sistema térmico se calcula a partir de tres ecuaciones base que relacionan los flujos de calor que corresponden al generador de vapor.

$$QI = QU + QCF + QCB + QRF + QRB \quad (4.1.2)$$

$$QU = QAB + QK \quad (4.1.3)$$

$$QK = QST + QAR + QH2O + QPA \quad (4.1.4)$$

donde

QU es el calor útil en {Watts }

QK calor conducido en la base del generador

La ec 4.1.2 indica que una parte de la energía incidida "QI" es la energía útil "QU" que entra al sistema; la parte restante de la energía corresponde a las pérdidas de calor en la base del generador.

En la ec 4.1.3 una parte de la energía que llega a la base "QU" es almacenada por la base "QAB" y la otra parte es conducida hacia el interior del generador de vapor, "QK".

La ec 4.1.4 muestra la energía que pasa al interior del generador "QK", una parte de la cual calienta al agua, "QH2O".

La siguiente ecuación rige al sistema cuando existe producción de vapor. La energía que tiene el vapor a la salida del regulador de presión QVAP es la energía que tiene el vapor a la salida del generador de vapor QMAXV, pero se le restan las pérdidas y almacenamientos de calor en la tubería y en el aislante, así como la caída de presión que provoca la circulación -

del vapor en la tubería

$$QVAP = MVAP \times (HVAP - HBVAP) - WAP$$

donde

QVAP en {Watts}

En las siguientes figuras 4.1.1 y 4.1.2 se muestran los flujos de calor y distribución de las temperaturas en el generador de vapor y en la tubería.

4.2 Desarrollo Matemático de la Simulación Solar

Enseguida se hará un análisis de los flujos de calor y sus respectivas temperaturas que intervienen en el proceso de generación de vapor.

Tómese en cuenta la siguiente consideración: se genera inicialmente un valor de la temperatura del foco "TMAX" con el cual se calcula la temperatura de la base "TPMAX". En el caso de que los flujos de calor sean incongruentes se tiene que generar otro valor de "TMAX" hasta que los resultados concuerden con las ecuaciones base.

La relación que existe entre la temperatura focal "TMAX" y la temperatura de la base del generador "TPMAX" es la siguiente:

$$TPMAX = TMAX - \frac{QI * DXB}{kB * AF} \quad (4.2.1)$$

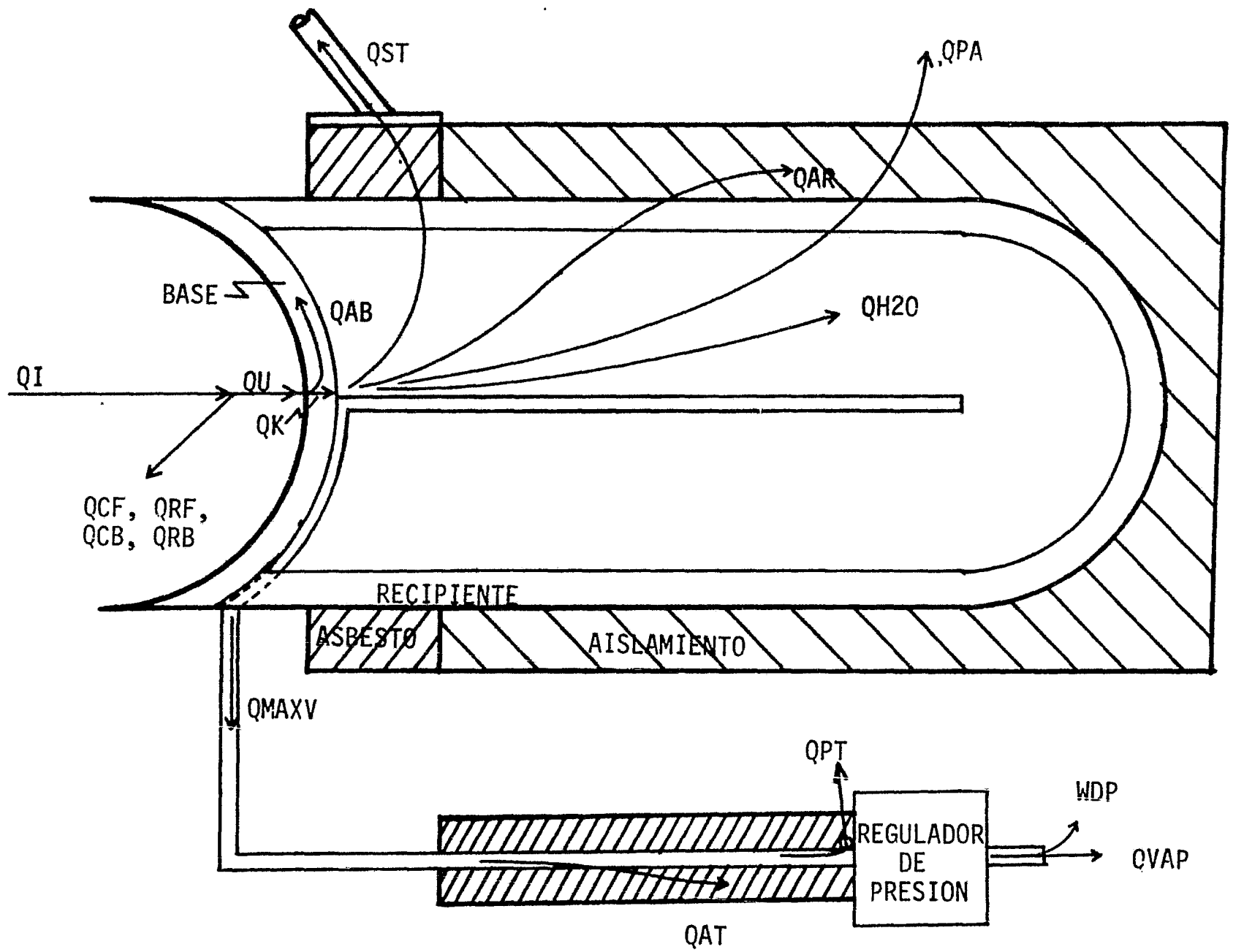


FIG 4.1.1. DIAGRAMA DE DISTRIBUCION DE FLUJOS DE CALOR

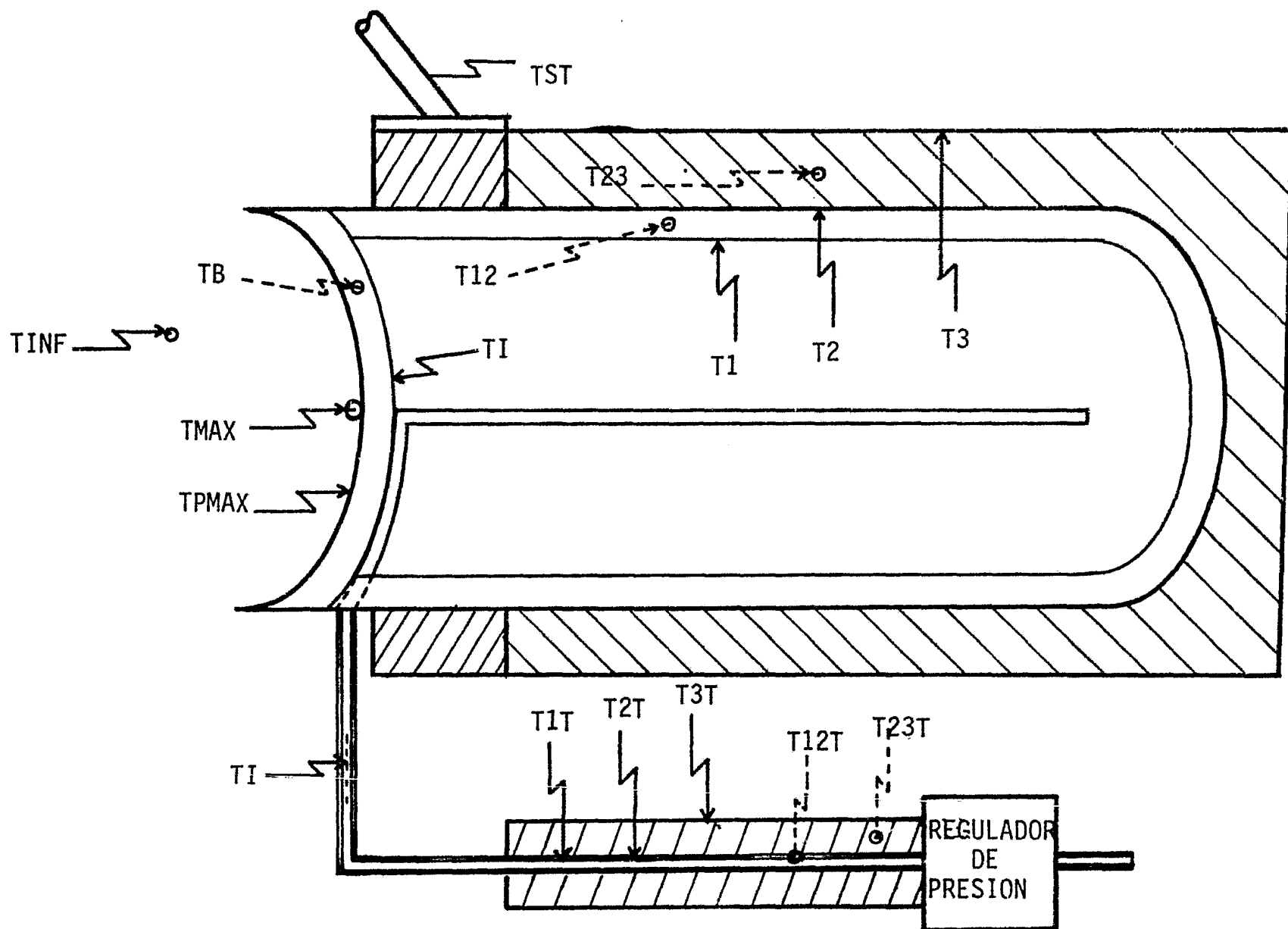


FIG 4.1.2. DIAGRAMA DE DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS

donde

kB	conductividad del material de la base {Watt/m °C}
TMAX	temperatura del foco {°C}
TPMAX	temperatura de la base del generador (exterior) {°C}
AF	área focal {m ² }
DXB	espesor de la base del generador {m}

El área de la base del generador "A base" está considerada en 2 partes, que corresponden al área focal "AF" y la parte que resta es "Ab", las cuales se encuentran a sus temperaturas correspondientes "Tmax" y "Tpmax", ver fig 4.2.1. Ver ec 4.2.7, 4.2.8 y 4.2.9.

Como la base se encuentra expuesta al ambiente se procede a calcular las pérdidas de calor por radiación y por convección para las diferentes áreas y temperaturas características de la base del generador de vapor. El cálculo para las pérdidas de calor en la base y en el foco se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$QCF = HCV * AF * \{TMAX - T\infty\} \quad (4.2.2)$$

$$QCB = HCV * AB * \{TPMAX - T\infty\} \quad (4.2.3)$$

donde

AB	área de la base {m ² }
T [∞]	temperatura ambiente {°C}
HCV	coeficiente de convección al ambiente {Watt/m ² °C}

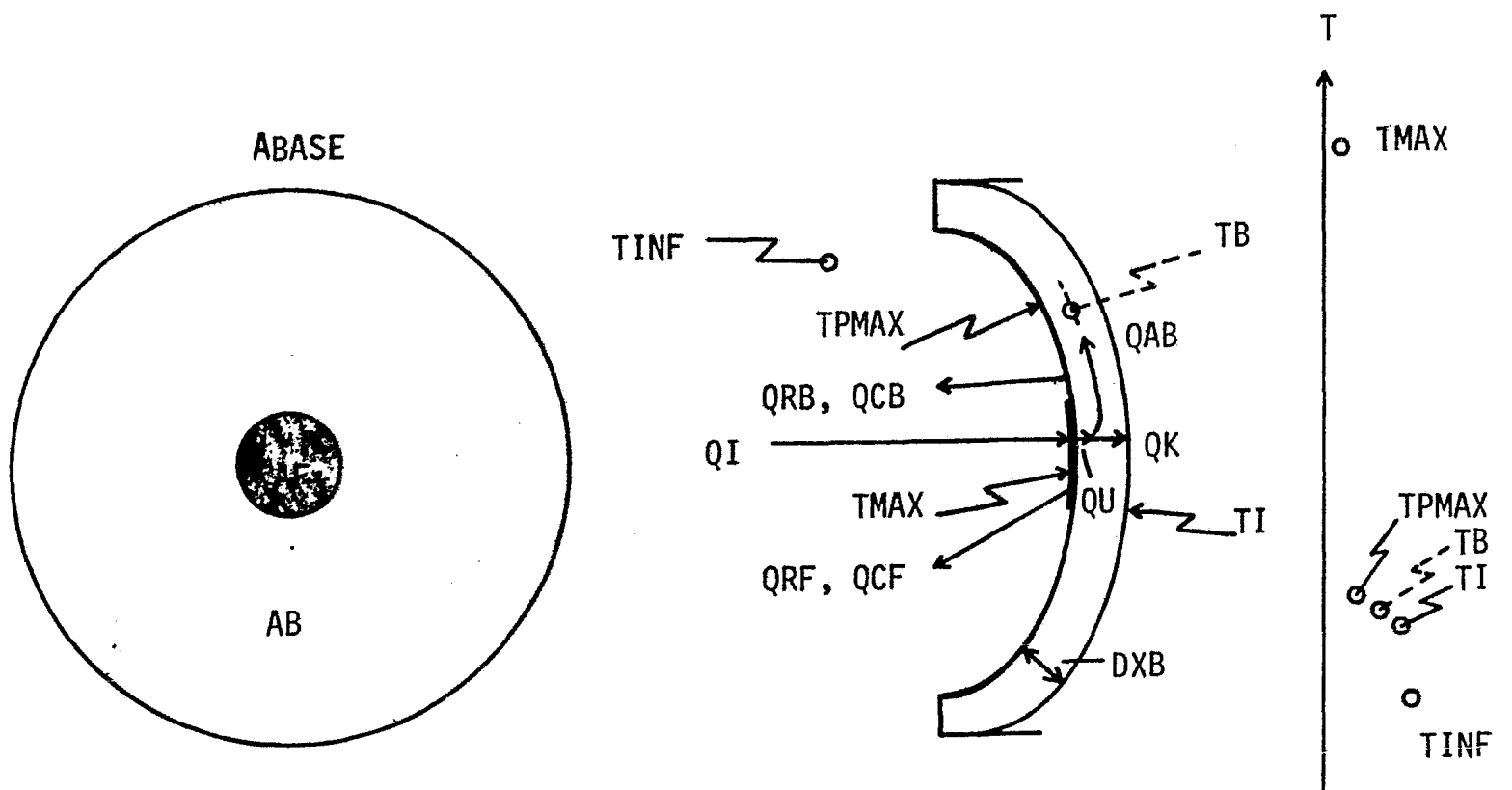


FIG 4.2.1. DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN LA BASE DEL GENERADOR Y FLUJOS DE CALOR

Este coeficiente se determina por una fórmula empírica, la cual está en función de la velocidad del viento

$$HCV = 5.7 + 3.8 V_v \quad (4.2.4)$$

donde

V_v velocidad del viento {m/seg}

HCV coeficiente de convección de calor al ambiente.

Las pérdidas por radiación se calculan mediante las siguientes ecuaciones.

$$Q_{RF} = A_F * \sigma * \{ \epsilon_2 * (T_{MAX} + 273)^4 - \epsilon_1 * (T_{\infty} + 273)^4 \} \quad (4.2.5)$$

$$Q_{RB} = A_B * \sigma * \{ \epsilon_2 * (T_{P_{MAX}} + 273)^4 - \epsilon_1 * (T_{\infty} + 273)^4 \} \quad (4.2.6)$$

y

$$A_{BASE} = A_F + A_B \quad (4.2.7)$$

$$A_F = A/C \quad (4.2.8)$$

$$A_{BASE} = \pi (R_1)^2 \quad (4.2.9)$$

donde

C concentración de la parábola

A_{BASE} área total de la base del generador {m²}

σ es constante de proporcionalidad = 5.67×10^{-8} {Watt/m²°K⁴} según Tyndall

ϵ_2 emisividad del generador al ambiente = 0.95 para $T = 1000$ °F

ϵ_1 emisividad del ambiente del generador = 0.5

Para encontrar el calor útil "QU" se despeja de la primera ecuación base y se tiene

$$QU = QI - \{QCF + QCB + QRF + QRB\}$$

De la segunda ecuación base se sustituye por sus variables y se despeja la temperatura interior del generador "TI"

$$TI = \frac{QU - \frac{MB * CPB}{\Delta t} * \left\{ \frac{TPMAX}{2} - TB \right\} - \frac{kB * ABASE}{DXB} * TPMAX}{\frac{MB * CPB}{2\Delta t} - \frac{kB * ABASE}{DXB}} \quad (4.2.10)$$

donde

Δt intervalo de tiempo {seg}

MB masa de la base del generador {kg}

CP calor específico de el material de la base {Joule/Kgm °C}

TB temperatura promedio de la base del generador {°C}

Se procede a calcular el calor almacenado por la base del generador "QAB" y por el agua "QH2O", el calor conducido por la base del generador "QK" y el calor conducido por los soportes del generador "QST"

$$QAB = \frac{MB * CPB}{\Delta t} * \left\{ \frac{TI + TPMAX}{2} - TB \right\} \quad (4.2.11)$$

$$QH2O = \frac{MH2O}{\Delta t} * \frac{(HF - HO)}{(TEB - TO)} * (TI - T) \quad (4.2.12)$$

$$QK = \frac{kB * ABASE}{DXB} * (TPMAX - TI) \quad (4.2.13)$$

$$QST = \frac{2 * kASB * ABARRA}{DXASB} * (TPMAX - TST) \quad (4.2.14)$$

Determinando lo anterior se procede a calcular las pérdidas de calor al ambiente y el almacenamiento de calor del generador de vapor. Para encontrarlo se tiene la temperatura "TI" del agua y se necesita calcular - iterativamente la temperatura interna del recipiente "T1" para determinar el coeficiente de convección natural que existe entre el agua y el recipiente para así obtener el valor del coeficiente global de transmisión de calor que permita calcular las pérdidas de calor.

Para determinar lo anterior se necesita conocer las propiedades físicas del agua, como son el volumen específico "v", la viscosidad dinámica "μ", el coeficiente de expansión volumétrica "β" y el calor específico "CP". A su vez, los valores anteriores se encuentran en función de la - temperatura "TM", que es el promedio de la temperatura del agua "TI" y de la temperatura interna de la pared del recipiente T1. Se ajustan los valores en cada intervalo desde la temperatura inicial "To" hasta la temperatura de ebullición del agua "TEB"

$$T_M = \frac{T_I + T_1}{2} \quad (4.2.15)$$

$$v = v_o + \frac{v_F - v_o}{T_{EB} - T_o} * (T_M - T_o) \quad (4.2.16)$$

$$\mu = \mu_o + \frac{\mu_F - \mu_o}{T_{EB} - T_o} * (T_M - T_o) \quad (4.2.17)$$

$$\beta = \beta_o + \frac{\beta_F - \beta_o}{T_{EB} - T_o} * (T_M - T_o) \quad (4.2.18)$$

$$C_p = C_{p_o} + \frac{C_{p_F} - C_{p_o}}{T_{EB} - T_o} * (T_M - T_o)$$

Ver fig 4.2.2.

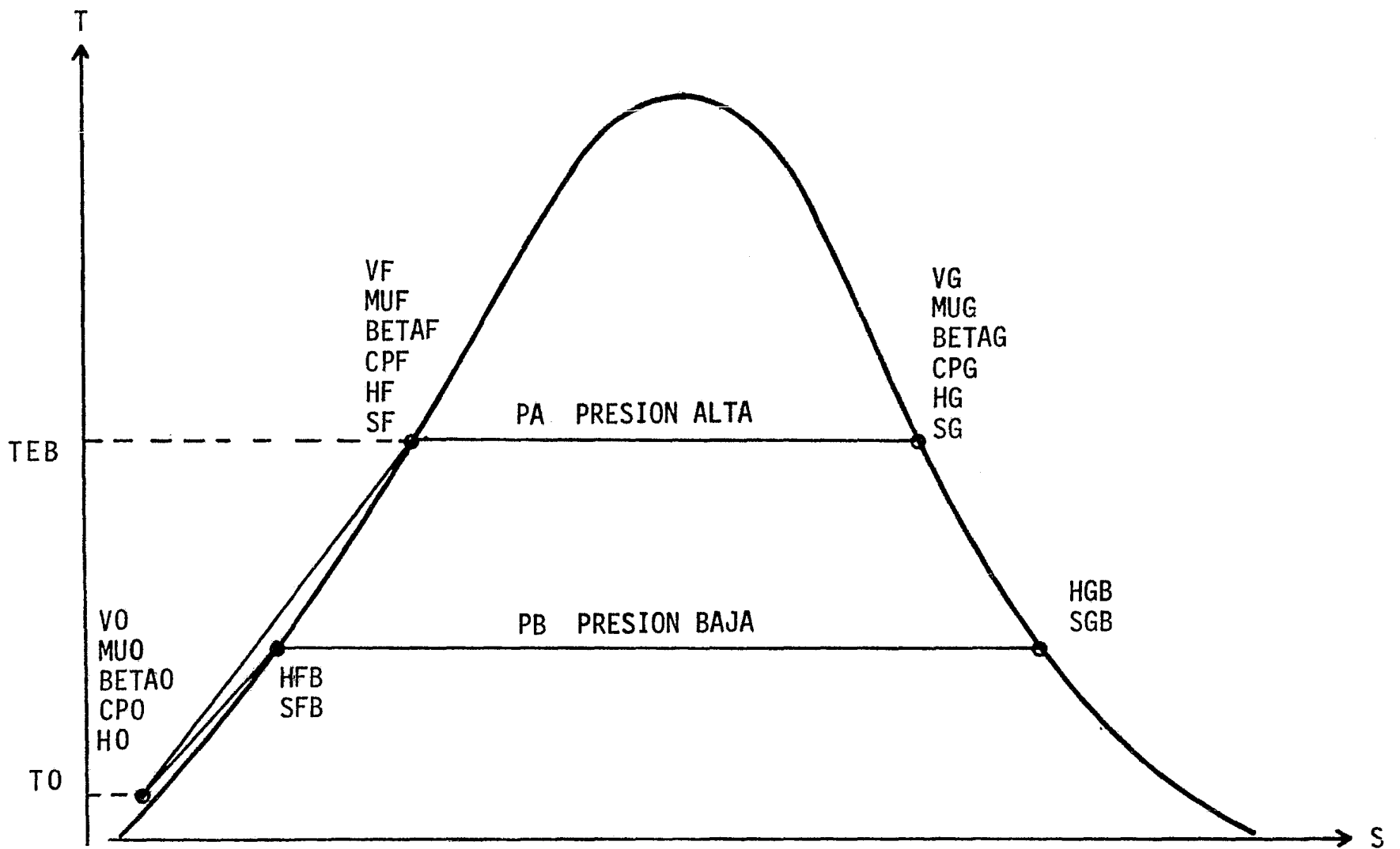


FIG 4.2.2 PROPIEDADES CONSIDERADAS DEL AGUA

Ya determinadas las propiedades físicas del agua se calcula el coeficiente de convección natural "HCNAT" que está en función de los adimensionales Grashof "GRL", Prandtl "PR" y Nusselt " N_{uL} ", conductividad "kR", longitud característica "L" (altura del recipiente), dependiendo también de la posición a la que se encuentra el tanque (vertical-horizontal).

En el caso particular de la transmisión de calor, cuando se analiza para paredes verticales, " N_{uL} " adquiere el siguiente valor

$$N_{uL} = 0.10 * (GRL * PR)^{1/3}$$

y para paredes horizontales

$$N_{uL} = 0.14 * (GRL * PR)^{1/3}$$

Cuando el captador está apuntado hacia el Sol se define el ángulo " θ_z " como aquel formado entre la radiación solar y la vertical del lugar. Con este ángulo se determina la inclinación del generador y se relacionan las dos ecuaciones de una forma lineal para obtener la siguiente expresión:

$$N_{uL} = \left\{ 0.10 + 0.04 \frac{\theta_z}{90} \right\} * (GRL * PR)^{1/3} \quad (4.2.20)$$

donde

θ_z en grados

para $\theta_z = 0$ corresponde para paredes verticales

y $\theta_z = 90^\circ$ corresponde para paredes horizontales

Los adimensionales "GRL" y "PR" quedan representados por las siguientes ecuaciones

$$GRL = \frac{g * \beta * L^3}{v^2 * \mu^2} * (TI - T1) \quad (4.2.21)$$

$$PR = \frac{Cp * \mu}{kR} \quad (4.2.22)$$

donde

- g aceleración de la gravedad = 9.81 {m/seg²}
- v volumen específico del agua {m³/kg}
- β coeficiente de expansión volumétrica del agua {1/°C}
- μ viscosidad dinámica del agua {kg/m seg}
- L longitud característica (altura del generador {m})
- Cp calor específico del agua {J/kgm °C}
- kR conductividad del recipiente {Watt/m °C}
- TI temperatura del agua {°C}
- T1 temperatura interior del recipiente {°C}

Con lo anterior se determina la convección natural que está dada por

$$HCNAT = \frac{kR}{L} * N_{ul} \quad (4.2.23)$$

Con la siguiente ecuación se encuentra el coeficiente global de transmisión de calor "U_T". Para su cálculo intervienen las dimensiones del recipiente y sus propiedades físicas como la conductividad "kR", la convección natural "HCNAT" y las pérdidas por convección al ambiente "HCV"

$$U_T = \frac{1}{\frac{re}{r1 * HCNAT} + \frac{re \ln(r1/rj)}{kr} + \frac{re \ln(re/r1)}{kA} + \frac{1}{HCV}} \quad (4.2.24)$$

donde

r_e	radio exterior del aislante del recipiente {m}
r_1	radio exterior del recipiente {m}
r_i	radio interior del recipiente {m}
k_R	conductividad del recipiente {Watt/m °C}
k_A	conductividad del aislante {Watt/m °C}
HCNAT	coeficiente de convección natural del agua en el interior del recipiente {Watt/m ² °C}
HCV	coeficiente de convección exterior debido a la velocidad del viento {Watt/m ² °C}

Las pérdidas de calor al ambiente "QPA" se calculan conociendo el coeficiente global de transmisión de calor " U_T ", el área exterior del generador de vapor (considerando el aislamiento) "ARE" y la diferencia de temperaturas entre el agua " T_I " y el ambiente " T_∞ ".

$$QPA = U_T * ARE * (T_I - T_\infty) \quad (4.2.25)$$

donde

ARE {m²}

QPA {Watt}

a su vez

$$QPA = HCNAT * ARI * (T_I - T_{1PRI}) \quad (4.2.26)$$

por lo que despejando " T_{1PRI} " se obtiene

$$T_{1PRI} = T_I - \frac{QPA}{HCNAT * ARI} \quad (4.2.27)$$

donde

"ARI" area interior del recipiente

El valor de "T1" que se calculó anteriormente debe ser igual al de "T1PRI" para que el flujo de calor "QPA" y la convección "HCNAT" sea la correcta. Si existe variación, se genera iterativamente un nuevo valor de "T1" hasta que se cumpla la condición anteriormente señalada.

Con la temperatura "T1" y "QPA" se determinan las temperaturas "T2" y "T3", despejándolas de las siguientes ecuaciones :

$$QPA = \frac{kR * AR1}{DXR} * (T1 - T2) = \frac{kA * ARE}{DXA} * (T2 - T3)$$

$$T2 = T1 - \frac{QPA * DXR}{kR * AR1} \quad (4.2.28)$$

$$T3 = T2 - \frac{QPA * DXA}{kA * ARE} \quad (4.2.29)$$

donde

AR1 área exterior del recipiente

ARE área exterior del aislante del recipiente

Ver fig 4.2.3.

Con las temperaturas "T2" y "T3" se calcula el almacenamiento térmico del recipiente y del aislante QAR

$$QAR = \frac{MR}{\Delta t} * CPR * \left(\frac{T1+T2}{2} - T12 \right) + \frac{MA}{\Delta t} * CPA * \left(\frac{T2+T3}{2} - T23 \right) \quad (4.2.30)$$

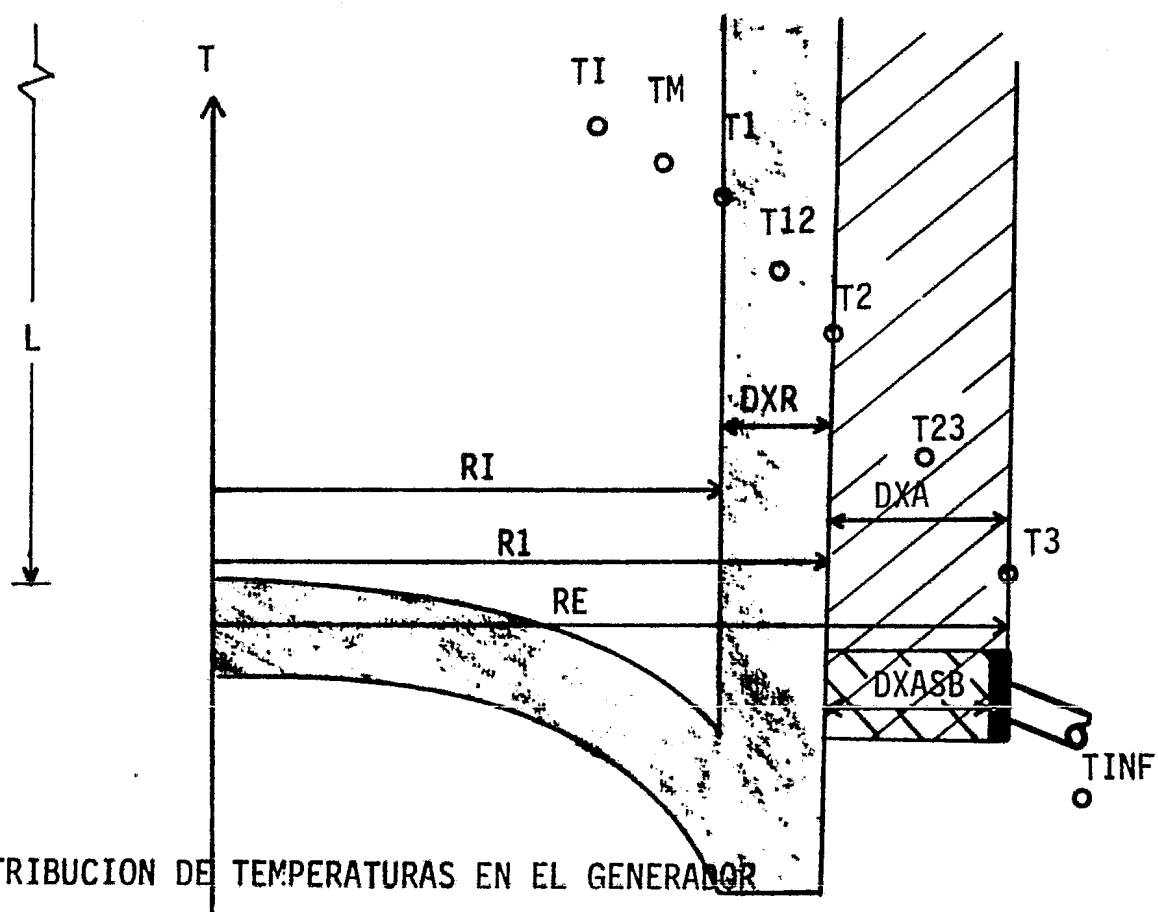


FIG 4.2.3. DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN EL GENERADOR

Se sustituye la tercera ecuación base en la segunda ecuación base y se obtiene

$$QUPRI = QAB + QST + QAR + QH2O + QPA$$

Sustituyendo los resultados obtenidos en la ecuación anterior se compara "QUPRI" con "QU", que deben resultar iguales para que se cumplan los demás flujos de calor. En caso contrario se tiene que generar otro valor de la temperatura focal "TMAX" y comenzar de nuevo el proceso para volver a calcular todos los flujos de calor con sus correspondientes temperaturas y los coeficientes de convección de calor. Este análisis corresponde al proceso en estado líquido.

Una vez terminados todos los flujos de calor se mandan a imprimir, y los valores finales de las temperaturas se convierten en valores iniciales para el siguiente intervalo de tiempo. También se modifica la hora del "RELOJ" y se incrementa un intervalo de tiempo, volviendo a calcular todas las variables del nuevo intervalo desde el principio del programa.

Cuando la temperatura del agua "TI" es mayor a la de ebullición "TEB" se hace un ajuste del intervalo de tiempo para que la temperatura "TI" sea igual a la de ebullición "TEB".

Para el análisis del vapor se resuelven las mismas ecuaciones básicas que para el líquido, pero la temperatura de ebullición "TEB" permanecerá constante.

$$TI = TEB$$

Inicialmente se tantea una temperatura focal "TMAX" iterativamente, teniendo en consideración lo anterior, hasta que se cumplan todos los flujos de calor que intervienen en las tres ecuaciones base.

Una vez determinadas las temperaturas y flujos de calor se procede a calcular "QST". De la segunda y tercera ecuaciones base, se obtiene el calor almacenado por el agua "QH20" y se despeja

$$QH20 = QU - \{QAB + QST + QPA + QAR\}$$

Se calcula la energía que posee el vapor "HH20" en función del calor almacenado por el agua en el intervalo de tiempo " Δt " y de la masa de agua que contenga el generador de vapor "MH20".

$$HH20 = H + \frac{QH20 * \Delta t}{MH20} \quad (4.2.31)$$

donde

"H" es la entalpía del vapor en el intervalo anterior

$$\left\{ \frac{\text{Joule}}{\text{kg}} \right\}$$

Una vez calculada esta energía se calcula la calidad del vapor "X"

$$X = \frac{(HH20 - HF)}{HFG} \quad (4.2.32)$$

Para calcular las características del vapor "v", " μ ", " β ", " c_p " se utiliza el valor promedio entre la calidad del vapor del intervalo anterior " X_0 " y la calculada anteriormente "X"

$$v = v_F + \left(\frac{X_0 + X}{2} \right) * v_{FG} \quad (4.2.33)$$

$$\mu = \mu_F + \left(\frac{X_o + X}{2}\right) * \mu_{FG} \quad (4.2.34)$$

$$\beta = \beta_F + \left(\frac{X_o + X}{2}\right) * \beta_{FG} \quad (4.2.35)$$

$$C_p = C_{pF} + \left(\frac{X_o + X}{2}\right) * C_{pFG} \quad (4.2.36)$$

Después de calcular las propiedades físicas del vapor como su volumen específico "v", la viscosidad dinámica "μ", el coeficiente de expansión volumétrica "β", el calor específico "Cp", la calidad "x" y los números adimensionales "Gr₁", "Pr", "Nu", con éstos se encuentra el coeficiente de convección natural "hc nat", el coeficiente global de pérdidas de calor "U_T" y finalmente se obtienen las pérdidas de calor al ambiente "q_{pa}" y se calcula un nuevo valor de "T_{1pri}" con la siguiente ecuación:

$$T_{1PRI} = T_I - \frac{Q_{PA}}{HC_{NAT} * A_{RI}} \quad (4.2.37)$$

Si "T_{1PRI}" y "T₁" son diferentes se encuentra un nuevo valor de "T₁" y se vuelve a iterar desde la entalpía del vapor "HH₂₀", ver ec 4.2.31.

Con el valor de "T₁" se calcula "T₂", "T₃", "Q_{AR}" y "Q_{H20P}" que se resuelve igual que "Q_{H20}"

$$Q_{H20P} = Q_U - \{Q_{AB} + Q_{ST} + Q_{AR} + Q_{PA}\} \quad (4.2.38)$$

Si los valores de "Q_{H20P}" y "Q_{H20}" difieren, se vuelve a calcular desde la entalpía del vapor "HH₂₀" hasta que coincidan los valores. Una vez que cumplan la condición anterior, se mandan a impresión los flujos del calor y las temperaturas. Posteriormente se determina el volumen específico del vapor "v_x" en el generador de vapor

$$v_x = v_F + X * (v_G - v_F) \quad (4.2.39)$$

y se calcula la masa de agua "M" que pueda contener la tubería y el generador a la calidad y presión que se encuentre. Se calcula la diferencia que existe entre la masa de agua con que se inició el proceso "MH20" y la masa que puede contener el generador "M" para conocer la masa de vapor "MV" que sale del generador.

$$M = VOL/V_x \quad \{Kg\} \quad (4.2.40)$$

$$MV = MH20 - M \quad \{Kg\} \quad (4.2.41)$$

donde VOL es el volumen de la tubería y generador de vapor $\{m^3\}$

El flujo de vapor "MVAP" es la masa de vapor "MV" que sale del generador en el intervalo de tiempo Δt

$$MVAP = \frac{MV}{\Delta t} \quad \{Kg/seg\} \quad (4.2.42)$$

Si "MV" es cero o negativo esto significa que no va a salir vapor del generador, por lo que se hará $MV = 0$.

Debido a las pérdidas de calor que existen en la tubería "QPT" la calidad del vapor que se tiene a la salida del generador "X" disminuirá a "XV", que será comparada iterativamente con el valor de "XVPRI", hasta que sean iguales. Lo anterior se calcula valuando "Cp", " μ ", " v " con una calidad promedio entre "X" y "XV".

$$C_p = C_{pF} + \left(\frac{X + XV}{2}\right) * C_{pFG} \quad (4.2.43)$$

$$\mu = \mu_F + \left(\frac{X + XV}{2}\right) * \mu_{FG} \quad (4.2.44)$$

$$v = v_F + \left(\frac{X + XV}{2}\right) * v_{FG} \quad (4.2.45)$$

Posteriormente se calcula el número de Reynolds "RED" en función del diámetro de la tubería

$$RED = \frac{VEL * 2 * RIT}{\mu * v} \quad (4.2.46)$$

donde "VEL" es la velocidad del vapor en la tubería en {m/seg} y se calcula como

$$VEL = MVAP * \frac{v}{\pi * (RIT)^2} \quad (4.2.47)$$

Para el cálculo de la transferencia de calor, se calcula el Prandtl "PR"

$$PR = \frac{Cp * \mu}{kT} \quad (4.2.48)$$

El coeficiente de convección forzada debido al flujo de vapor en la tubería se calcula de la siguiente forma

$$HCT = \frac{kT}{2 * RIT} * 0.023 * (RED)^{0.8} * (PR)^{1/3} \quad (4.2.49)$$

Análogamente las dimensiones, conductividades y coeficientes de convección del generador de vapor son cambiadas por las correspondientes de la tubería para poder determinar el coeficiente global de transferencia de calor "U_{TUB}" en la tubería.

$$U_{TUB} = \frac{1}{\frac{RET}{RIT \cdot HCT} + \frac{RET \cdot \ln(R1T/RIT)}{kT} + \frac{RET \cdot \ln(RET/R1T)}{k_{AT}} + \frac{1}{HCV}} \quad (4.2.50)$$

y

$$QPT = U_{TUB} * ATE * (TI - T_{\infty}) \quad (4.2.51)$$

donde

- RET es el radio externo del aislante de la tubería {m}
- RIT radio interno de la tubería {m}
- R1T radio externo de la tubería {m}
- HCT coeficiente de convección del vapor en la tubería {Watt/m²°C}
- kT conductividad de la tubería {Watt/m °C}
- k_{AT} conductividad del aislante de la tubería {Watt/m °C}
- HCV coeficiente de transmisión de calor al ambiente {Watt/m² °C}

ver figura 4.2.4.

Conocidas las pérdidas de calor "QPT" se calcula la entalpía que tiene el vapor "HV"

$$HV = HH20 - \frac{QPT}{MVAP} \quad (4.2.52)$$

y la calidad del vapor "XV" debe ser igual a la calidad "XVPRI" que se va a calcular. Si no cumple, genera otro valor de "XV" y se encuentran de nuevo las propiedades del vapor Cp, v, μ.

$$XVPRI = \frac{HV - HF}{HFG} \quad (4.2.53)$$

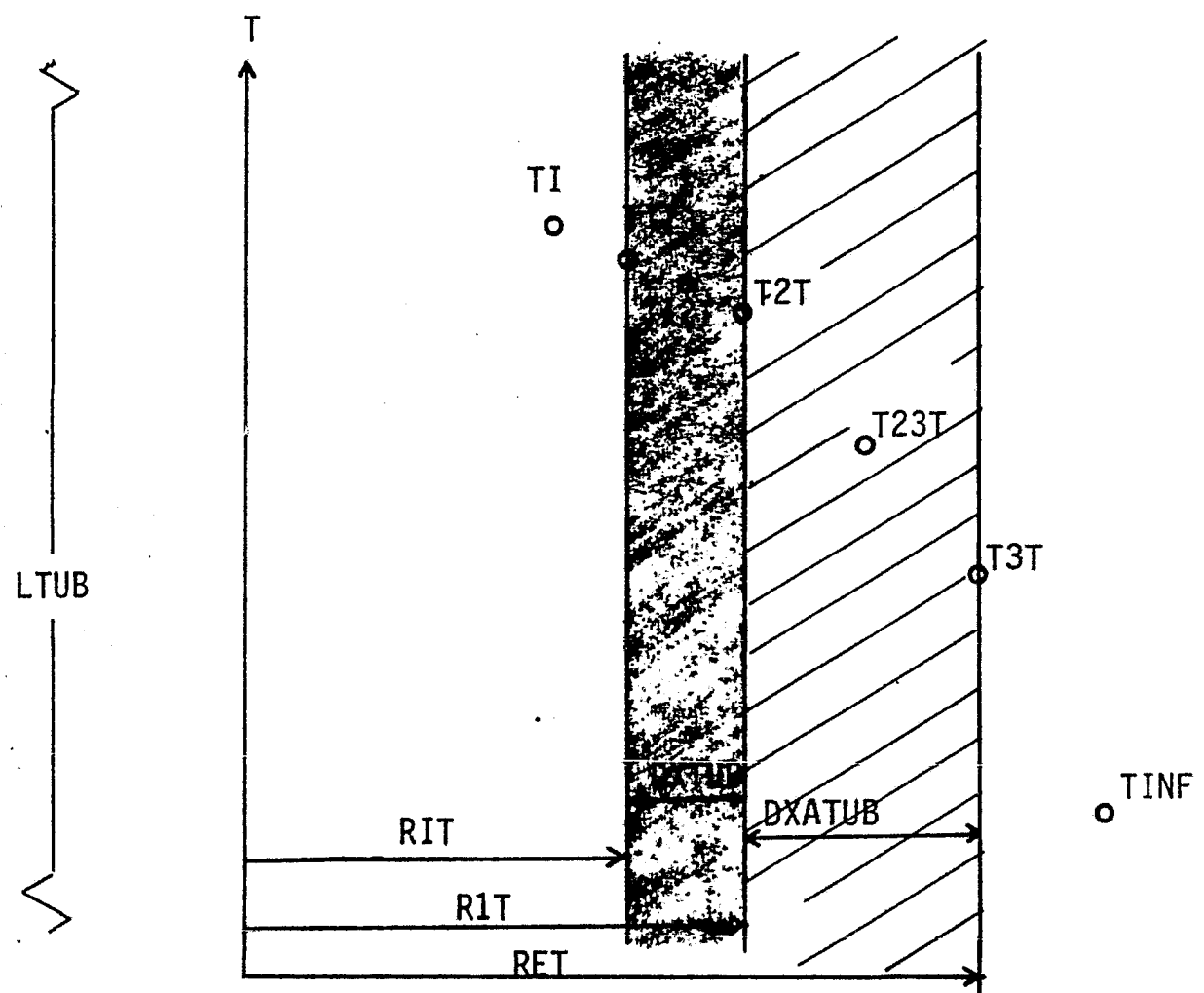


FIG 4.2.4. DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN LA TUBERIA

Se resuelve iterativamente hasta encontrar los valores de "QPT", "XV" que cumplan con las ecuaciones.

Para calcular el calor "QAT" almacenado en la tubería y el aislante es necesario conocer las temperaturas de interfase de la tubería para determinar la calidad del vapor "XVAP" y la entalpía "HVAP" a la salida del regulador de presión.

Así queda determinado el nivel máximo de energía del vapor, por lo que se debe conocer el nivel mínimo que corresponde a la presión atmosférica.

La energía térmica que puede suministrar el vapor se puede transformar en energía mecánica al expandir el vapor en el motor de vapor. Teóricamente, la expansión se calcula como un proceso isentrópico.

El cálculo de las temperaturas de la tubería y del aislante se realiza como sigue:

$$T_{1T} = T_I - \frac{Q_{PT}}{HCT * AT_I} \quad (4.2.54)$$

$$T_{2T} = T_{1T} - \frac{Q_{PT} * (R_{1T} - R_{IT})}{k_T * AT_1} \quad (4.2.55)$$

$$T_{3T} = T_{2T} - \frac{Q_{PT} * (R_{ET} - R_{1T})}{k_{AT} * ATE} \quad (4.2.56)$$

donde

T_{1T} es la temperatura interna de la tubería {°C}

T_{2T} temperatura externa de la tubería {°C}

T_{3T} temperatura externa del aislante {°C}

Se calcula el calor almacenado en la tubería y el aislante "QAT" y se determina por el cambio de temperaturas en el intervalo de tiempo.

$$QAT = \frac{MT * CPT}{\Delta t} * \left(\frac{T1T+T2T}{2} - T12T \right) + \frac{MAT*CPAT}{\Delta t} * \left(\frac{T2T+T3T}{2} - T23T \right) \quad (4.2.57)$$

Las pérdidas de calor de la tubería "QPT" y almacenamiento "QAT" son conocidas por lo que se pueden calcular la entalpía a que se encuentra el vapor "HVAP"

$$HVAP = HH2O - \frac{QPT + QAT}{MVAP} \quad (4.2.58)$$

y encontramos la calidad del vapor "XVAP" y la entalpía "SVAP"

$$XVAP = \frac{HVAP - HF}{HFG} \quad (4.2.59)$$

$$SVAP = SF + XVAP * SFG \quad (4.2.60)$$

Como el proceso de expansión se considera isentrópico $S = cte$ se pueden calcular las condiciones del vapor a la presión baja o atmosférica "PB" y encontrar así la calidad "XBVAP" y la entalpía "HBVAP" correspondientes.

$$XBVAP = \frac{SVAP - SF_B}{SFG_B} \quad (4.2.61)$$

$$HBVAP = HF_B + XBVAP * HFG_B \quad (4.2.62)$$

Para calcular las pérdidas de presión en la tubería " ΔP " es necesario conocer la velocidad promedio del vapor "VELT" a lo largo de la tubería, calculando el volumen específico medio "VXM" del vapor valuado para el promedio de la calidad de entrada "X" y de la salida "XVAP". Ver fig 4.2.5.

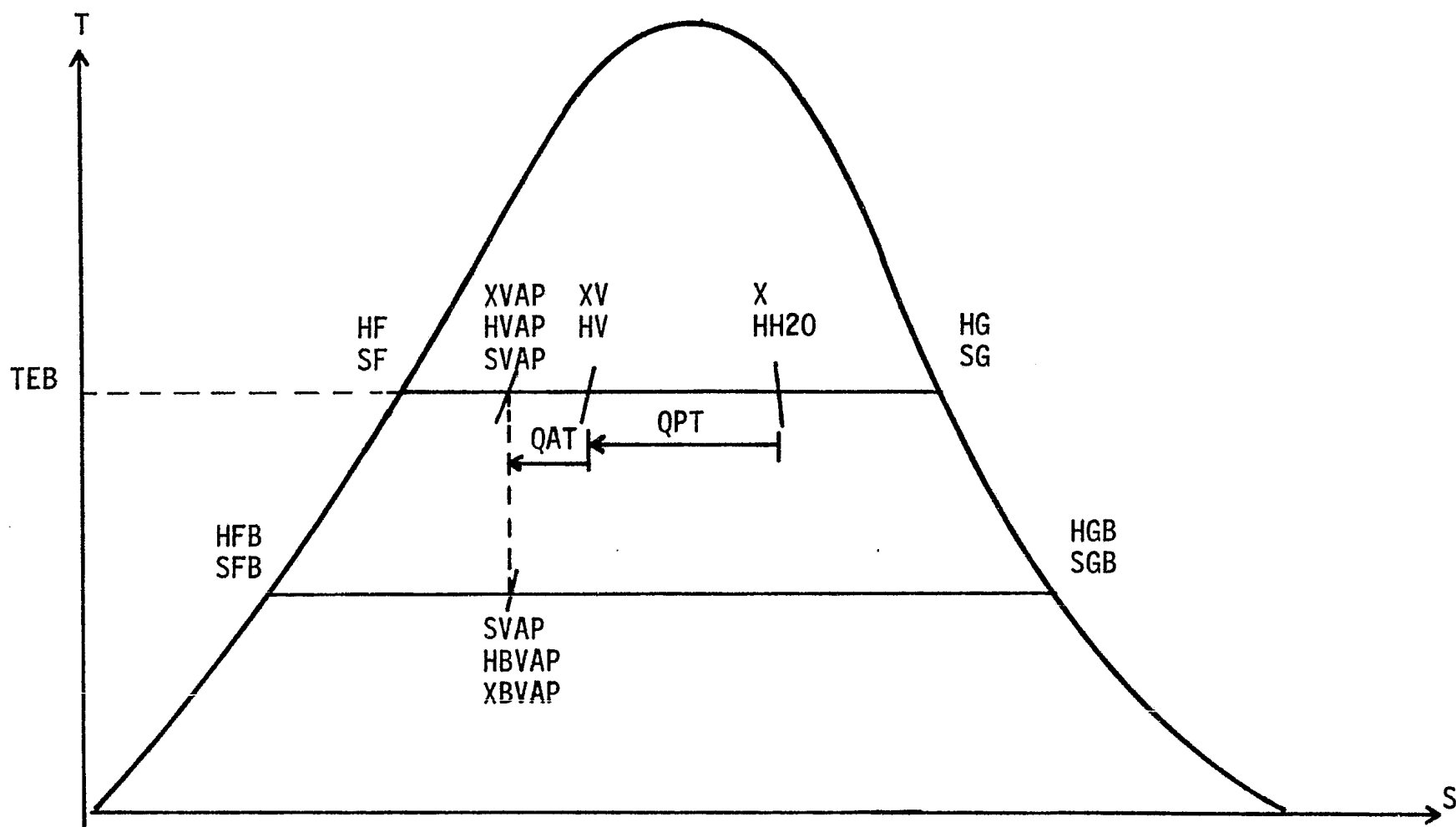


FIG 4.2.5 ANALISIS DEL VAPOR EN LA TUBERIA

$$VXM = V_F + \frac{X + XVAP}{2} * V_{FG} \quad (4.2.63)$$

$$VELT = \frac{MVAP * VXM}{\Pi * (RIT)^2} \quad (4.2.64)$$

También se deben determinar las propiedades del vapor, como la viscosidad dinámica " μ " promedio.

$$\mu = \mu_F + \frac{X + XVAP}{2} * \mu_{FG} \quad (4.2.65)$$

Para calcular la caída de presión en la tubería " ΔP " que existe por la circulación del vapor dentro de ella, se utilizan las siguientes ecuaciones que corresponden a los diferentes tipos de flujo que son laminar, transitorio y turbulento, siendo el número de Reynolds RED el que determina el tipo de flujo

$$RED = \frac{2 * RIT * VELT}{VXM * \mu} \quad (4.2.66)$$

y los factores de fricción " f " quedan determinados por las siguientes ecuaciones

$$f = \frac{64}{RED} \quad ; \text{ para } RED < 2100 \quad (4.2.67)$$

$$f = 0.184 * (RED)^{-0.8} \quad ; \quad 2100 < RED < 10,000 \quad (4.2.68)$$

$$f = 0.184 * (RED)^{-0.2} \quad ; \quad RED > 10000 \quad (4.2.69)$$

donde f corresponde al factor de fricción en la tubería. La caída de presión " ΔP " se puede calcular con la siguiente expresión

$$\Delta P = f * \frac{L \text{ TUB}}{4 * RIT} * \frac{(VELT)^2}{VXM * 10^5} \quad \{\text{Bar}\} \quad (4.2.70)$$

donde

LTUB es la longitud de la tubería {m}

RIT radio interno de la tubería {m}

Las pérdidas de energía $W_{\Delta P}$ debidas a la caída de presión ΔP en la tubería se determinan con la siguiente ecuación

$$W_{\Delta P} = MVAP * VXM * \Delta P * 10^5 \quad (4.2.71)$$

donde

$W_{\Delta P}$ en {Watts}

La energía que puede entregar el vapor Q_{VAP} se calcula por la expansión isentrópica desde la presión alta hasta la baja P_B , y se le resta la energía $W_{\Delta P}$ que se pierde en la tubería por la caída de presión ΔP .

$$Q_{VAP} = MVAP * (HVAP - HBVAP) - W_{\Delta P} \quad (4.2.72)$$

donde

Q_{VAP} en {Watts}

Como se analizó anteriormente, el vapor sale del sistema con alta energía Q_{VAP} , y si se acopla un motor de vapor a la salida del regulador de presión, se obtiene el cambio de energía de presión a energía mecánica. Una vez que se calcula la energía mecánica que entrega el vapor, se debe analizar el motor de vapor para encontrar su eficiencia "EMV" que está en función del flujo de vapor y de sus características de operación. De igual forma se determina el funcionamiento del generador eléctrico que se encuentra acoplado al motor de vapor, determinándose también su eficien -

cia global "EGE". Por último se obtiene la energía eléctrica generada "EE" con la siguiente ecuación:

$$EE = QVAP * EMV * EGE \quad (4.2.73)$$

donde

$$EE \text{ está en Watts y } 0 < EMV \leq 1, \quad 0 < EGE \leq 1$$

En este caso solo se analiza la energía mecánica que entrega el vapor al expanderse.

4.2.1 Simulación teórica del sistema térmico

El análisis térmico se hace mediante una serie de ecuaciones que representan el fenómeno físico en el proceso de generación de vapor. Por medio del programa de computadora se obtiene la solución numérica del proceso obteniéndose las temperaturas y flujos de calor para cada intervalo de tiempo, donde se observa el comportamiento del sistema a lo largo del período simulado.

Para encontrar esta solución numérica se emplea un método numérico de convergencia lineal con el cual se resuelve el proceso iterativamente hasta que encuentran los valores que satisfacen todas las ecuaciones correspondientes.

A continuación se describe la forma de introducir los datos para que se inicie el proceso: los valores numéricos de las variables se deben ordenar de acuerdo a las tarjetas de lectura de datos como se observa en el listado del programa. En este caso se pueden introducir los datos de

entrada usando tarjetas de computadora. El procedimiento a seguir consiste en sustituir los valores numéricos correspondientes al orden de colocación de las variables intercalando comas entre ellos; ver el listado de condiciones iniciales. En la fig 4.2.1.1 se muestra el diagrama de bloques y a continuación en la fig 4.2.1.2 el listado del programa de computadora.

4.2.2 Método numérico empleado para la solución de ecuaciones

Para aplicar este método se necesita que las ecuaciones que simulan el proceso estén ordenadas en forma lógica para que puedan ser resueltas de una forma iterativa.

Una característica de estas ecuaciones consiste en que son implícitas y cuando son resueltas afectan al resultado de la siguiente ecuación y así sucesivamente hasta que se resuelve la serie de ecuaciones. Después se compara si el valor generado satisface a éstas; de no ser así, existe una diferencia o error. Para esto se definen los ejes "X" y "Y" como el eje de las diferencias y el eje del valor buscado, respectivamente. Ver fig 4.2.2.1. La solución final se obtiene cuando la diferencia es menor que la aproximación deseada " ϵ ". La recta de convergencia es representada por la siguiente ecuación:

$$Y = Y_1 - (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1) * X_1 \quad (4.2.3.1)$$

El procedimiento para aplicar la recta de convergencia se describe a continuación:

Se genera un valor inicial "Y" con el cual se resuelve una serie de ecuaciones y de estos resultados se obtiene la diferencia o error. A continuación

ción se genera otro valor de "Y" que resuelve las ecuaciones y se encuentra la nueva diferencia; si el resultado no cumple con la aproximación se rá el punto número 2.

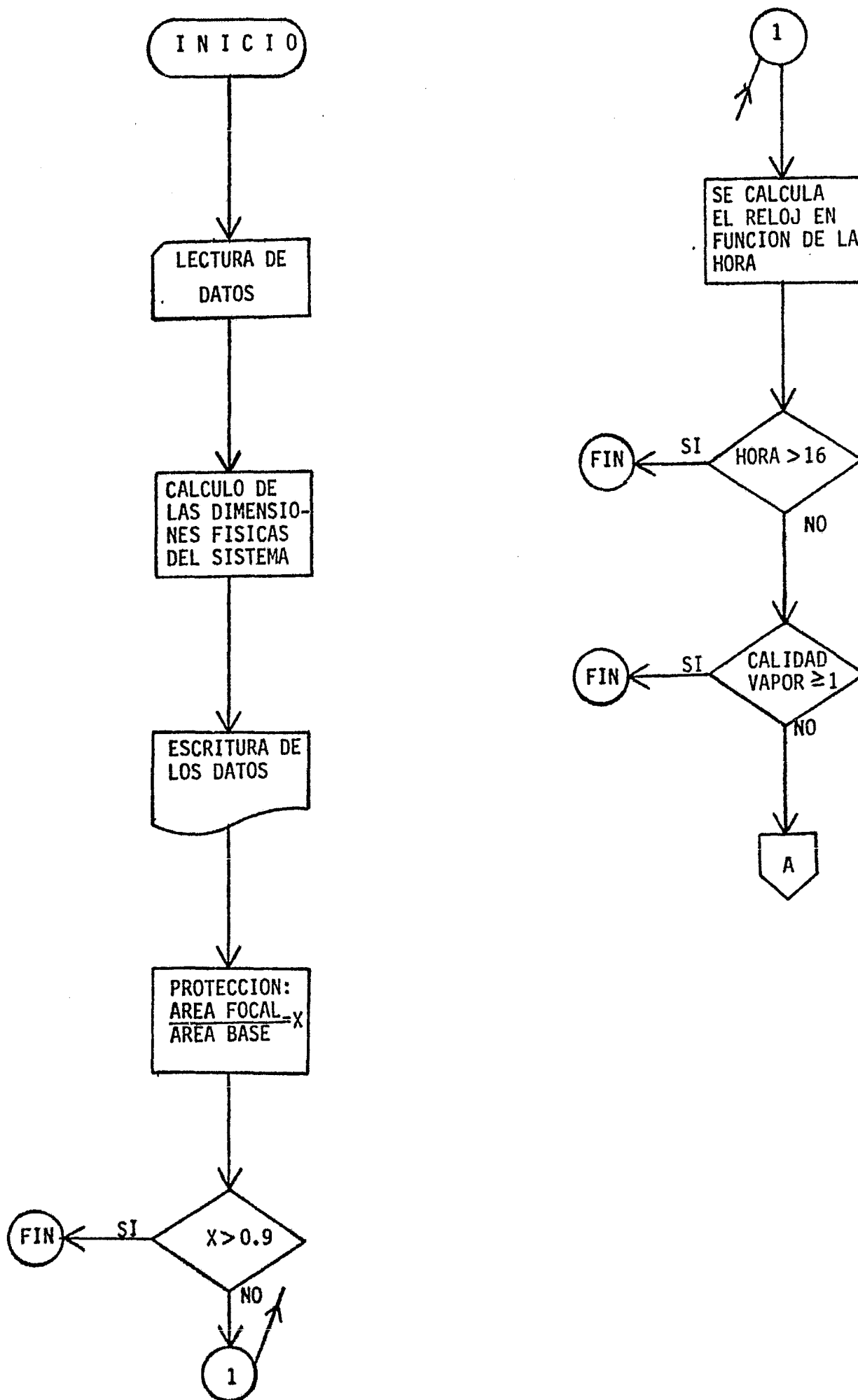
De los dos puntos anteriores, el punto que esté más cercano al resultado se llamará (X_1, Y_1) y el otro será (X_2, Y_2) . Con estos 2 puntos se encuentra un tercero por medio de la recta de convergencia, ver fig 4.2.2.2, y queda representada por la ec 4.2.3.1. Si cumple con la aproximación el valor de "Y" será el buscado, en caso contrario se desecha el punto (X_2, Y_2) y el tercer punto se compara con (X_1, Y_1) donde al punto más cercano se le asignará (X_1, Y_1) y al otro (X_2, Y_2) y entre los dos se generará el cuarto valor con la recta. Este procedimiento se sigue hasta encontrar la solución, y se tiene como límite un número determinado de iteraciones como protección al programa.

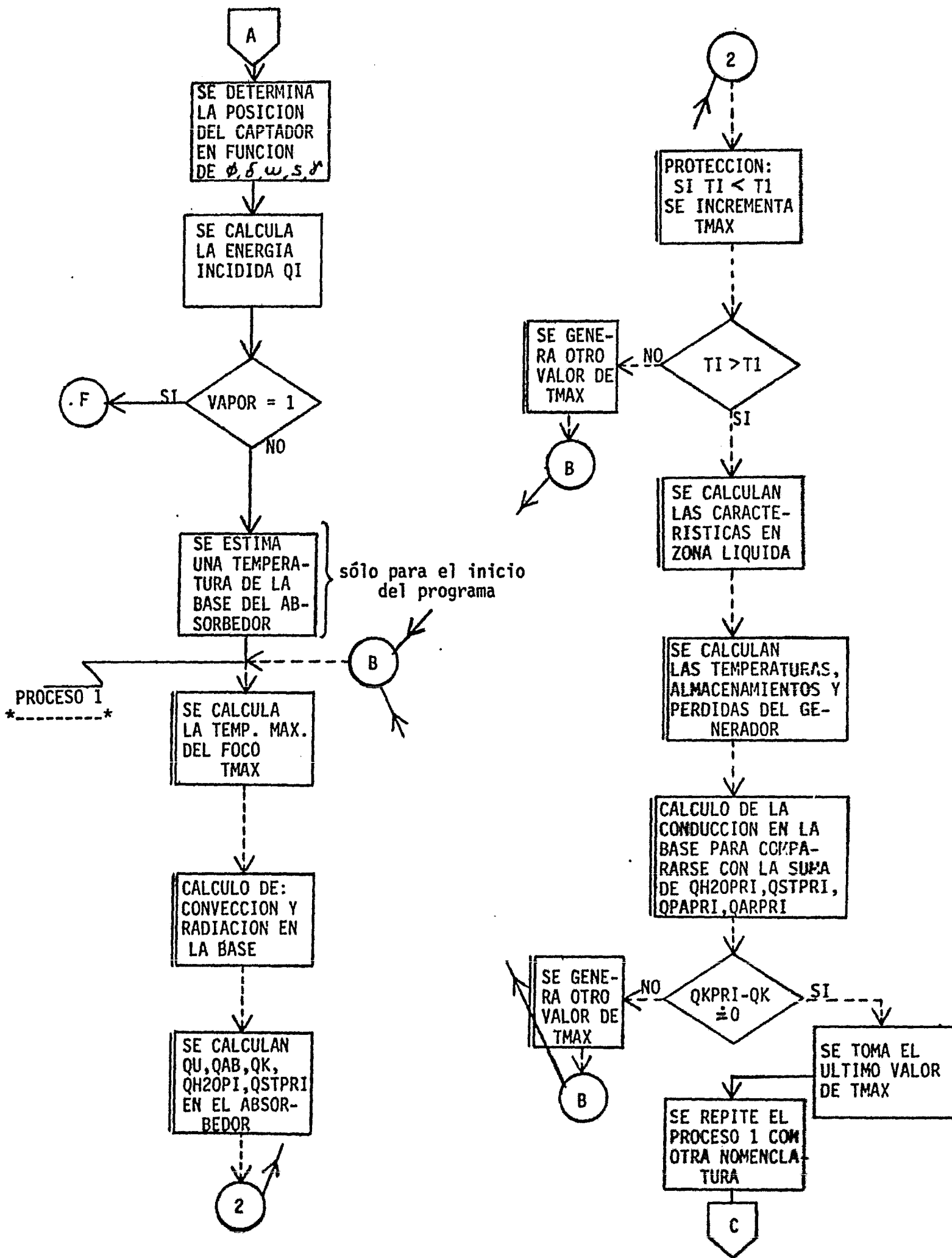
El método descrito anteriormente corresponde a un proceso iterativo simple con el cual se genera una variable. Ver fig 4.2.2.3.

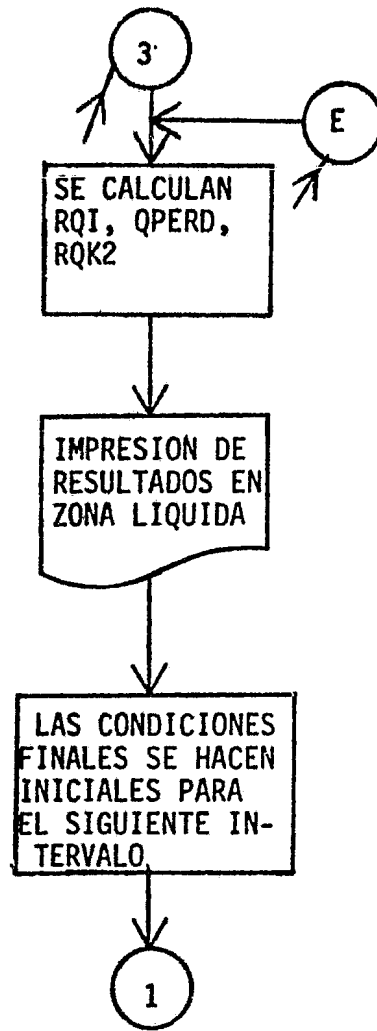
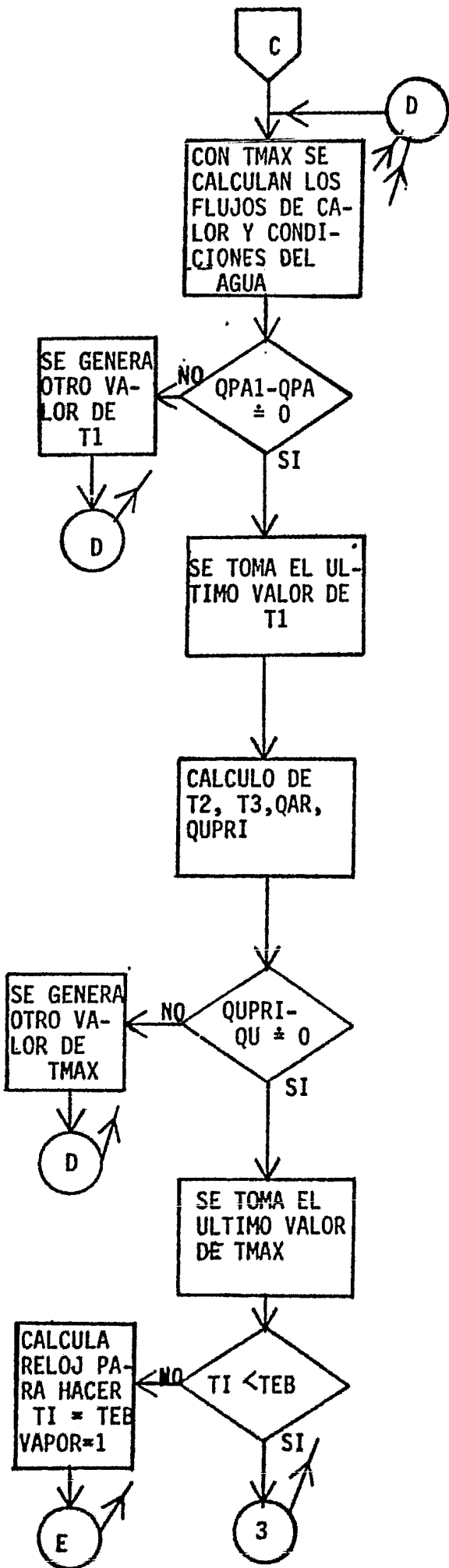
El método puede aplicarse para resolver dos variables simultáneas, las que están involucradas en las ecuaciones ya que al determinarse una se afecta el resultado de la otra. La forma de resolverlo se observa en la fig 4.2.2.3 donde se detalla el diagrama de bloques.

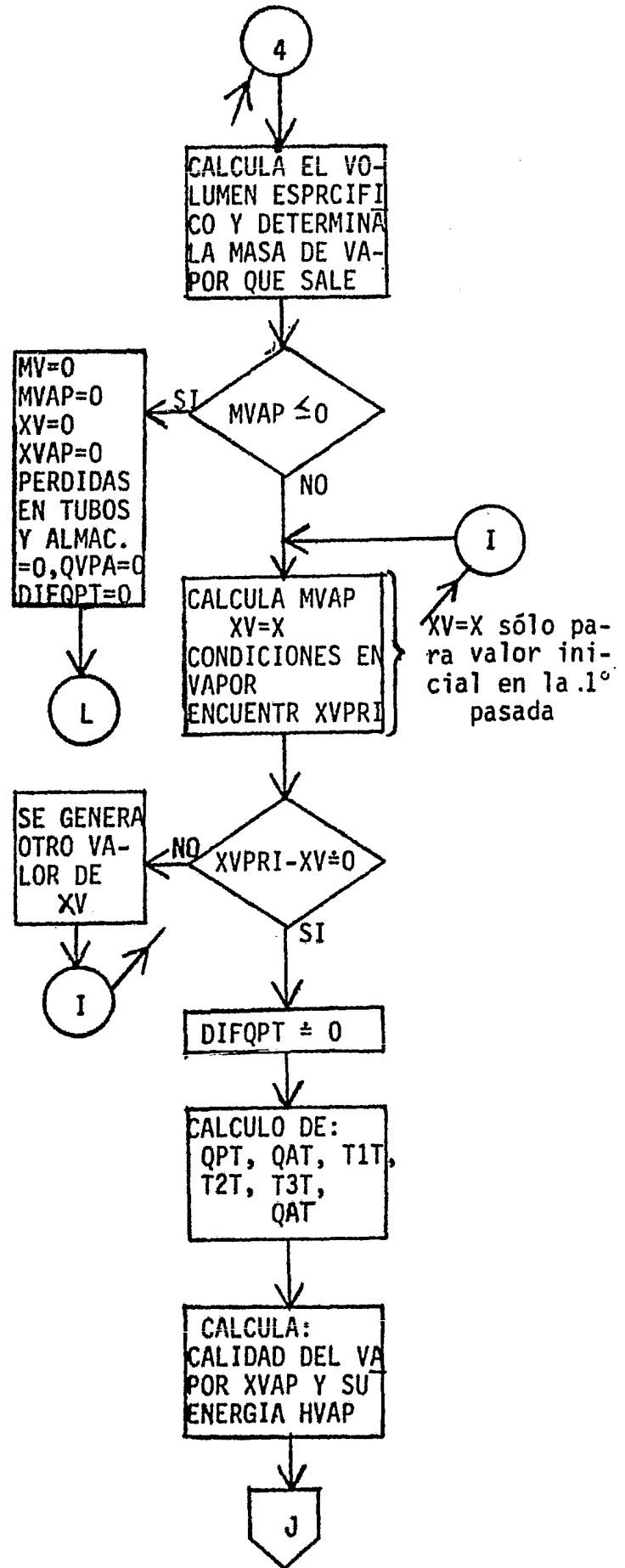
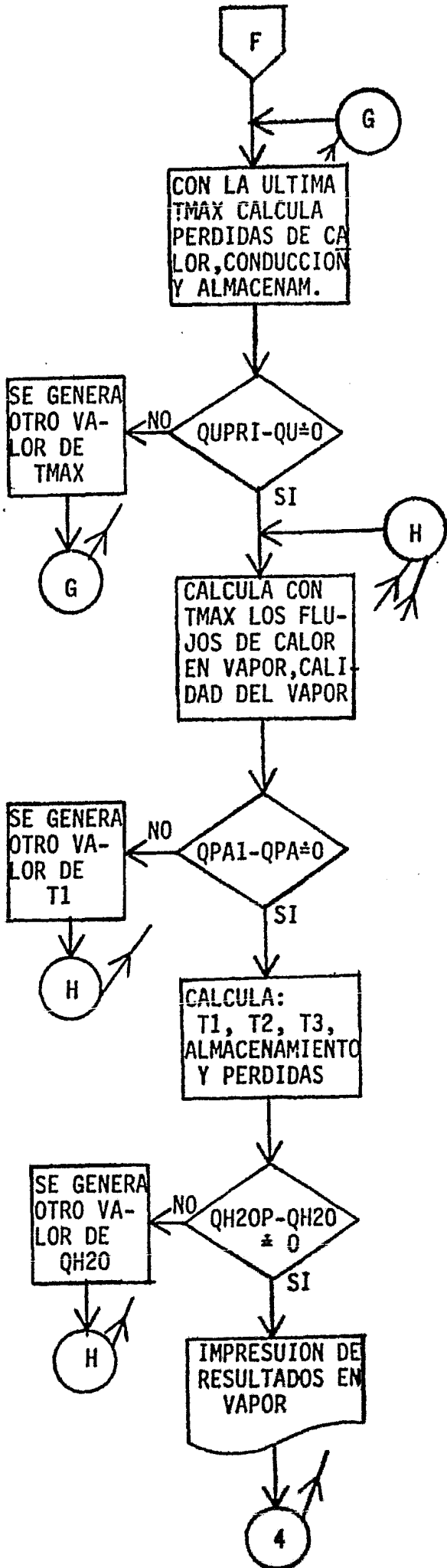
Para comprender cómo se resuelve se explica a continuación con un ejemplo: se quiere encontrar un valor de "Y" y el otro es "Ya" los cuales están im plicitos en las ecuaciones y se les asigna una aproximación "X" y "Xa" (sigue en la página 148)

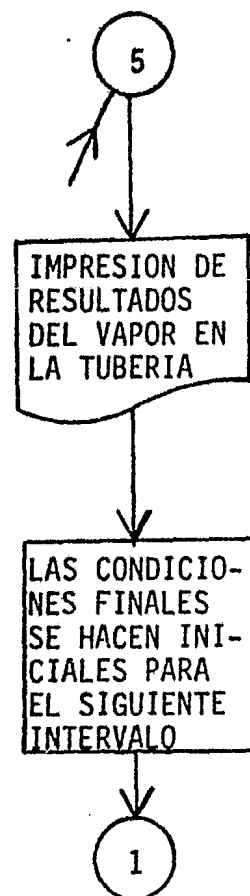
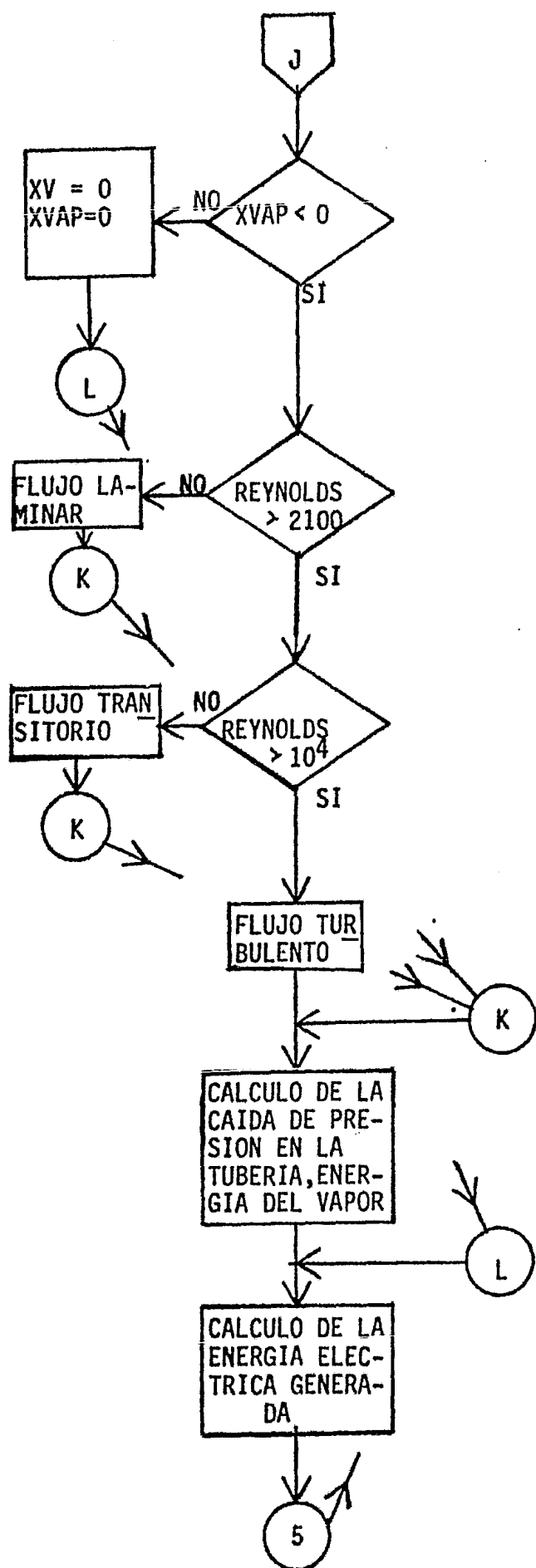
Fig 4.2.1.1. Diagrama de bloques del proceso de simulación solar











ORIGINATING UNIT: 10
PRIORITY: 50
USERCODE: IIFF.

11:41:27 BDI 1309 SYSTEM/FORTRAN.
CODE COMPILED: OCT 27, 1982 16:24:38 BY ALGUL 33.320
TASK TYPE: COROUTINE(CALL)
PRIORITY: 50
CODEFILE: OBJECT/ENERGIA,
USERCODE: IIFF.
11:42:01 1309 (IIFF)OBJECT/ENERGIA REMOVED ON CSC2 PK69.
11:42:02 1309 (IIFF)ENERGIA REMOVED ON CSC2 PK69.
11:42:03 EOI 1309 SYSTEM/FORTRAN.
PROCFSSOR TIME: 00:00:03.597 USERCODE: IIFF.
I/O TIME: 00:00:11.221 CARDS READ: 743.
READYQ TIME: 00:00:20.090 LINES PRINTED: 778.
INITPBIT TIME: 00:00:00.311 AVERAGE MEMORY USAGE: CODE=24246, DATA=10888
ELAPSED TIME: 00:00:36.507 MEMCRY INTEGRAL: CODE=359,298, DATA=161,343
DATA & CODE ALLOWED IN & OCCUPIED: GLOBAL.
INITIAL PBITS: 1/2.

11:42:04 EOJ 1306 ENERGIA,
PROCESSOR TIME: 00:00:00.099 USERCODE: IIFF.
I/O TIME: 00:00:00.169 AVERAGE MEMORY USAGE: CODE=64, DATA=1312
READYQ TIME: 00:00:00.923 MEMCRY INTEGRAL: CODE=0,017, DATA=0,352
INITPBIT TIME: 00:00:00.052 DATA & CODE ALLOWED IN & OCCUPIED: GLOBAL.
ELAPSED TIME: 00:00:39.147 INITIAL PBITS: 3/4.

OBJECTIVE LANGUAGE UNITS

FILE 8=FILE8,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00001000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 9=FILE9,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00002000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 10=FILE10,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00003000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 11=FILE11,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00004000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 12=FILE12,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00005000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 13=FILE13,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00006000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 14=FILE14,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00007000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 15=FILE15,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00008000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 16=FILE16,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00009000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 17=FILE17,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00010000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 18=FILE18,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00011000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 19=FILE19,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00012000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 20=FILE20,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00013000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 21=FILE21,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00014000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 22=FILE22,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00015000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 23=FILE23,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00016000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 24=FILE24,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00017000	C	FIB IS 0007 LUNG
FILE 25=FILE25,UNIT=PRINTER,RECORD=22	00018000	C	FIB IS 0007 LUNG
	00019000	C	FIB IS 0007 LUNG

START OF SEGMENT 002
 FORMAT SEGMENT IS 0006 LONG
 FORMAT SEGMENT IS 000A LONG

REAL KB,KASB,KA,KR,MUO,MUF,MIG,L,LTUB,MB,MR,IA,MT,PAT,MH2U,M,MV,
 1MVAP,KAT,MU,KT
 300 READ(5,/,END=600)

SND,FI,HBMAX,A,ROD,
 SGAMA,ALFA,C,VV,INF,
 SIGMA,EMIT2,EMIT1,CP,
 SKB,DXR,KASB,DXASB,TST,
 SABARRA,TO,TER,HF,HG,
 SV0,VF,VG,MUO,MUF,
 SMUG,7,RI,BETA0,BETAF,
 SBETAG,KA,UXA,CFR,
 SOXR,KR,CPA,CPQ,
 SCPE,CPG,S,GAMMA,I,
 SRIT,XTUB,XTATUB,LTUB,VOL,
 SCPT,CPAT,HFB,

00020000	C	002:0000:U
00021000	C	002:0000:U
00022000	C	002:0000:U
		FIB IS 0006 LUNG
00023000	C	002:0001:5
00024000	C	002:0000:11
00025000	C	002:0016:11
00026000	C	002:001E:11
00027000	C	002:0028:11
00028000	C	002:0032:11
00029000	C	002:003C:11
00030000	C	002:0040:11
00031000	C	002:004E:11
00032000	C	002:0056:11
00033000	C	002:0060:11
00034000	C	002:006A:11


```

$HGR, SF, SG, SFB, SGB,
$PA, PB, EMJ, EGF, KAT, KT
$READ(5,/)
$T1, T2, T3, T1, T2, T3,
$T1, T2, T3, T1, T2, T3,
$RELOJ
$READ(5,/)
$TEB, PA, HF, HG, VF, VG, IUF,
$MUG, RETAF, BETAG, CPF, CPG, SF, SG,
$VOL, MH20,
$A,
$HBMAX,
$VV,
$JXA,
$DXATUB,
$RI,
$CTE, EXPON,
$RIT, DXTUR, LIUB
N=40
NR=20
IF(A.GT.5.0) DELTAT=120.
IF(A.LE.5.0) DELTAT=300.
IF(A.LE.3.0) DELTAT=600.
G=9.81
PI=3.141592654
7=VOL/(PI*RI**2.)
L=N
AF=A/C
HCV=5.7+3.9*VV
HO=CP0*T0
RI=RI+DXR
ABASE=PI*RI**2.
ARI=2*PI*RI*7+PI*RI**2.
ARI=2*PI*RI*(Z+DXR)+PI*RI**2.
RE=RI+DXA
ARE=2*PI*RE*(Z+DXR+DXA)+2*PI*RE**2.-ABASE
AC=ABASE-AF
$IRELOJ
RE=RELOJ-4I
HORA=H+R/60
T12=(T1+T2)/2.
T23=(T2+T3)/2.
VAPOR=0.0
X=0
ITER1=0
ITER2=0
RETER=RI+DXTUR+DXATUJ
RI=RI+DXTUR
ATI=PI*2*RI*LTUR
ATI=PI*2*RI*LTUR
ATE=PI*2*RE*LTUR
MS=7850.*ABASE*DXB
MR=7850.*ARI*DXR
MA=100.*ARI*DXA
MAT=100.*DXATUR*ATI
VT=8900.*ATI*DXTUR
VOL=PI*RI**2.*7
WRITE(6,56)

```

```

56 FORMAT(10X,"CONDICIONES INICIALES DEL SISTEMA")
WRITE(6,*/(15)) RELOJ

```

00035000	00000000	00000000
00036000	00000000	00000000
00037000	00000000	00000000
00038000	00000000	00000000
00039000	00000000	00000000
00040000	00000000	00000000
00041000	00000000	00000000
00042000	00000000	00000000
00043000	00000000	00000000
00044000	00000000	00000000
00045000	00000000	00000000
00046000	00000000	00000000
00047000	00000000	00000000
00048000	00000000	00000000
00049000	00000000	00000000
00050000	00000000	00000000
00051000	00000000	00000000
00052000	00000000	00000000
00053000	00000000	00000000
00054000	00000000	00000000
00055000	00000000	00000000
00056000	00000000	00000000
00057000	00000000	00000000
00058000	00000000	00000000
00059000	00000000	00000000
00060000	00000000	00000000
00061000	00000000	00000000
00062000	00000000	00000000
00063000	00000000	00000000
00064000	00000000	00000000
00065000	00000000	00000000
00066000	00000000	00000000
00067000	00000000	00000000
00068000	00000000	00000000
00069000	00000000	00000000
00070000	00000000	00000000
00071000	00000000	00000000
00072000	00000000	00000000
00073000	00000000	00000000
00074000	00000000	00000000
00075000	00000000	00000000
00076000	00000000	00000000
00077000	00000000	00000000
00078000	00000000	00000000
00079000	00000000	00000000
00080000	00000000	00000000
00081000	00000000	00000000
00082000	00000000	00000000
00083000	00000000	00000000
00084000	00000000	00000000
00085000	00000000	00000000
00086000	00000000	00000000
00087000	00000000	00000000
00088000	00000000	00000000
00089000	00000000	00000000
00090000	00000000	00000000
00091000	00000000	00000000
00092000	00000000	00000000
00093000	00000000	00000000
00094000	00000000	00000000


```

123 Y1=TMAX
X1=DIFQK
TMAXP1=TMAX+(WK-QKPRI)/T*10.
TMAX=TMAXP1
GO TO 122
124 IF (ABS(DIFQK).GE.ABS(X1)) GO TO 129
X2=X1
Y2=Y1
X1=DIFQK
Y1=TMAX
GO TO 127
126 X2=DIFQK
Y2=TMAX
127 TMAXP1=Y1-(Y2-Y1)/(X2-X1)*X1
TMAX=TMAXP1
GO TO 122
120 TPMAX=TMAX-WI*DXB/(KB*AF)
QCF=HCV*AF*(TMAX-TINF)
QCB=HCV*AB*(TPMAX-TINF)
QRT=AF*SIGMA*(EMIT2*(TMAX+273)**4-EMIT1*(TINF+273)**4)
QRB=AB*SIGMA*(EMIT2*(TPMAX+273)**4-EMIT1*(TINF+273)**4)
QU=QI-(QCF+QCB+QRT+QRB)
T=(QU-CPB/2./DELTA-TA1*(TPMAX/2.-TB)-KB*ABASE/DXB*TPMAX)/
QAB*MB*CPB/DELTA*(TPMAX+TI)/2.-TB)
QK=KB*ABASE/DXB*(TPMAX-TI)
QSM=KASB*ABARRA/DXASB*(TPMAX-TI)
QHNO=MH2O*(HF=H0)*(TI-T)/(DELTA*(TEB-T0))
ITER1=0
FACTO1=1.0
140 T1=(TI+T1)/2.
V=VO+(VF-VO)*(TM-T0)/(TEB-T0)
MU=MU0+(MU1-MU0)*(T1-T0)/(TEB-T0)
BETA=BETA0+(BETA1-BETA0)*(TM-T0)/(TEB-T0)
CPO=CPO0+(CPO1-CPO0)*(TM-T0)/(TEB-T0)
GRL=G*BETA*(L**3)*(TI-T1)/(V**2*MU**2)
GRL=ABS(GRL)
GRL=CP*ND/KK
HCNAT=KR/L*(0.1+0.04*TEIAN/90.)*((GRLE9*PR)**(1./3.))*1000.
IF (CETE.EQ.1.0) HCNAT=KR/L*0.14*((GRLE9*PR)**(1./3.))*1000.
UT=1./((RE/RI/HCNAT+RE*(ALOG(RI/RI)))/KR+RE*(ALOG(RE/RI))/KA)
QPA=UT*ARE*(TI-TINF)
T1PRI=TI-QPA/(HCNAT*ARI)
QPA1=HCNAT*ARI*(TI-T1)
QIFQPA=QPA-QPA1
ITER1=ITER1+1
IF (ABS(QIFQPA).LE.0.1) GO TO 145
IF (ITER1.GT.N) GO TO 145
IF (ITER1.GE.2.0) GO TO 141
X1=DIFQPA
Y1=TI
RECTA1=0.0
DIF=ABS(T1-T1PRI)
NDIF=X1/ABS(X1)
141 NDIFP=DIF/PA/ABS(DIFQPA)
IF (NDIFP.EQ.0) GO TO 107
IF (RECTA1.EQ.1.0) GO TO 107
FACTO1=FACTO1*3.

```

002170000	000000000
002180000	000000000
002190000	000000000
002200000	000000000
002210000	000000000
002220000	000000000
002230000	000000000
002240000	000000000
002250000	000000000
002260000	000000000
002270000	000000000
002280000	000000000
002290000	000000000
002300000	000000000
002310000	000000000
002320000	000000000
002330000	000000000
002340000	000000000
002350000	000000000
002360000	000000000
002370000	000000000
002380000	000000000
002390000	000000000
002400000	000000000
002410000	000000000
002420000	000000000
002430000	000000000
002440000	000000000
002450000	000000000
002460000	000000000
002470000	000000000
002480000	000000000
002490000	000000000
002500000	000000000
002510000	000000000
002520000	000000000
002530000	000000000
002540000	000000000
002550000	000000000
002560000	000000000
002570000	000000000
002580000	000000000
002590000	000000000
002600000	000000000
002610000	000000000
002620000	000000000
002630000	000000000
002640000	000000000
002650000	000000000
002660000	000000000
002670000	000000000
002680000	000000000
002690000	000000000
002700000	000000000
002710000	000000000
002720000	000000000
002730000	000000000
002740000	000000000
002750000	000000000
002760000	000000000
002770000	000000000

```

107 GO TO 142
IF ((ITER1.GE.2.0).AND.(X2.GT.0.0).AND.(DIFQPA.GT.X2)
S.AND.(RECTA1.EQ.0.0)) FACTO1=-FACTO1
IF ((ITER1.GE.2.0).AND.(X2.LT.0.0).AND.(DIFQPA.LT.X2)
S.AND.(RECTA1.EQ.0.0)) FACTO1=-FACTO1
X2=DIFQPA
Y2=T1
IF (DIFQPA.GI.0.0) T1=T1+DT1/FACTO1
IF (DIFQPA.LI.0.0) T1=T1-DT1/FACTO1
RECTA1=0.0
GO TO 140
142 IF (ABS(DIFQPA).GE.ABS(X1)) GO TO 143
X2=X1
Y2=Y1
X1=DIFQPA
Y1=T1
GO TO 144
143 X2=DIFQPA
Y2=T1
144 T1=Y1-(Y2-Y1)/(X2-X1)*X1
RECTA1=1.0
GO TO 140
1450 WRITE(6,*(15)) RELOJ,GRL,PR,DIFQPA,HCNAT,UT
WRITE(6,*(15)) RELOJ,ITER1,ITER2,N,T1,T1PRI
145 T2=T1-QPA*DXR/KR/ARI
T3=T2-QPA*DXA/KA/ARE
QAR=MR/DELTAT*CPR*((T1+T2)/2.-T12)+MA*CPA/DELTAT*((T2+T3)/2.-T25)
QUPRI=QAB+JST+QH20+QPA+QAR
DIFQU=DIFQPA+QUPRI
ITER2=ITER1+1.0
IF (ABS(DIFQU).LE.0.1) GO TO 230
IF (ITER2.GI.W) GO TO 2300
IF (ITER2.GE.2.0) GO TO 108
X1=DIFQU
Y1=TMAX
X12=X1
Y12=Y1
X2=X1
Y2=Y1
RECTA2=0.0
TMAX2=(DIFQU)*DX3/KB/AF+TPMAX
DTMAX=ABS(TMAX-TMAX2)
NDIF=X1/ABS(X1)
NDIF2=NDIF
NDIFP=DIFQU/ABS(DIFQU)
108 X1=X12
Y1=Y12
NDIF=NDIF2
IF (NDIFP.EJ.NDIF) GO TO 109
IF (RECTA2.EG.1.0) GO TO 109
FACTOR=FACTOR*3.0
GO TO 147
109 X2=X22
IF ((ITER2.GE.2.0).AND.(X2.GT.0.0).AND.(DIFQU.GT.X2)
S.AND.(RECTA2.EQ.0.0)) FACTOR=-FACTOR
IF ((ITER2.GE.2.0).AND.(X2.LT.0.0).AND.(DIFQU.LT.X2)
S.AND.(RECTA2.EQ.0.0)) FACTOR=-FACTOR
X2=DIFQU
X22=X2
IF (DIFQU.LT.0.0) TMAX=TMAX+DTMAX/FACTOR
IF (DIFQU.GT.0.0) TMAX=TMAX-DTMAX/FACTOR
IF (TMAX.LT.(TMAXP-1.0)) TMAX=TMAX+DTMAX/ABS(FACTOR)

```

```

002790000
002790000
002800000
002810000
002820000
002830000
002840000
002850000
002860000
002870000
002880000
002890000
002900000
002910000
002920000
002930000
002940000
002950000
002960000
002970000
002980000
002990000
003000000
003010000
003020000
003030000
003040000
003050000
003060000
003070000
003080000
003090000
003100000
003110000
003120000
003130000
003140000
003150000
003160000
003170000
003180000
003190000
003200000
003210000
003220000
003230000
003240000
003250000
003260000
003270000
003280000
003290000
003300000
003310000
003320000
003330000
003340000
003350000
003360000
003370000
003380000

```

```

IF (TMAX.GT.(TMAXPI+1.0)) TMAX=TMAXPI-DTMAX/ABS(FACTOR)
RECTA2=0.0
GO TO 120
147 IF (ABS(DIFQU).GE.ABS(X1)) GO TO 148
X2=X1
Y2=Y1
X1=DIFQU
Y1=TMAX
GO TO 149
148 X2=DIFQU
Y2=TMAX
149 TMAX=Y1-(Y2-Y1)/(X2-X1)*X1
X12=X1
Y12=Y1
NDIF=X1/ABS(X1)
NDIF2=NDIF
RECTA2=1.0
GO TO 120
2300 WRITE(6,*/(15)) RELOJ,ITER2,ITER1,N,DIFQU,TMAX,TMAXPI
230 IF (TI.LT.TEB) GO TO 240
DELTAR=((TEB-T)/(TI-T)-1)*DELTAT
HORA=HORA+DELTAR/3600.
MI=HORA
R=HORA-IT
RMIN=R*60.
MIN=RMIN
MSEG=(RMIN-MIN)*60.
RELOJ=MI+MIN/100.+MSEG/10000.
N=(12.-HORA)*PI/12.
IF (VAPOR.GT.0.0) GO TO 231.
VAPOR=2
TMAX=TMAXI
TI=TI1
DELTAT=DELTAT+DELTAR+10.
IF (DELTAT.LI.60.0) DELTAT=DELTAT+10.
GO TO 110
231 TI=TEB
TMAX=TMAXI+(TMAX-TMAXI)*(DELTAT+DELTAR)/DELTAT
TPMAX=TPMAXI+(TPMAX-TPMAXI)*(DELTAT+DELTAR)/DELTAT
T1=TI1+(TI-TI1)*(DELTAT+DELTAR)/DELTAT
T2=T2I+(T2-T2I)*(DELTAT+DELTAR)/DELTAT
T3=T3I+(T3-T3I)*(DELTAT+DELTAR)/DELTAT
VAPOR=1.0
X=0
ITER3=0.
H=HF
T12T=(T1T+T2T)/2.
T23T=(T2T+T3T)/2.
DELTAT=10
240 R1Y=QU+(QCF+QCB+QRF+QRB)
QPERD=QCF+QCB+QRF+QRB+QST+QPA
QK2=QST+QAK+QH2O+QPA
V=W*180./PI
JH2OQI=JH2O/QI
TITER=TI/TEB
WRITE(8,1901)RELOJ,QI,RQI,QU,QUPRI
1001 FORMAT(/," RELOJ=",F7.4,2X," QI=",E12.5,2X," RQI=",F12.5,
$ 2X," QU=",E12.5,2X," QUPRI=",E12.5)
WRITE(9,1902)RELOJ,QCF,QCB,QRF,QRB
1002 FORMAT(/," RELOJ=",F7.4,2X," QCF=",E12.5,2X," QCB=",E12.5,
$ 2X," QRF=",E12.5,2X," QRB=",E12.5)

```

00339000	00000000	00000000
00340000	00000000	00000000
00341000	00000000	00000000
00342000	00000000	00000000
00343000	00000000	00000000
00344000	00000000	00000000
00345000	00000000	00000000
00346000	00000000	00000000
00347000	00000000	00000000
00348000	00000000	00000000
00349000	00000000	00000000
00350000	00000000	00000000
00351000	00000000	00000000
00352000	00000000	00000000
00353000	00000000	00000000
00354000	00000000	00000000
00355000	00000000	00000000
00356000	00000000	00000000
00357000	00000000	00000000
00358000	00000000	00000000
00359000	00000000	00000000
00360000	00000000	00000000
00361000	00000000	00000000
00362000	00000000	00000000
00363000	00000000	00000000
00364000	00000000	00000000
00365000	00000000	00000000
00366000	00000000	00000000
00367000	00000000	00000000
00368000	00000000	00000000
00369000	00000000	00000000
00370000	00000000	00000000
00371000	00000000	00000000
00372000	00000000	00000000
00373000	00000000	00000000
00374000	00000000	00000000
00375000	00000000	00000000
00376000	00000000	00000000
00377000	00000000	00000000
00378000	00000000	00000000
00379000	00000000	00000000
00380000	00000000	00000000
00381000	00000000	00000000
00382000	00000000	00000000
00383000	00000000	00000000
00384000	00000000	00000000
00385000	00000000	00000000
00386000	00000000	00000000
00387000	00000000	00000000
00388000	00000000	00000000
00389000	00000000	00000000
00390000	00000000	00000000
00391000	00000000	00000000
00392000	00000000	00000000
00393000	00000000	00000000
00394000	00000000	00000000
00395000	00000000	00000000
00396000	00000000	00000000
00397000	00000000	00000000
00398000	00000000	00000000
00399000	00000000	00000000


```

X2=X1
Y2=Y1
X1=DIFQU
Y1=TMAX
GO TO 133
134 X2=DIFQU
Y2=TMAX
133 TMAX=Y1-(Y2-Y1)/(X2-X1)*X1
GO TO 130
125 JST=2*KASB*ABARRA*(TPMAX-TST)/DXASP
JH20=QU-QAB-QST-QPA-JAR
FACTO1=1.0
X0=X
ITER4=0
ITER5=0
160 JH20=H+JH20*DELTAT/JH20
X=(JH20-HF)/(HG-HF)
IF(X.GE.1.0) GO TO 300
V=VF+(X+X0)/2*(VG-VF)
MU=MUF+(X+X0)/2*(MUG-MUF)
BETA=BETA+(X+X0)/2*(BETAG-BETA)
CPF=CPF+(X+X0)/2*(CPG-CPF)
GRL=G*BEIA*(L**3)*(TI-T1)/(V**2*MU**2)
GRL=ABS(GRL)
GRLE9=GRL/1E+9
PR=CP*MU/KR
HCNAT=KR/L*(0.1+0.04*ATAN/90)*((GRLE9*PR)**(1./3.))*1000.
IF(CTE.EQ.1.0) HCNAT=KR/L*0.14*((GRLE9*PR)**(1./3.))*1000.
UT=1./((RE/RI/HCNAT+RE*(ALOG(RI/RI)))/KR+RE*(ALOG(RE/RI)))/A
S+1./HCV))
QPA=UT*ARE*(TI-TINF)
T1PRI=TI-QPA/(HCNAT*ARI)
QPA1=(TI-T1)*HCNAT*ARI
DIFQPA=QPA1-QPA
ITER4=ITER4+1
IF(ABS(DIFQPA).LE.0.1) GO TO 165
IF(ITER4.GT.N) GO TO 165
IF(ITER4.GE.2.0) GO TO 161
X1=DIFQPA
Y1=TI
RECTA4=0.0
DT1=ABS(T1-T1PRI)
NDIFP=X1/ABS(X1)
161 NDIFP=DIFQPA/ABS(DIFQPA)
IF(NDIFP.EJ.NDIF) GO TO 159
IF(RECTA4.EQ.1.0) GO TO 159
FACTO1=FACTO1*3.
GO TO 162
159 IF((ITER4.GE.2.0).AND.(X2.GT.0.0).AND.(DIFQPA.GT.X2)
S.AND.(RECTA4.EQ.0.0))FACTO1=-FACTO1
IF((ITER4.GE.2.0).AND.(X2.LT.0.0).AND.(DIFQPA.LT.X2)
S.AND.(RECTA4.EQ.0.0))FACTO1=-FACTO1
X2=DIFQPA
Y2=TI
IF(DIFQPA.GI.0.0) T1=T1+DT1/FACTO1
IF(DIFQPA.LI.0.0) T1=T1-DT1/FACTO1
RECTA4=0.
GO TO 160
162 IF(ABS(DIFQPA).GE.ABS(X1)) GO TO 165
X2=X1
Y2=Y1

```

```

00461000
00462000
00463000
00464000
00465000
00466000
00467000
00468000
00469000
00470000
00471000
00472000
00473000
00474000
00475000
00476000
00477000
00478000
00479000
00480000
00481000
00482000
00483000
00484000
00485000
00486000
00487000
00488000
00489000
00490000
00491000
00492000
00493000
00494000
00495000
00496000
00497000
00498000
00499000
00500000
00501000
00502000
00503000
00504000
00505000
00506000
00507000
00508000
00509000
00510000
00511000
00512000
00513000
00514000
00515000
00516000
00517000
00518000
00519000
00520000
00521000

```



```

RECTA=1.0
GO TO 160
2600 WRITE(6,*/(15)) RELOJ,ITERS,ITER4,N,DIQH20,QH20
260 RQI=QJ+(QCF+QCR+QRF+QRB)
QPERD=QCF+QJL3+QRF+QRB+QST+QPA
RQK2=QST+QAK+QH20+QPA
W=W*180./PI
WRITE(8,1001)RELOJ,QI,ROI,QU,QUPRI
WRITE(9,1002)RELOJ,QCF,QCR,QRF,QRB
1009 WRITE(10,1009)RELOJ,TMAX,TPMAX,DIFWU
FORMAT(/," RELOJ=",F7.4,2X," TMAX=",E12.5,2X," TPMAX=",E12.5,
$2X," DIFWU=",E12.5)
1021 WRITE(11,1051)RELOJ,RQK,RQK2,DIQH20,QH20
FORMAT(/," RELOJ=",F7.4,2X," QK=",E12.5,2X," RQK2=",E12.5,2X,"
$ " DIQH20=",E12.5,2X," QH20=",E12.5)
WRITE(12,1005)RELOJ,QST,QAR,QPA,DIFQPA
WRITE(13,1006)RELOJ,HCONAT,GRL,PR,JAB
WRITE(14,1007)RELOJ,W,HI,HB,HBRB
WRITE(15,1008)RELOJ,TI,T1,T2,T3
1012 WRITE(17,1012)RELOJ,TETA,TETAN
FORMAT(/," RELOJ=",F7.4,2X," TETA=",E12.5,2X," TETAN=",E12.5)
ITER6=0
VX=VF+X*(VG-VF)
V=VOL/VX
IV=HH20-4
IF(MV.LE.0.0) MV=0.0
MVAP=MV/DELTA
IF(MVAP.GT.0.0) GO TO 186
RED=0.0
PR=0.0
HCT=0.0
UTUB=0.0
QPT=0.0
QAT=0.0
DELTA=0.0
QVAP=0.0
XV=0.0
XVAP=0.0
DIFQPT=0.0
QMAXV=0.0
QAP=0.0
GO TO 205
186 XV=X
180 ITER6=ITER6+1
CP=CP'+(X+XV)/2.*(CPG-CPF)
MU=MUP+(X+XV)/2.*(MUG-MUF)
V=VF+(X+XV)/2.*(VG-VF)
VEL=MVAP*V/(PI*RI1**2.)
RED=VEL*2*RI1/MU/V
PR=CP*W/KT
HCT=KT/RI1/RT*0.25*RED*0.8*PR*(1./S)
UTUB=1./(RET/RI1/HCT+RET*(ALOG(RI1/RI1))/KT+RET*(ALOG(RET/RI1)))/
$KAT+1./HCY)
QPT=UTUB*ATE*(TI-TINF)
IV=HH20-QPT/4VAP
XVPRI=(HV-HF)/(HG-HF)
DIFQPT=4VAP*(XVPRI-XV)*(HG-HF)
IF(ABS(DIFQPT).LE.0.1) GO TO 270
IF(ITER6.GT.N) GO TO 270
IF(ITER6.EQ.1.0) GO TO 181

```

```

00583000
00584000
00585000
00586000
00587000
00588000
00589000
00590000
00591000
00592000
00593000
00594000
00595000
00596000
00597000
00598000
00599000
00600000
00601000
00602000
00603000
00604000
00605000
00606000
00607000
00608000
00609000
00610000
00611000
00612000
00613000
00614000
00615000
00616000
00617000
00618000
00619000
00620000
00621000
00622000
00623000
00624000
00625000
00626000
00627000
00628000
00629000
00630000
00631000
00632000
00633000
00634000
00635000
00636000
00637000
00638000
00639000
00640000
00641000
00642000
00643000

```

```

181 GO TO 182
X1=DIFQPT
Y1=XV
XV=(XV+XVPR1)/2.
GO TO 182
182 IF (ABS(DIFQPT).GE.ABS(X1)) GO TO 183
X2=X1
Y2=Y1
X1=DIFQPT
Y1=XV
GO TO 184
183 X2=DIFQPT
Y2=XV
184 XV=Y1-(Y2-Y1)/(X2-X1)*X1
GO TO 182
270 T1T=T1T-QPT/(HCT*ATI)
T2T=T1T-QPT*(KIT-KIT)/KT/AT1
T3T=T2T-QPT*(RET-RIT)/KAT/ATE
QAT=MT*CPAT/DELTA*(T1T+T2T)/2.-T12T)
S+MAT*CPAT/DELTA*(T2T+T3T)/2.-T23T)
HVAP=HH2O-(QPT+QAT)/MVAP
XVAP=(HVAP-HF)/(HG-HF)
IF (XVAP.GT.U.U) GO TO 271
T1TPRI=(MVAP*XV*(HG-HF)+MVAP*T1T*CPF+(MT*CPAT+MAT*CPAT)/DELTA*
S(T12T)/((MT*CPAT+MAT*CPAT)/DELTA+MVAP*CPF)
DIV=T1TPRI/T1T
T1T=T1TPRI
T2T=T2T*DIV
T3T=T3T*DIV
QPT=UTUB*ATE*(T1T-TINF)
QAT=MT*CPAT*((T1T+T2T)/2.-T12T)/DELTA
S+MAT*CPAT/DELTA*(T2T+T3T)/2.-T23T)
271 SVAP=SF +XVAP*(SG-SF)
X3VAP=(SVAP-SFB)/(SGB-SFB)
X2VAP=HF3+X3VAP*(HG3-HFB)
VXM=VF+(X+XVAP)/2.*(VG-VF)
VELT=MVAP*VXM/PI/RIT**2
HJ=HUF+(X+XVAP)/2.*(MUG-MUF)
RED=VELT**2*KIT/VXM**4
IF (XVAP.GT.U.U) GO TO 170
IF (XV.LE.0.U) XV=U.
XVAP=0.
DELTA=0.0
QVAP=0.0
GO TO 205
170 IF (RED.GT.2100) GO TO 190
F=64/RED
GO TO 200
190 IF (RED.GT.10000) GO TO 210
F=0.134*RED**(-0.7)
GO TO 200
210 F=0.184*RED**(-0.2)
200 DELTAP=F*LTU3/4./KIT*VELT**2/VX**4/100000.
NDP=MVAP*VXM*DELTA*100000.
QVAP=MVAP*(MVAP-HBVAP)-NDP
HX=HF+X*(HG-HF)
JAXV=MVAP*(HX-HBVAP)
205 EE=QVAP*EMV*EGE
IF (X.GE.1.0) X=1.0
N3YTE(19,10,4)RELOJ,J,PT,QIFQPT,QAT
1014 FORMAT(/," RELOJ=" ,F7.4," X," ,PT=" ,E12.5," DIFQPT=" ,E12.5,

```

```

006440000
006450000
006460000
006470000
006480000
006490000
006500000
006510000
006520000
006530000
006540000
006550000
006560000
006570000
006580000
006590000
006600000
006610000
006620000
006630000
006640000
006650000
006660000
006670000
006680000
006690000
006700000
006710000
006720000
006730000
006740000
006750000
006760000
006770000
006780000
006790000
006800000
006810000
006820000
006830000
006840000
006850000
006860000
006870000
006880000
006890000
006900000
006910000
006920000
006930000
006940000
006950000
006960000
006970000
006980000
006990000
007000000
007010000
007020000
007030000
007040000

```


FORMAT SEGMENT IS 005E LONG
START OF SEGMENT 00F
SEGMENT 00F IS 0033 LONG

NO ERRORS DETECTED. NUMBER OF CARDS = 743.
COMPILATION TIME = 33 SECONDS ELAPSED, 3.36 SECONDS PROCESSING (13268 CPM)
D2 STACK SIZE = 27 WORDS. FILE SIZE = 1544 WORDS. ESTIMATED CORE STORAGE REQUIREMENT = 4431 WORDS.
TOTAL PROGRAM CODE = 2539 WORDS. ARRAY STORAGE = 0 WORDS.
NUMBER OF PROGRAM SEGMENTS = 17. NUMBER OF DISK SEGMENTS = 239.
PROGRAM CODE FILE = (IIF)OBJECT/ENERGIA UN CSC2.

CONDICIONES INICIALES DEL SISTEMA

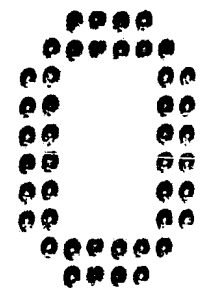
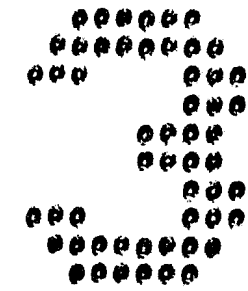
RELOJ=12.0			
HBMAX=600.0	CTE=0.0	EXPON=1.5	
ND=280	TD=11.6917	DELTA=-6.5714	FI=19.3
W=0.0	S=0.	GAMMA=0.	
A=5.0	ROD=0.8	GAMA=1.0	C=5000.
MB=10.282795	DXB=0.0095	CPB=0.026	KB=46.71
AB=.1368852	AF=0.001	VOL=0.01	ABASE=.1378
MR=16.8288708	DXR=0.0095	CPR=0.026	KR=46.71
RI=0.2	R1=0.2095	RE=0.3095	Z=0.0795
ARI=.2256	AR1=.2551	ARE=.8316	AREAT=0.8577
MA=2.5514	DXA=0.1	CPA=816.27	KA=0.07439
DXASB=0.03	KASB=0.2076	ABARRA=0.00456	
ALFA=0.9	SIGMA=5.67E-8	EMIT2=0.95	EMIT1=0.5
MT=3.3822	DXTUB=0.0015	CPT=50.64	KT=367.
RIT=0.00635	R1T=0.0079	RET=0.0579	LTUB=6.
MAT=1.4961	DXATUB=0.05	CPAT=837.2	KAT=0.07439
ATI=.2393	AT1=.2992	ATE=2.1841	
TINF=20.0	TB=20.	TST=20.	
T=20.	T1=20.	T2=20.	T3=20.
T1T=20.	T2T=20.	T3T=20.	
VV=15.	HCV=62.7	UTPRI=.6099	QPAQI=.0375
T0=20.	TEB=180.	PA=10.	PB=0.78
HF=7.63E+5	HG=2.778E+6	HFB=3.92E+5	HGB=2.665E+6
V0=.001	VF=0.001128	VG=0.194	
MU0=9.74E-4	MUF=1.49E-4	MUG=1.5E-5	
BETA0=2.16E-4	BETAF=0.00124	BETAG=0.00223	
CP0=4186.	CPF=4420.	CPG=2620.	
SF=2139.	SG=6586.	SFB=1250.	SGB=7416.
MH20=8.9	EMV=1.0	EGE=1.0	

***Nota: copia de un listado de datos.



00
00

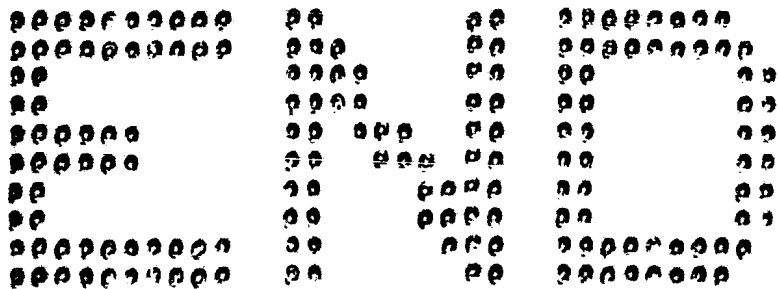
00
00



RELOJ=12.0500	QPERD=.2725E+3	TI=.3636E+2	QI=.2400E+4	QH2O=.2060E+4
12.2500	.8332E+3	.9056E+2	.2392E+4	.1510E+4
12.4500	.1258E+4	.1297E+3	.2375E+4	.1081E+4
13.0500	.1570E+4	.1573E+3	.2348E+4	.7532E+3
13.2957	.1836E+4	.1800E+3	.2299E+4	.4482E+3

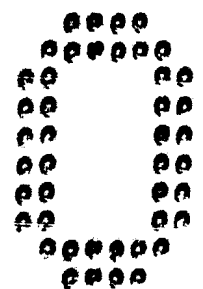
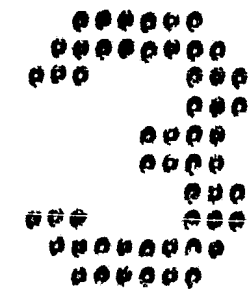
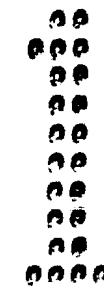
RELOJ=13.3007	M=.8487E+1	MVAP=.4122E-1	QMAXV=0.	QPT=.1245E+3	QVAP=0.	XVAP=0.
13.3127	.5984E+1	.2671E-1	0.	.2220E+3	0.	0.
13.3247	.4219E+1	.1885E-1	.1048E+4	.2234E+3	.8137E+3	.3900E-3
13.3407	.2973E+1	.1331E-1	.8159E+3	.2234E+3	.5925E+3	.3262E-2
13.3527	.2092E+1	.9822E-2	.6556E+3	.2234E+3	.4322E+3	.7137E-2
13.3557	.1834E+1	.8256E-2	.6086E+3	.2234E+3	.3852E+3	.8993E-2

*** Nota: Copia parcial de un listado de resultados. En la parte superior se tabula la zona líquida y en la inferior corresponde al análisis del vapor.



00
00

00
00



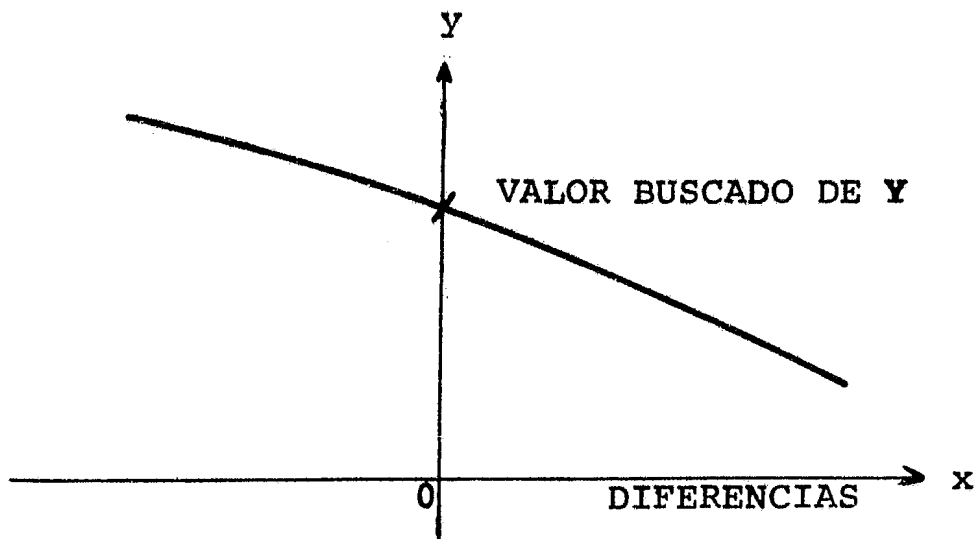


FIG 4.2.2.1 GRAFICA DE LA CURVA DE CONVERGENCIA

FIG 4.2.2.2 GENERACION DEL NUEVO VALOR POR INTERPOLACION LINEAL

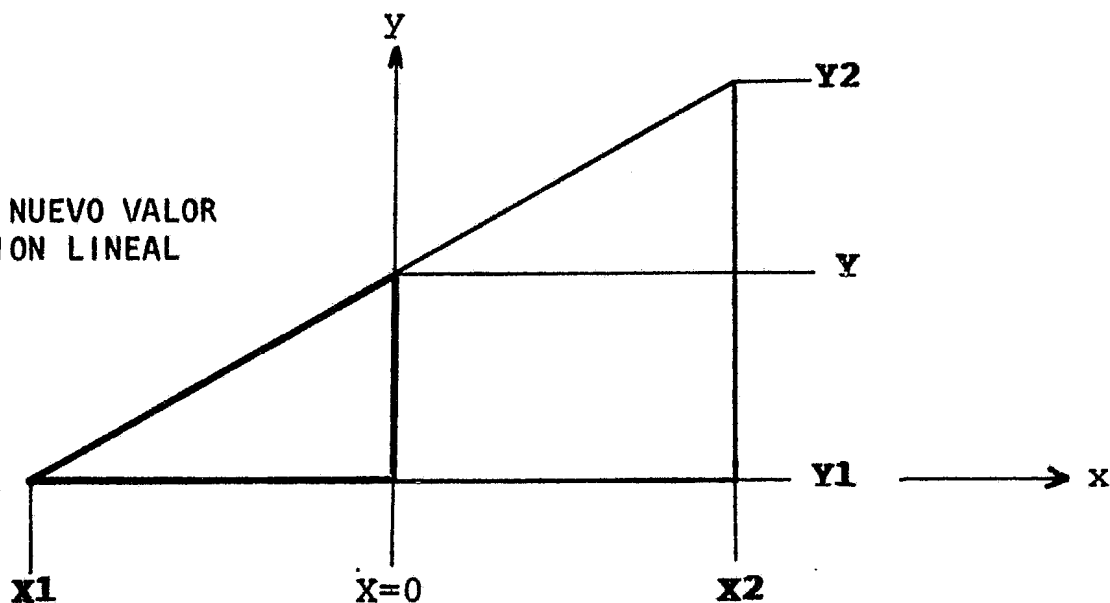


DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UN PROCESO

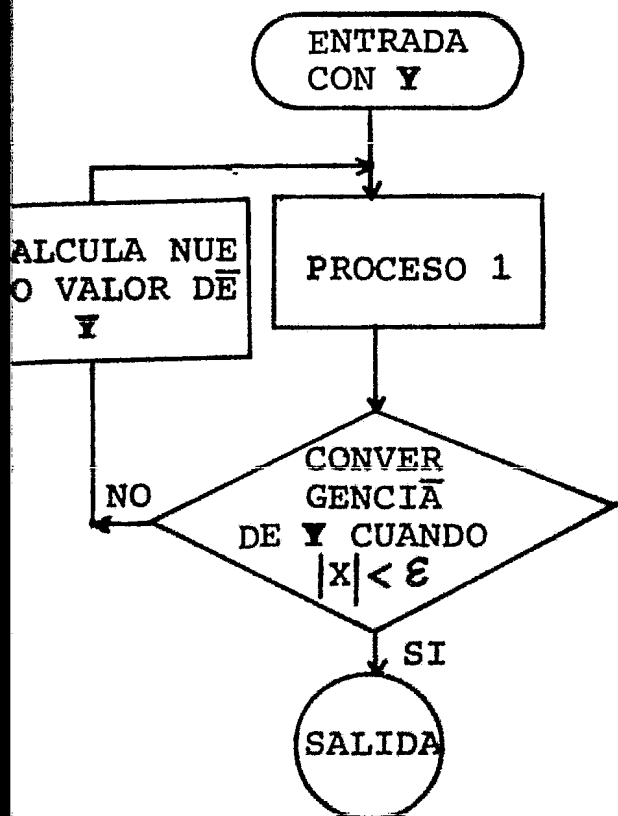


DIAGRAMA DE BLOQUES PARA DOS PROCESOS EN SERIE

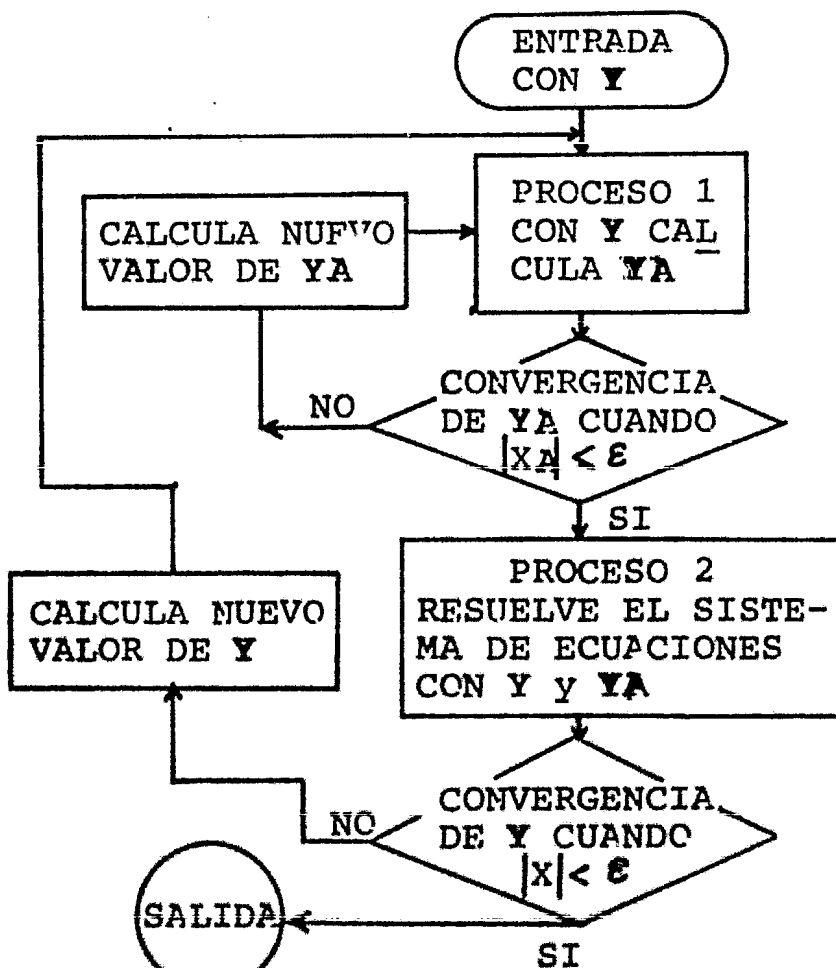


FIG 4.2.2.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS PROCESOS DE CONVERGENCIA

(continuación pág 124)

respectivamente. Primero se genera un valor de "Y" y se encuentra el valor "Ya" y su aproximación "Xa", si es mayor que " ϵ ", genera un segundo valor de "Ya" y se resuelve el primer proceso iterativo hasta que su aproximación "Xa" sea menor que " ϵ ".

Estos valores de "Y" y "Ya" se sustituyen en la siguiente parte del proceso que contempla todo el desarrollo de las ecuaciones y se encuentra la aproximación "X"; si esta es menor que " ϵ " es que se satisfacen las ecuaciones y los valores obtenidos "Y" y "Ya" son los buscados y se da la salida del proceso. En caso de no cumplir la aproximación "X" se genera otro valor de "Y" y se comienza desde el principio del proceso como se describe en los párrafos anteriores hasta que las aproximaciones "X" y "Xa" sean menores que " ϵ ".

4.3 Interpretación de Resultados

En el punto anterior se analizó el comportamiento del sistema térmico, haciendo la simulación de éste en la computadora. Para poder determinar teóricamente el comportamiento del sistema se varían ciertos parámetros, los cuales son representativos, y con esto se consiguen diferentes respuestas que se evalúan. De esta forma se puede determinar cuáles son los parámetros de entrada más importantes durante el proceso.

Los parámetros más importantes son los siguientes:

- HI Energía directa radiada por el Sol
- A Superficie del espejo parabólico

DXA	Espesor del aislante del generador
VV	Velocidad del viento
RI	Radio interno del generador
TEB	Temperatura de ebullición del agua
VOL	Volumen del generador

Las variables anteriores sirven para determinar las características del sistema en el estado transitorio, es decir en zona líquida. Se escogieron estos parámetros porque se pueden medir y modificar físicamente.

El análisis que se realizó para conocer las características del sistema se describirá en tres partes:

La primera parte consiste en determinar la energía que incide en el generador. Esta es resultado de la energía que proviene del Sol y de las características del espejo (como son el tamaño, la calidad de la superficie reflejante y el factor de intersección en el seguimiento).

En la segunda parte se describe el comportamiento de los flujos de calor en el generador durante el estado transitorio, y en la tercera parte se describe la producción de vapor. En esta última parte se consideraron los siguientes parámetros:

RIT	Radio interno de la tubería
LTUB	Longitud de la tubería
DXATUB	Espesor del aislante de la tubería

Una vez conocidos los elementos que constituyen la primera parte, se determina la energía incidida sobre la base del generador.

Dadas las condiciones anteriores se procede al estudio de los flujos de calor, los cuales se dividieron en dos partes: el primero corresponde al estudio de los flujos de calor en la base del generador y el segundo corresponde a los flujos de calor del recipiente del generador.

Esta división se hizo sobre la base de que el calor que llega al recipiente del generador es mayor por la convección del agua que por la conducción del mismo metal.

En la base del generador se analizan las pérdidas de calor por convección y radiación. En el recipiente sólo se consideran las pérdidas de calor por convección por tener aislante.

Las pérdidas de calor en la base las llamamos QPB y en el recipiente QPR.

En seguida se calcula la fracción de energía útil del agua QH_{20} que depende de la temperatura de ésta, considerando todas las pérdidas de calor hasta que llega a la temperatura de ebullición.

Lo anterior es analizado para diferentes flujos de calor incidido QI , variando además otros parámetros que se muestran en la tabla 4.3.1.

TABLA 4.3.1 RESUMEN DE VALORES OBTENIDOS POR EL PROGRAMA

(WATT) QI	(m ³) VOL	(m) RI	(m) DXA	(m/s) VV	(°C) TEB	(H.MS) LIQUIDO t*programa	(WATT) QPB	(WATT) QPR	(WATT) QH2O	(m) DXATUB	(H.MS) t*VAPOR
1094.4	0.01	0.0762	0.1	20	180	2.1321	411.55	72.2	601.0	0.05	0.1430
"	"	"	0.03	"	"	2.1855	411.1	156.6	516.5	"	0.1710
"	"	"	0.01	"	"	2.5702	411.15	383.1	290.0	"	----
"	"	"	0.1	15	"	2.0526	334.7	72.1	677.9	"	0.1300
"	"	"	0.03	"	"	2.0930	334.2	115.4	594.4	"	0.1500
"	"	"	0.01	"	"	2.3811	334.3	374.1	375.8	"	----
"	"	"	0.1	10	"	1.5815	257.1	71.8	755.6	"	0.1140
"	"	"	0.03	"	"	2.0113	257.1	153.4	674.0	"	0.1320
"	"	"	0.01	"	"	2.2251	256.8	358.5	466.5	"	0.1900
820.8	"	"	0.03	20	"	3.3659	390.1	156.6	264.0	"	----
"	"	"	"	15	"	3.1342	315.2	155.35	340.1	"	----
"	"	"	"	10	"	2.5546	239.7	153.2	417.6	"	0.2050
"	"	"	0.1	15	"	3.0056	315.3	72.0	423.5	"	0.2000
"	"	"	"	20	"	3.1832	390.1	72.1	348.5	"	----
"	"	"	0.01	10	"	3.5312	359.8	358.4	212.4	"	----
"	"	"	0.1	"	"	2.4643	239.9	71.8	499.1	"	0.1710
1440.0	"	"	0.01	"	"	1.3444	262.0	358.3	809.1	"	0.0115
"	"	"	"	15	"	1.4059	344.0	374.0	711.4	"	0.1250
"	"	"	"	20	"	1.4749	425.4	383.0	621.2	"	0.1430
"	"	"	0.03	10	"	1.2537	262.0	153.2	1014.3	"	0.0900
"	"	"	"	15	"	1.2932	343.9	155.5	930.1	"	0.0950
"	"	"	"	20	"	1.3410	425.2	156.6	847.6	"	0.1040
"	"	"	0.1	10	"	1.2446	262.8	71.9	1095.9	"	0.0820
"	"	"	"	15	"	1.2839	344.6	72.0	1013.7	"	0.0850
"	"	"	"	20	"	1.3244	426.0	72.2	932.2	"	0.0940
2160.0	"	"	0.01	10	"	0.5731	297.0	358.5	1493.8	"	0.0620
"	"	"	"	15	"	0.5952	384.1	374.0	1390.8	"	0.0640
"	"	"	"	20	"	1.0214	471.2	383.2	1295.2	"	0.0710
"	"	"	0.03	10	"	0.5417	296.8	153.2	1699.0	"	0.0530
"	"	"	"	15	"	0.5602	384.2	155.4	1609.5	"	0.0550
"	"	"	"	20	"	0.5753	471.1	156.6	1521.7	"	0.0610
"	"	"	0.1	10	"	0.5434	297.5	71.9	1780.8	"	0.0520
"	"	"	"	15	"	0.5613	385.2	72.1	1693.2	"	0.0530
"	"	"	"	20	"	0.5800	472.0	72.3	1606.4	"	0.0550
2880.0	"	"	0.01	10	"	0.4135	344.4	358.6	2166.2	"	0.0430
"	"	"	"	15	"	0.4252	437.2	374.0	2057.9	"	0.0440
"	"	"	"	20	"	0.4410	529.0	383.2	1948.5	"	0.0450
"	"	"	0.03	10	"	0.3957	344.0	153.2	2342.1	"	0.0410
"	"	"	"	15	"	0.4058	437.1	155.5	2276.6	"	0.0410
"	"	"	"	20	"	0.4202	529.2	156.7	2183.6	"	0.0420
"	"	"	0.1	10	"	0.4011	346.9	72.2	2453.2	"	0.0400

CONTINUACION TABLA 4.3.1

QI	VOL	RI	VV	DXA	TEB	t*LIQUIDO	QPB	QPR	QH2O	DXATUB	t*VAPOR
2880.0	0.01	0.0762	0.1	15	180	0.4121	438.1	72.2	2360.3	0.05	0.0400
"	"	"	"	20	"	0.4232	528.9	72.1	2268.2	"	0.0410
"	"	"	"	10	"	0.3940	323.6	72.2	2475.8	"	0.0350
"	"	"	"	15	"	0.4049	419.0	72.2	2284.2	"	0.0400
"	"	"	"	20	"	0.4140	515.9	72.6	2284.0	"	0.0410
"	"	"	0.03	10	"	0.3922	321.4	153.2	2394.0	"	0.0400
"	"	"	"	15	"	0.4022	416.9	155.4	2295.8	"	0.0410
"	"	"	"	20	"	0.4116	514.5	157.1	2199.2	"	0.0420
"	"	"	0.01	10	"	0.4052	321.6	358.5	2188.8	"	0.0420
"	"	"	"	15	"	0.4206	417.7	374.1	2077.0	"	0.0440
"	"	"	"	20	"	0.4321	513.0	383.1	1972.7	"	0.0450
4320.0	"	"	"	10	"	0.2617	396.3	358.5	3553.5	"	0.0250
"	"	"	"	15	"	0.2652	503.5	374.2	3430.9	"	0.0300
"	"	"	"	20	"	0.2726	609.6	383.2	3315.7	"	0.0300
"	"	"	0.03	10	"	0.2543	396.3	153.2	3758.8	"	0.0240
"	"	"	"	15	"	0.2613	503.2	155.4	3649.6	"	0.0250
"	"	"	"	20	"	0.2644	609.7	156.6	3542.3	"	0.0250
"	"	"	0.1	10	"	0.2557	399.8	72.5	3840.8	"	0.0240
"	"	"	"	15	"	0.2627	507.7	72.8	3733.5	"	0.0240
"	"	"	"	20	"	0.2717	609.7	72.1	3627.3	"	0.0250
5760.0	"	"	0.01	10	"	0.1928	499.1	358.6	4890.3	"	0.0210
"	"	"	"	15	"	0.1949	616.8	378.3	4756.9	"	0.0210
"	"	"	"	20	"	0.2011	733.7	383.3	4631.3	"	0.0220
"	"	"	0.03	10	"	0.1902	501.5	154.4	5095.6	"	0.0200
"	"	"	"	15	"	0.1930	616.7	155.5	4975.7	"	0.0210
"	"	"	"	20	"	0.1950	733.3	156.5	4860.4	"	0.0210
"	"	"	0.1	10	"	0.1930	501.4	72.2	5177.7	"	0.0200
"	"	"	"	15	"	0.1949	616.5	72.5	5059.9	"	0.0200
"	"	"	"	20	"	0.1959	740.9	73.2	4942.9	"	0.0210
1094.4	"	0.15	0.03	10	"	3.2229	764.4	125.0	1953.2	"	----
2160.0	"	"	"	20	"	1.2137	1312.5	128.1	711.5	"	0.1240
"	"	"	0.1	"	"	1.2027	1313.9	70.5	769.2	"	0.1130
"	"	"	0.01	"	"	1.3004	1312.9	288.4	551.5	"	0.1620
4320.0	"	"	"	"	"	0.3048	1444.7	289.2	2583.1	"	0.0350
"	"	"	0.03	"	"	0.2954	1450.8	129.0	2743.2	"	0.0330
"	"	0.20	0.1	"	"	0.3605	2310.0	81.8	1933.3	"	0.0450
"	"	"	0.01	"	"	0.3723	2302.2	322.1	1693.1	"	0.0540
"	"	"	0.03	"	"	0.3549	2309.6	145.8	1837.5	"	0.0510
"	0.02	"	0.1	15	"	1.0450	1857.1	96.4	2360.4	"	0.0750
"	0.01	"	"	20	250.3	1.1328	3350.5	117.2	841.3	"	0.2520
"	0.02	0.15	"	15	180	0.5735	1169.1	91.7	3051.8	"	0.0610
"	"	0.0762	"	"	"	0.5338	504.3	131.9	3673.9	"	0.0510
"	0.01	0.15	"	20	250.3	0.5018	2076.7	101.7	2137.5	"	0.1020
"	"	0.0762	"	"	"	0.4130	826.2	114.3	3366.4	"	0.0640

Después el vapor es conducido por la tubería hasta el regulador de presión. En esta parte se calculan las pérdidas de calor en la tubería QPT.

La parte final del estudio consiste en expandir el vapor a la salida del regulador de presión, de la presión de trabajo (alta) a la presión atmosférica, suponiendo que el proceso de expansión del vapor es isentrópico. Así se obtiene la energía final del vapor QVAP que resulta de la energía de presión del vapor y puede ser transformada a energía mecánica mediante el uso de un dispositivo mecánico.

Con este análisis del proceso se obtuvo la simulación del sistema y por medio del uso de la computadora se corrió el programa, con diferente información de entrada, que se muestra en la tabla 4.3.1 para analizar el comportamiento del proceso.

Con los resultados obtenidos por la computadora se realizó una síntesis de éstos representándolos en seis gráficas con las cuales es posible determinar cuantitativamente la importancia de cada variable.

A continuación se describen las gráficas:

Primera gráfica

En ésta gráfica observamos el comportamiento de las pérdidas de calor en la base del generador QPB que dependen directamente del calor incidido en la base del generador QI, tomando en cuenta las pérdidas de calor por radiación y convección las cuales son proporcionales a la temperatura de

la base TB, el radio de la base RI y la velocidad del viento VV. Las pérdidas de calor QPB se representan solo para una temperatura de ebullición TEB de 180°C.

La utilidad de esta gráfica radica en que se pueden determinar las pérdidas de calor en la base QPB partiendo de la energía incidida QI para diferentes dimensiones de la base del generador RI involucrando también la velocidad del viento VV.

Segunda gráfica

Esta gráfica se hizo para encontrar las pérdidas de calor del recipiente del generador QPR conociendo las dimensiones del generador, RI radio del generador, el espesor del aislante DXA y la conductividad térmica del aislante KÁ y la velocidad del viento VV. Con los datos anteriores se determinó el coeficiente global de transmisión de calor UT con el cual es posible calcular las pérdidas de calor del recipiente QPR que dependen del área del recipiente en contacto con el ambiente ARE y la diferencia de temperaturas entre el agua TEB y la temperatura ambiente TINF.

Con estas dos gráficas se determinaron las pérdidas de calor del generador de vapor, y conociendo la energía incidida QI se calculó el almacenamiento de calor del agua en el generador QH20 que es mostrado en la siguiente gráfica.

Tercera gráfica

En esta gráfica se representa la energía aprovechada por el agua QH_{20} durante su calentamiento. También es posible conocer el tiempo que tarda el agua en llegar a la temperatura de ebullición TEB , el cual depende de las dimensiones del generador, de las características del aislamiento, de la velocidad del viento y de la energía que entra al sistema QI .

Obsérvese que, a medida que aumenta la temperatura T^* el porcentaje de energía aprovechada por el agua QH_{20}^* disminuye dado que las pérdidas de calor QPB y QPR se incrementan manteniendo la energía incidida QI constante.

En la parte central se tienen 9 curvas donde aparecen 3 espesores de aislante DXA con 3 velocidades de viento VV que relacionan directamente el porcentaje de calor QH_{20}^* en el eje vertical con el porcentaje de la temperatura T^* sobre el eje horizontal. El eje vertical corresponde también a un radio del generador RI y en el eje horizontal se tiene una sola energía incidida QI . Si se requiere cambiar el tamaño del recipiente RI se utiliza su curva RI y se obtiene la lectura en el eje vertical, haciendo uso de las rayas paralelas. Cuando la energía incidida QI cambia se toma como base su curva QI y por medio de las líneas paralelas se toma la lectura de la temperatura T^* en el eje horizontal. Al cambiar la energía incidida QI se generan otras familias de curvas las cuales se representan para diferentes espesores de aislante y velocidades de viento, como se observa en la parte inferior de la gráfica.

Existen otras dos curvas donde se relaciona el doble del volumen VOL para dos radios del generador RI con sus restricciones correspondientes.

En las curvas centrales de la gráfica se encuentran marcados los intervalos de tiempo constantes. Para utilizarlos se determina el tiempo que dura el calentamiento del agua, ya sea con la tabla 4.3.1 o con la fórmula indicada en la gráfica, y empleando la curva de velocidad VV y espesor DXA, se observa el número de intervalos de tiempo que tiene y se hace la división del tiempo total entre el número de intervalos, obteniéndose así el valor de cada intervalo de tiempo.

Para conocer el proceso a temperaturas mayores de 180°C hasta 250°C, las curvas de calor incidido se pueden continuar, con lo cual se obtiene una idea del comportamiento. Si se desea obtener información adicional es necesario resolver el programa con los datos que se requieran.

Cuarta gráfica

Se calcularon las pérdidas de calor en la tubería QPT debidas a la circulación del vapor. Estas se determinan conociendo las dimensiones de la tubería, radio RIT, espesor del aislante DXATUB, la conductividad térmica del aislante KAT y la velocidad del viento VV. Con ello es posible encontrar el coeficiente global de transmisión de calor UTUB con el cual se pueden calcular las pérdidas de calor de la tubería QPT que dependen del área expuesta del aislante ATE con el ambiente, así como

la diferencia de temperaturas entre la del vapor T_{EB} y la temperatura ambiente T_{INF} .

Quinta gráfica

El objetivo de esta gráfica es conocer el comportamiento del flujo del vapor determinándose el porcentaje del volumen del agua que sale del generador en forma de vapor, que depende directamente de la calidad del vapor. Se tienen dos curvas que corresponden a dos temperaturas de trabajo, las cuales tienen marcados sus intervalos de tiempo constantes. Para determinar el tiempo total del proceso se utiliza la fórmula que relaciona las características del vapor y la energía que se le suministra Q_{H20} , o también se puede utilizar la pequeña gráfica en la que se determina directamente el tiempo de producción de vapor así como el tiempo de cada intervalo que se encuentra en función del tiempo total t^* y el número de intervalos que tiene cada curva. Ver tabla 4.3.1.

Sexta gráfica

Se determina la energía de presión a la salida del generador que proporciona el vapor al suponer un proceso de expansión isentrópico de la presión alta del generador hasta la presión atmosférica obteniéndose la energía que es producida Q_{MAXV} . Después se le restan las pérdidas de calor en la tubería Q_{PT} y se determina finalmente la energía que se puede disponer del vapor Q_{VAP} .

En la gráfica se observa que la energía que tiene el vapor a la salida del generador QMAXV es proporcional al flujo de calor del agua QH20, siendo Q^* la constante que relaciona estos flujos de calor y a su vez se encuentran en función de la calidad del vapor X.

Se observa que el trabajo proporcionado por la expansión del vapor es variable y disminuye conforme aumenta la calidad del vapor; es así como el tiempo del proceso t^* queda determinado desde la quinta gráfica.

Mediante el uso de las seis gráficas anteriores, se simula el comportamiento del sistema sin la necesidad de resolverlo por medio del programa de computadora. Si se requiere información más específica, se recomienda correr el programa con los datos deseados.

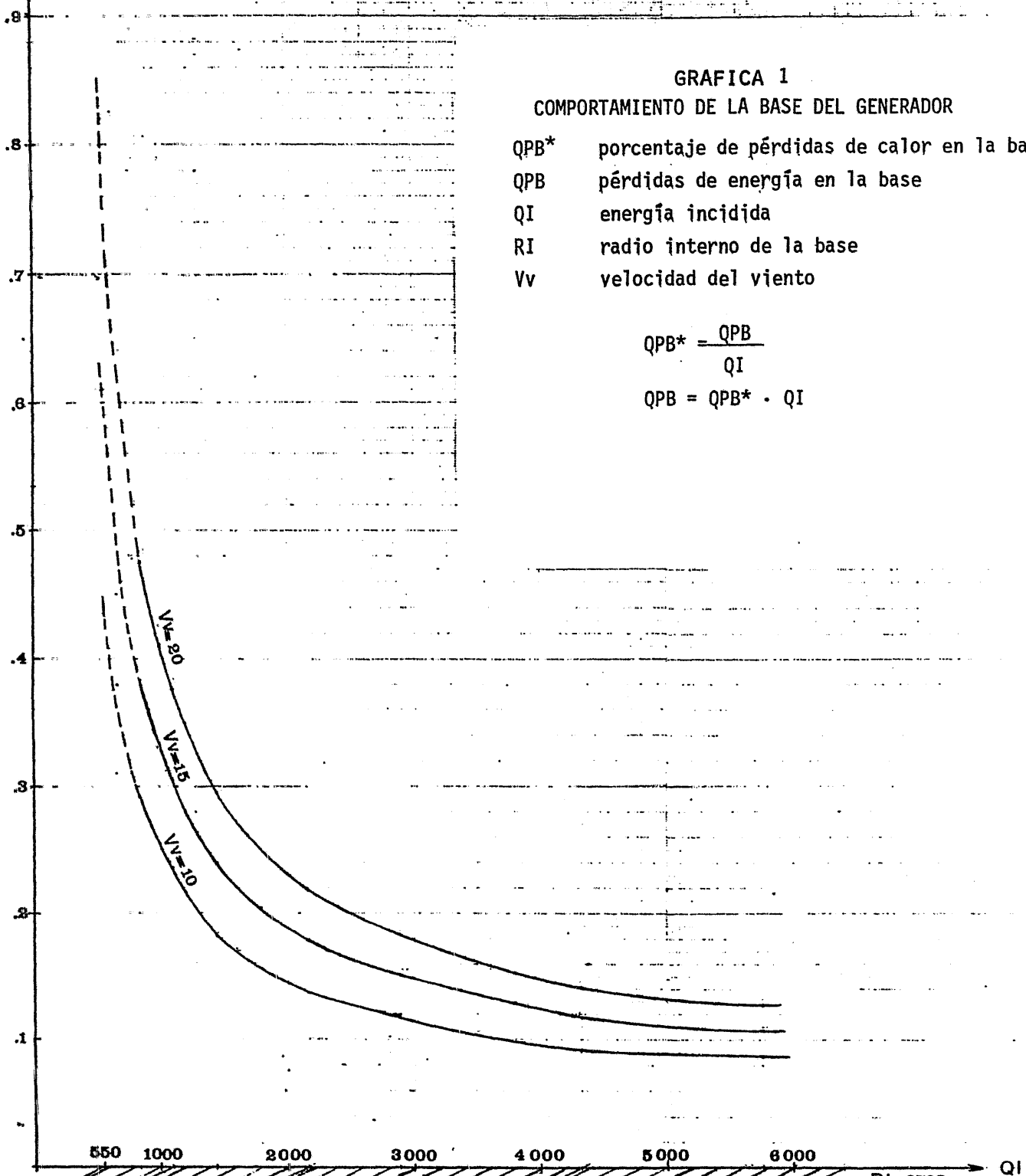
QPB*
FEB-1980
VOL-01

GRAFICA 1
COMPORTAMIENTO DE LA BASE DEL GENERADOR

- QPB* porcentaje de pérdidas de calor en la base %
- QPB pérdidas de energía en la base Watt
- QI energía incidida Watt
- RI radio interno de la base m
- Vv velocidad del viento m/s

$$QPB^* = \frac{QPB}{QI}$$

$$QPB = QPB^* \cdot QI$$



550 1000 2000 3000 4000 5000 6000

RI=0.0762

QI

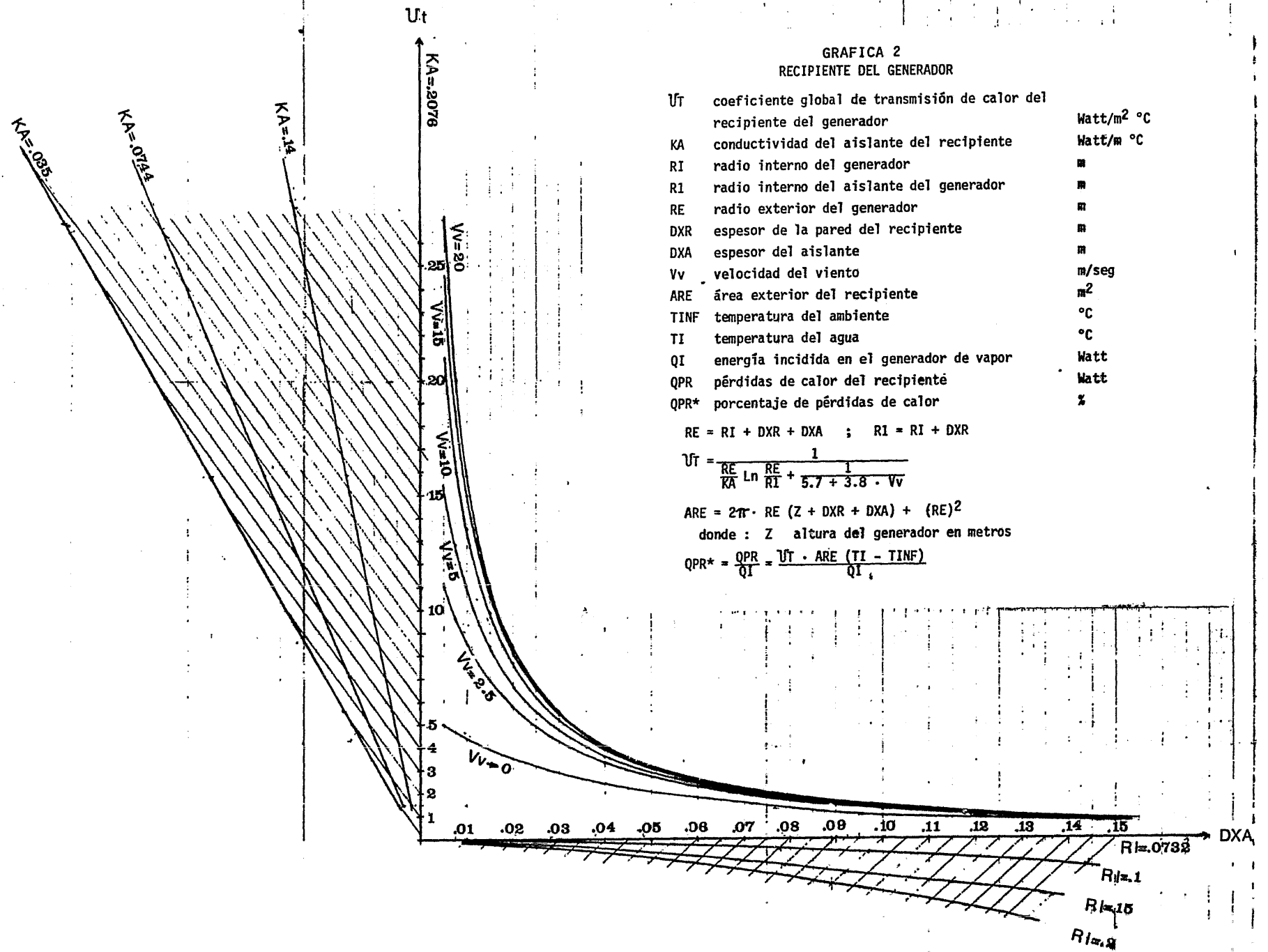
RI=2

RI=15

Vv=20

Vv=15

Vv=10



GRAFICA 2
RECIPIENTE DEL GENERADOR

- Ut coeficiente global de transmisión de calor del recipiente del generador Watt/m² °C
- KA conductividad del aislante del recipiente Watt/m °C
- RI radio interno del generador m
- RI radio interno del aislante del generador m
- RE radio exterior del generador m
- DXR espesor de la pared del recipiente m
- DXA espesor del aislante m
- Vv velocidad del viento m/seg
- ARE área exterior del recipiente m²
- TINF temperatura del ambiente °C
- TI temperatura del agua °C
- QI energía incidida en el generador de vapor Watt
- QPR pérdidas de calor del recipiente Watt
- QPR* porcentaje de pérdidas de calor %

$$RE = RI + DXR + DXA \quad ; \quad RI = RI + DXR$$

$$Ut = \frac{1}{\frac{RE}{KA} \ln \frac{RE}{RI} + \frac{1}{5.7 + 3.8 \cdot Vv}}$$

$$ARE = 2\pi \cdot RE (Z + DXR + DXA) + (RE)^2$$

donde : Z altura del generador en metros

$$QPR* = \frac{QPR}{QI} = \frac{Ut \cdot ARE (TI - TINF)}{QI}$$

GRAFICA 4
ANALISIS DE LA TUBERIA

- U_{TUB} coeficiente global de transmisión de calor en la tubería Watt/m² °C
- RIT radio interno de la tubería m
- RIT radio interno del aislante m
- RET radio exterior de la tubería m
- KAT conductividad del aislante de la tubería Watt/m °C
- DXTUB espesor de la tubería m
- DXATUB espesor del aislante m
- ATE área exterior de la tubería m²
- LTUB longitud de la tubería m
- V_v velocidad del viento m/seg
- TEB temperatura de ebullición °C
- TINF temperatura ambiente °C
- QPT pérdidas de calor en la tubería Watt

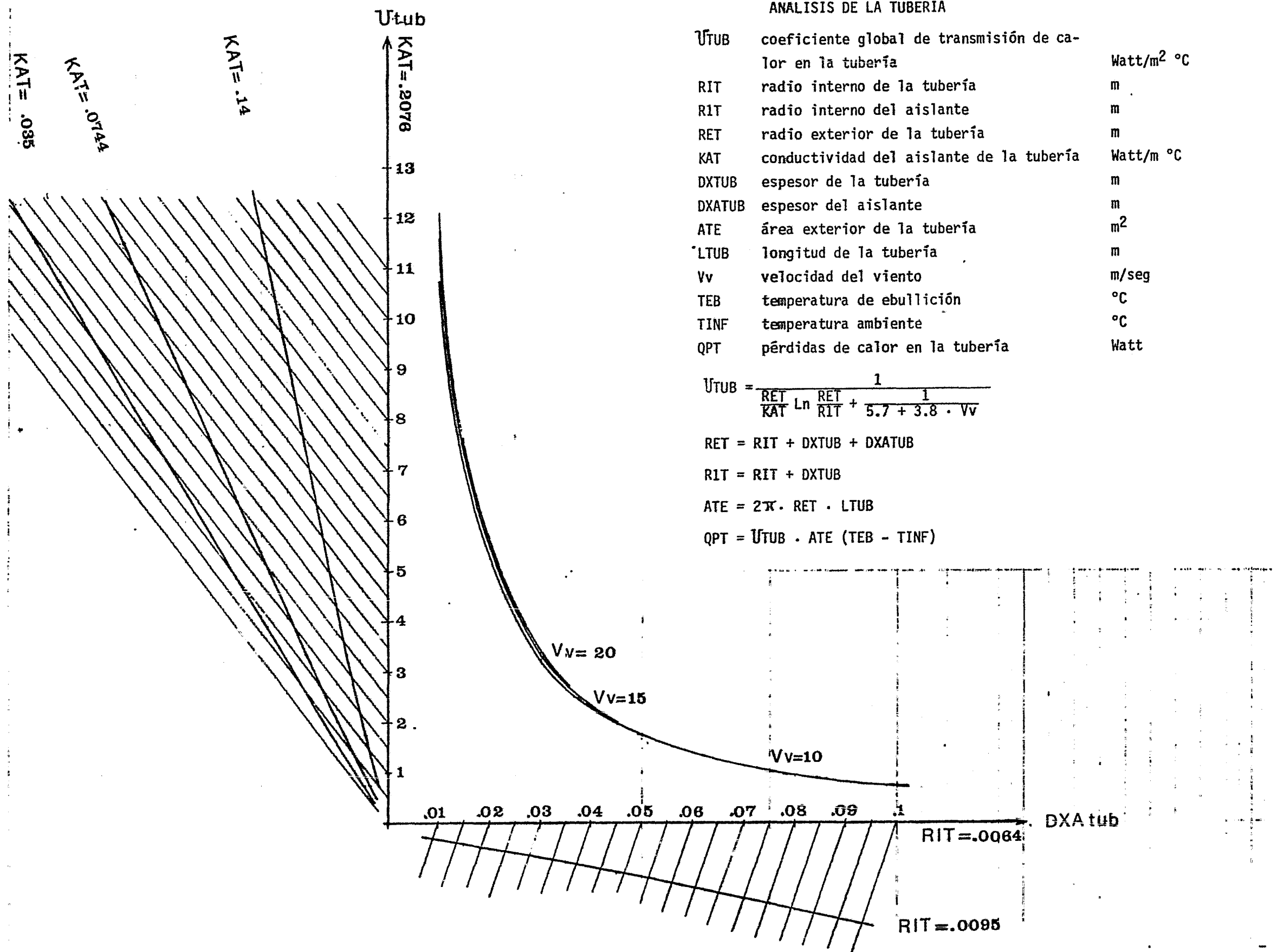
$$U_{TUB} = \frac{1}{\frac{RET}{KAT} \ln \frac{RET}{RIT} + \frac{1}{5.7 + 3.8 \cdot V_v}}$$

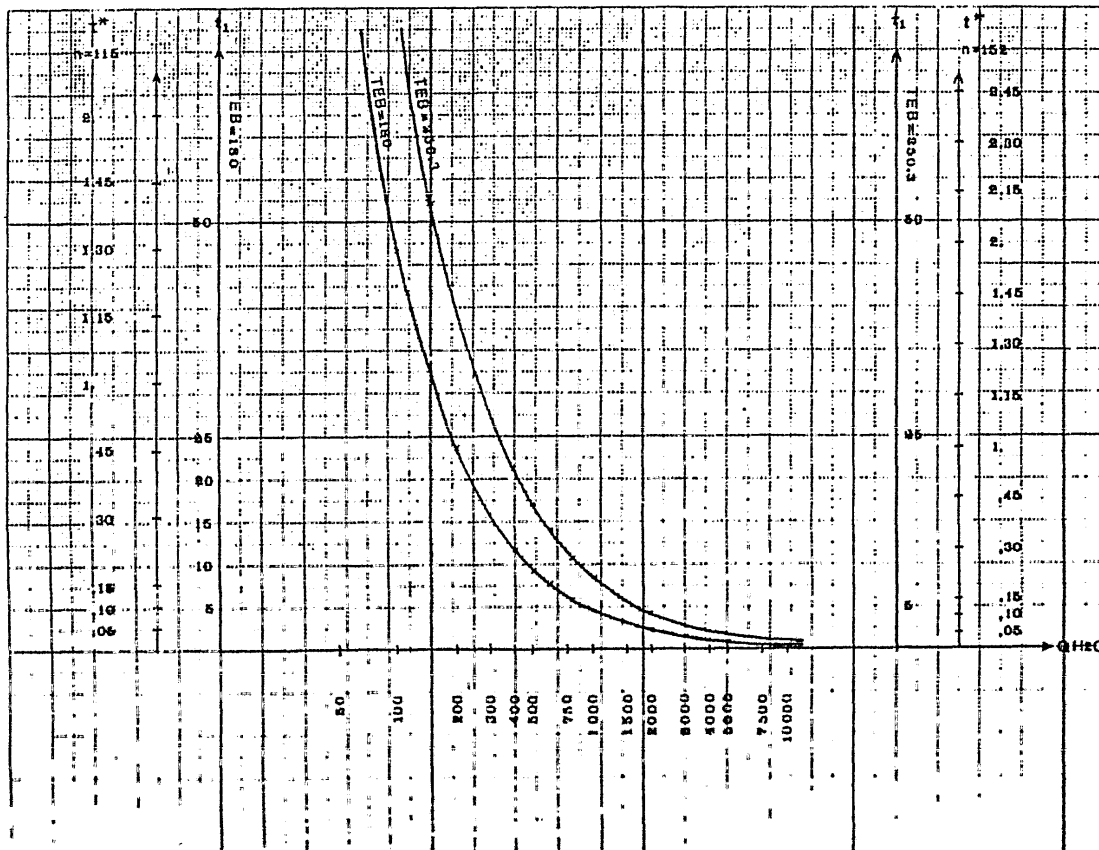
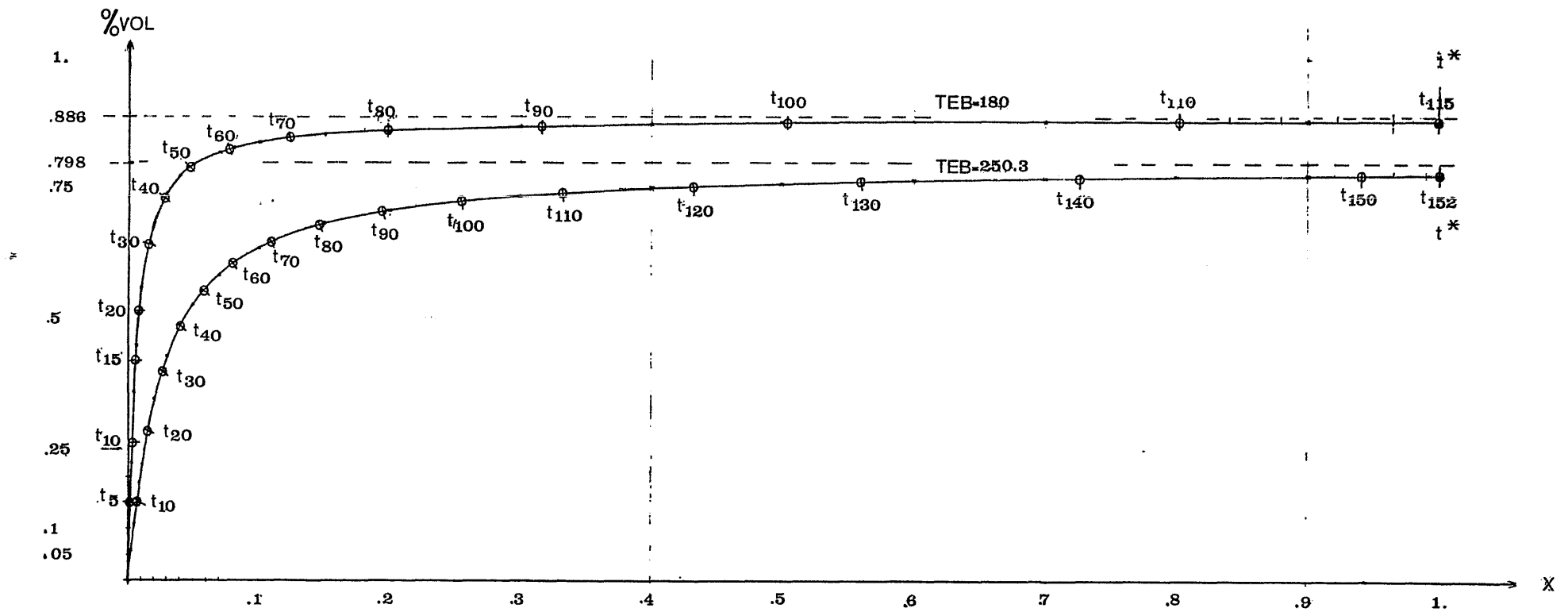
$$RET = RIT + DXTUB + DXATUB$$

$$RIT = RIT + DXTUB$$

$$ATE = 2\pi \cdot RET \cdot LTUB$$

$$QPT = U_{TUB} \cdot ATE (TEB - TINF)$$

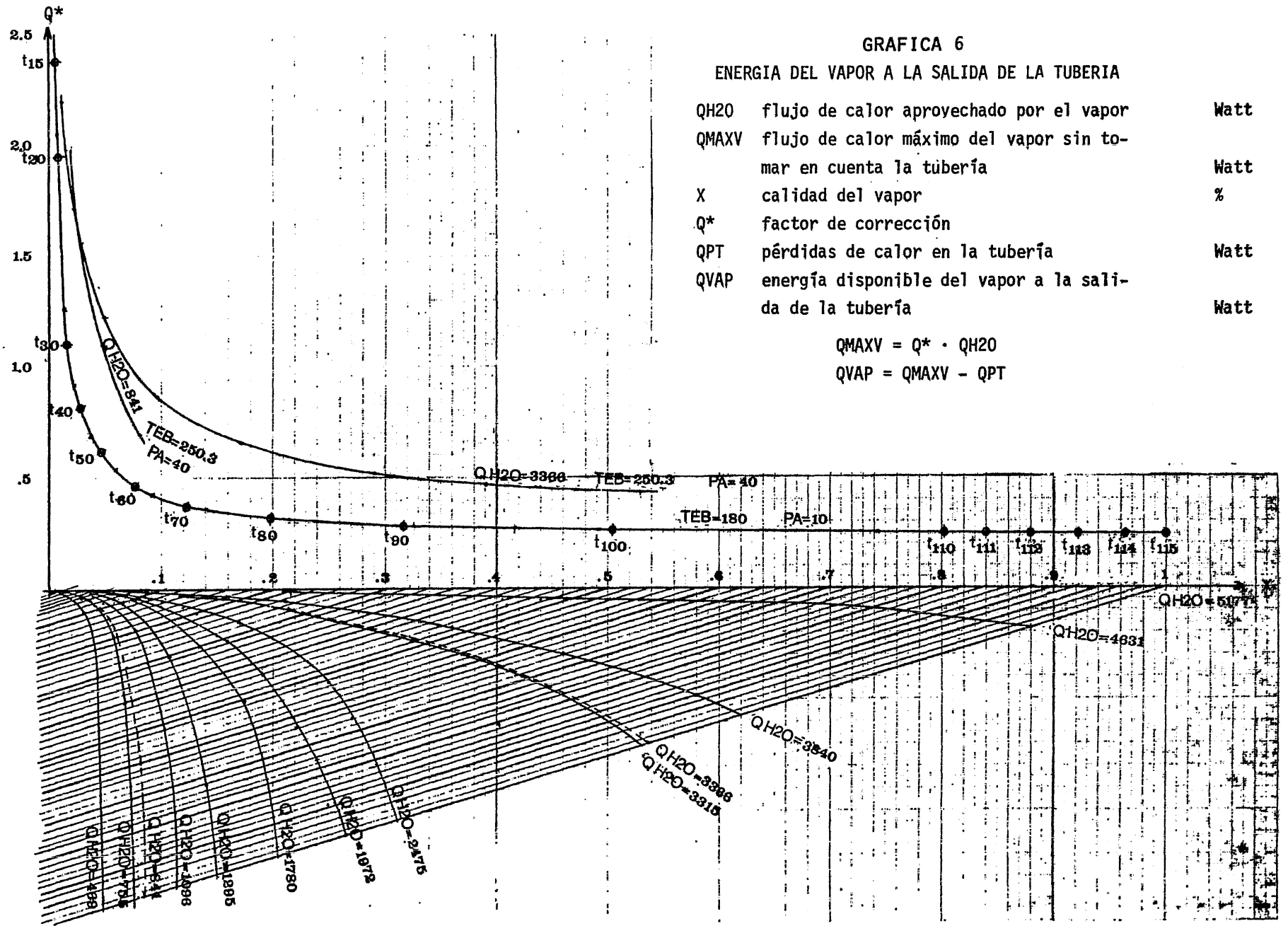




GRAFICA 5
SALIDA DEL VAPOR DEL GENERADOR

- | | | |
|------------------|---|--------------------|
| VOL | volúmen del generador de vapor y de la tubería | m ³ |
| X | calidad del vapor | % |
| V _F | volúmen específico del vapor húmedo | m ³ /kg |
| V _G | volúmen específico del vapor seco | m ³ /kg |
| MH _{2O} | masa de agua del generador | kg |
| MV | masa de vapor que sale del generador | kg |
| QH _{2O} | flujo de calor aprovechado por el vapor | Watt |
| HFG | entalpía del vapor | Joule/kg |
| t* | tiempo total del proceso de generación de vapor | H.MS |
| n | número de intervalos de tiempo | |
| t ₁ | tiempo de cada intervalo | seg |
- $$V_{FG} = V_G - V_F ; MV = MH_{2O} - \frac{VOL}{V_F + X V_{FG}}$$

$$t^* = \frac{VOL \cdot HFG}{V_{FG} \cdot QH_{2O}} \ln \frac{V_G}{V_F} ; t_1 = \frac{t^*}{n}$$



Observaciones de las gráficas

- Las pérdidas de calor en la base del generador son muy representativas porque están a una temperatura alta y se encuentran completamente descubiertas al ambiente. Sería recomendable reducir el área de la base al mínimo, dependiendo del área focal. En los resultados obtenidos fueron muy importantes estas pérdidas de calor al trabajar con poca o mucha energía incidida
- Al aumentar la energía incidida se incrementan cuantitativamente las pérdidas, pero en porcentaje disminuyen
- Con espesores pequeños de aislante, las pérdidas de calor en el recipiente son altas porque la velocidad del viento influye considerablemente
- En el recipiente se reducen significativamente las pérdidas de calor al colocarle un aislante de mayor espesor, haciendo que las pérdidas de calor por convección, que estan en función de la velocidad del viento, sean mínimas
- Comparando las pérdidas de calor en la base y el recipiente, las primeras son más representativas aunque el área de la base sea menor que la del recipiente, aún con su respectivo aislamiento
- Las pérdidas de calor en la tubería se disminuyen considerablemente al colocarle un aislamiento grueso y al disminuir la longitud de ésta

ta. Es importante considerar el radio de la tubería porque al ir aumentando crece la superficie expuesta al ambiente y, por consiguiente, las pérdidas de calor

- El flujo de vapor generado es variable y decrece conforme aumenta la calidad del vapor. Es por eso que la energía disponible al principio del proceso es alta pero el vapor tiene alta humedad. Al final de la producción del vapor, la calidad es alta pero el flujo de vapor disminuye considerablemente
- El regulador de presión no controla el flujo de vapor y a eso se debe que el proceso sea variable
- Cuando se incrementa la presión de trabajo, el generador admite menor porcentaje de volumen de agua, pero con la ventaja de que se obtiene mayor energía disponible en la expansión del vapor
- Como la energía disponible decrece cuando se incrementa la calidad del vapor, no es conveniente sobrecalentar el vapor sobrante ya que constituye una cantidad despreciable y difícilmente aprovechable.

5. MODELO FISICO DEL SISTEMA

5.1 Diseño de la Montura Ecuatorial

Aquí se presenta un análisis de esfuerzos a los cuales está sometida la montura ecuatorial.

Primero se determinan el peso y las dimensiones de sus componentes:

- Parábola:

W = 20 Kg peso

D = 1.6 m diámetro

En el peso se incluyen los tornillos y las placas de sujeción.

- Tubo y barra del contrapeso:

W = 2 Kg

D = 4.5 pulg

d = 4.026 pulg L = 22.86 cm

W = 15.3

D = 2 pulg

L = 38 pulg de la barra

- Contrapeso:

$$W = 78 \text{ Kg} \quad D = 8.5 \text{ pulg} \quad d = 2 \text{ pulg} \quad H = 11.36 \text{ pulg}$$

Ver fig 5.1.3.

- Generador de vapor:

$$W = 25 \text{ Kg} \quad D = 6.065 \text{ pulg} \quad \text{espesor} = 3/8 \text{ pulg}$$

$$L = 0.5482 \text{ m} \quad \text{vol} = 10 \text{ lt}$$

$$\text{peso del agua} = 10 \text{ Kg}$$

- Soporte del generador (2 barras)

$$W = 15 \text{ Kg por barra} \quad D = 1.5 \text{ pulg} \quad L = 1.65 \text{ m c/u}$$

ver fig 5.1.1, fig 5.1.1.1

- Eje de la declinación; tubo que soporta al generador, espejo parabólico y contrapeso con su barra:

$$W = 32 \text{ Kg} \quad D = 4.5 \text{ pulg} \quad d = 4.026 \text{ pulg} \quad L = 2\text{m}$$

ver fig 5.1.4, fig 5.1.1.

Cálculo de la fuerza que ejerce el viento sobre la parábola: "Fv"

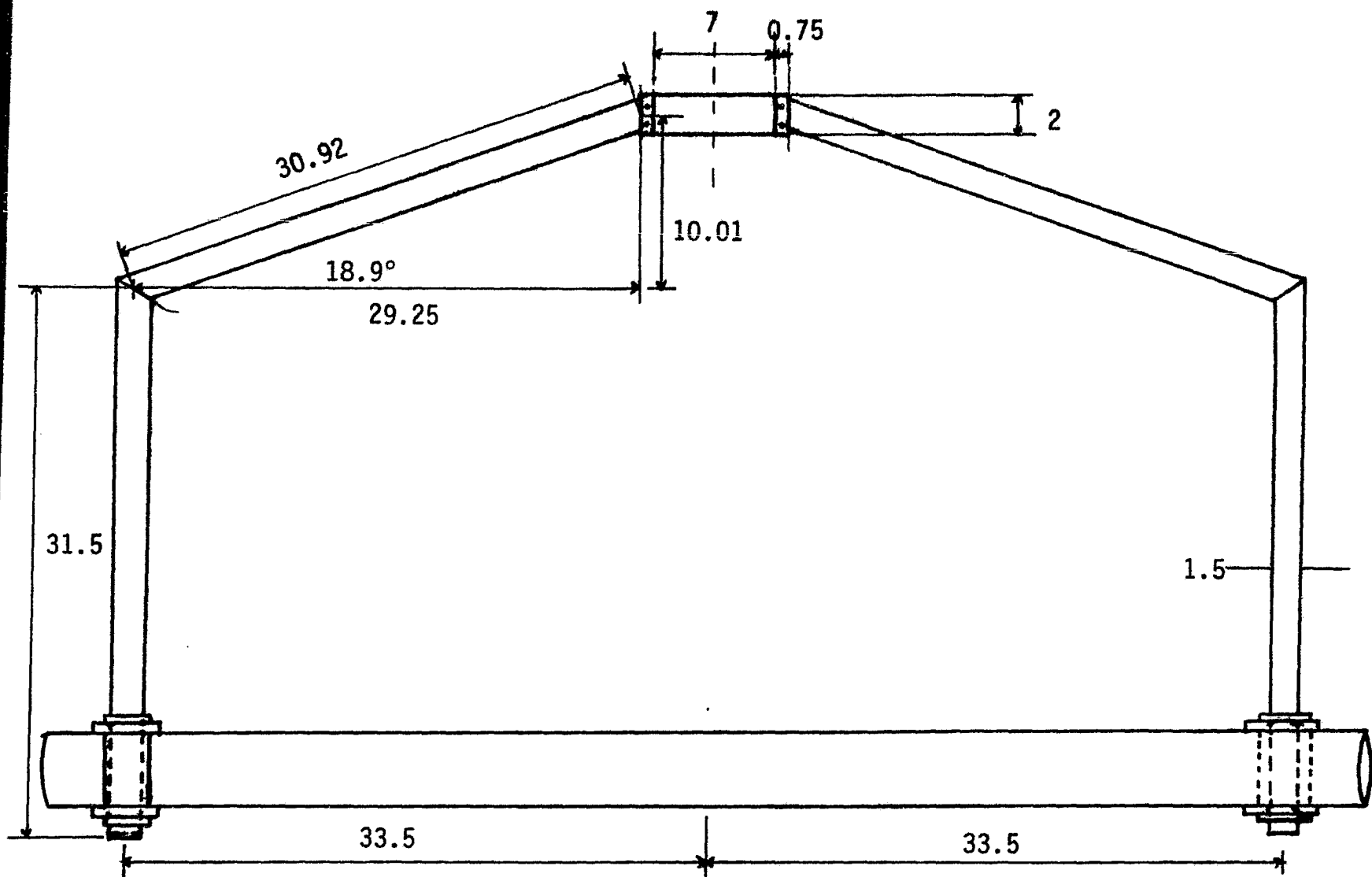
$$F_v = \frac{\rho}{9.81} A \left(\frac{V_v}{3.6} \right)^2$$

Densidad del aire $\rho = 0.9059 \text{ Kg/m}^3$

Area proyectada de la parábola $A = 2 \text{ m}^2$

Velocidad del viento $V_v = 100 \text{ km/hr}$

Fuerza del viento $F_v = 142.5 \text{ kg}$



ACOT: PULG.
ESCALA 1:10

barra de 1.5 pulg de diámetro
media abrazadera de 3/4 pulg de espesor soldada a las barras
y la otra mitad de lámina de 1/8 de espesor

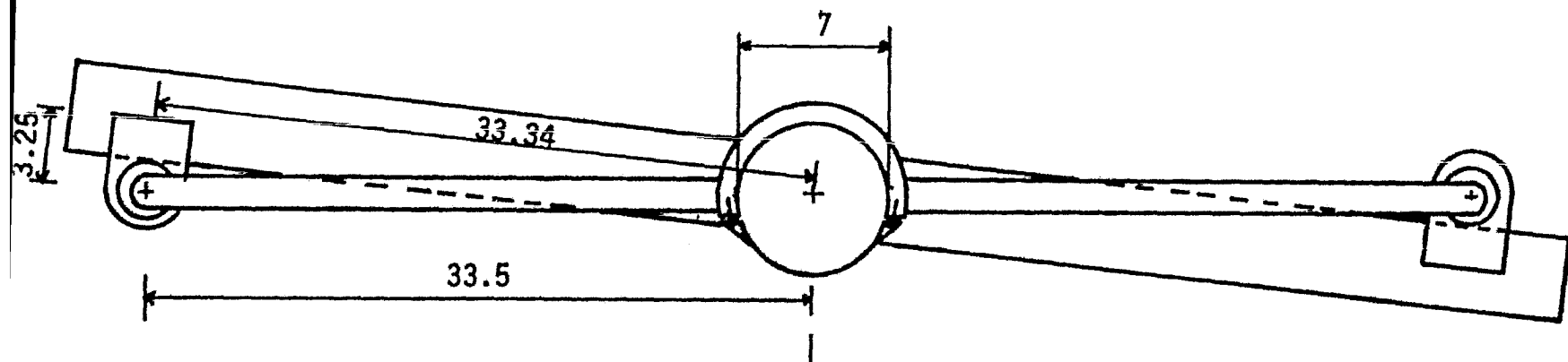


FIG. 5.1.1 Soportes del generador de vapor

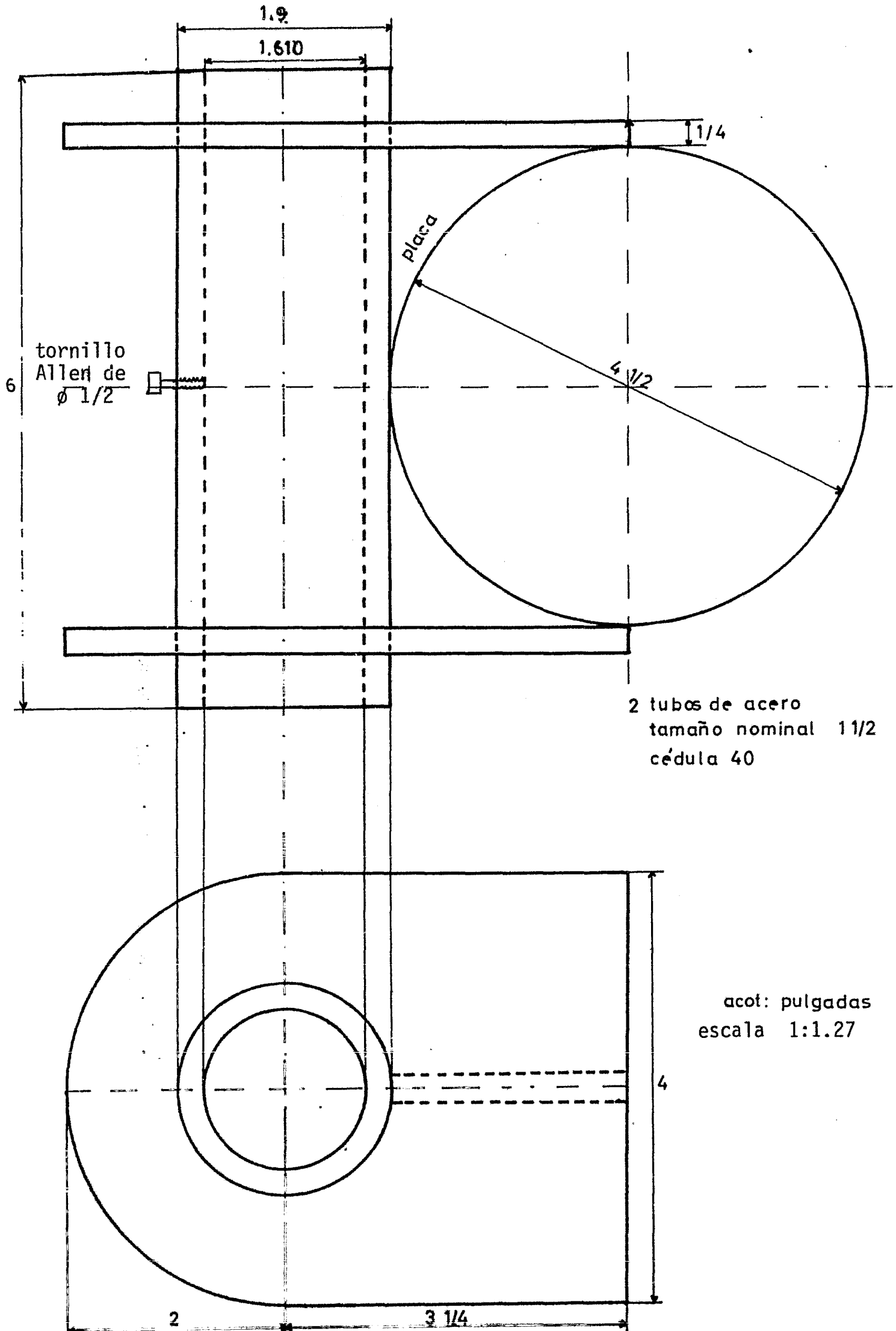
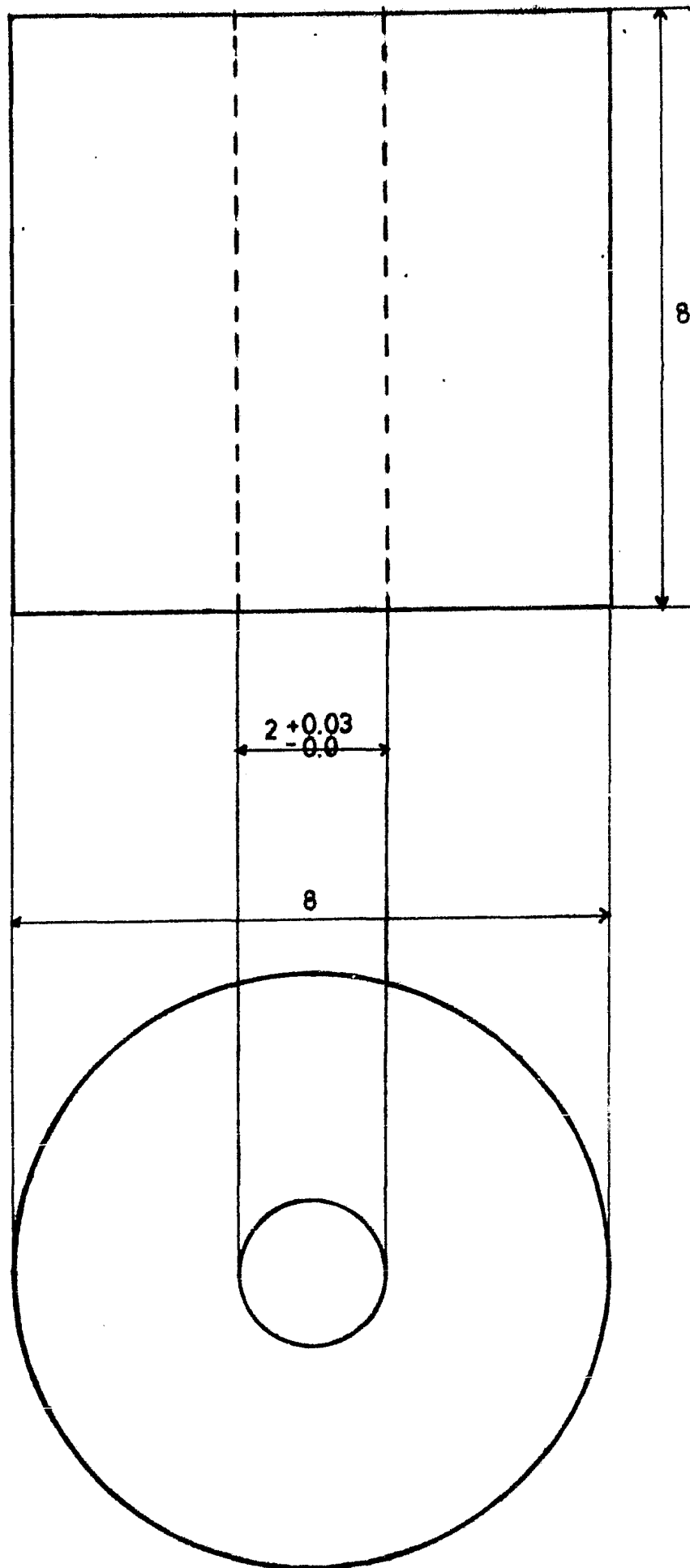


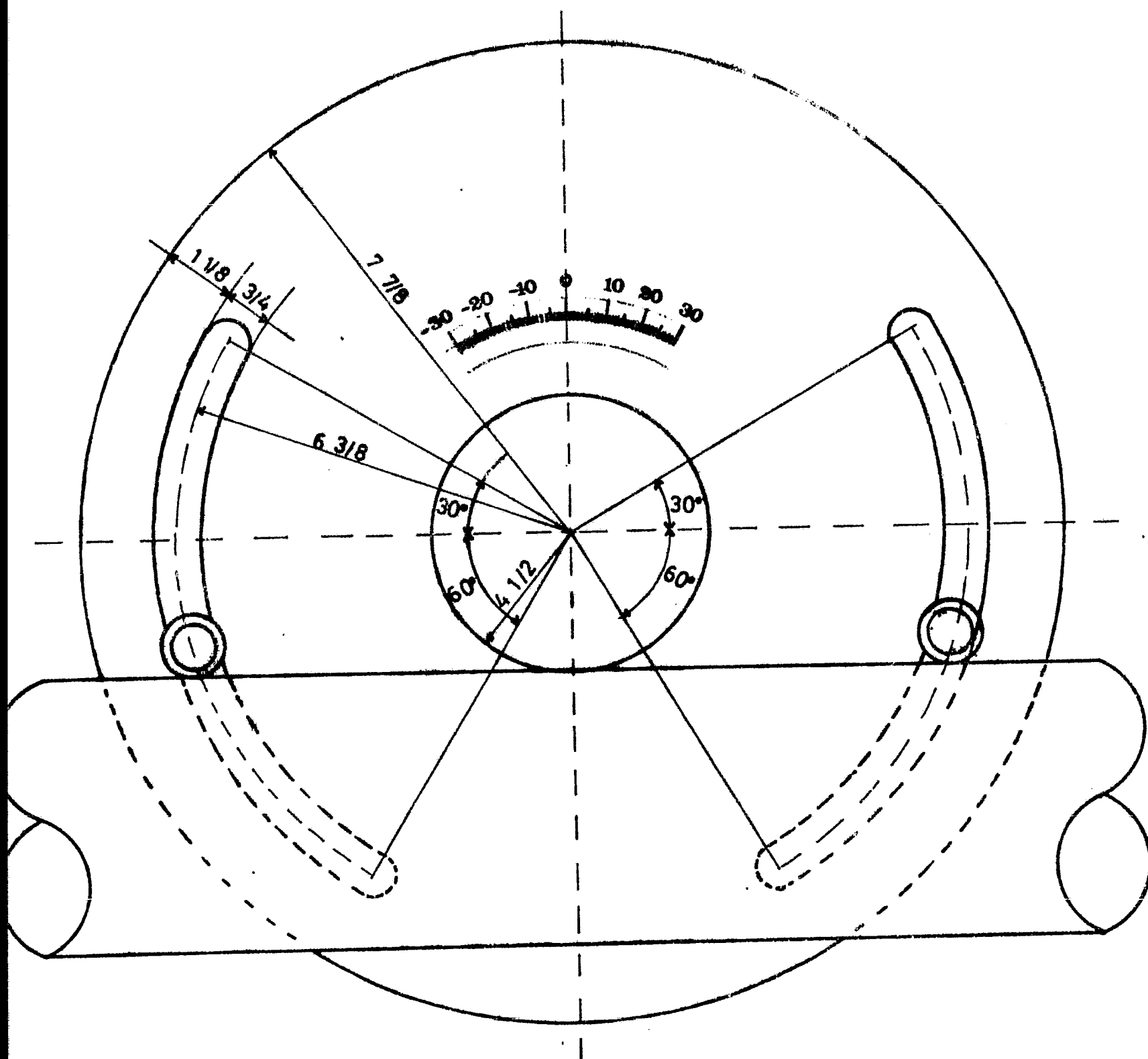
fig. 5.1.1.1 DETALLE DE LOS SOPORTES DEL GENERADOR



escala 1:2.54

acot.: pulgadas

Fig. 5.1.3 Dimensiones del contrapeso



espesor placa: $\frac{5}{16}$

acot: pulgadas

escala 1:2.54

Fig. 5.1.4 Disco con graduación para el ajuste de la declinación

En el generador la fuerza del viento es:

$$F_v = 10 \text{ Kg}$$

Esto sucede cuando hay ráfagas de viento.

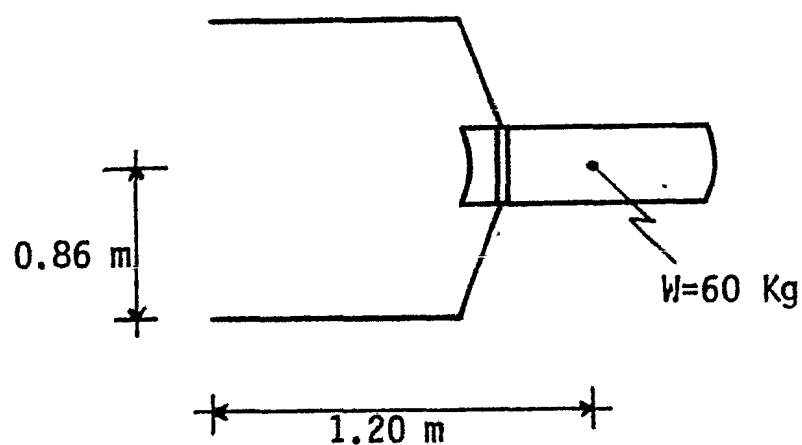
Cálculo de los soportes del generador; ver fig 5.1.1

Por flexión: $\sigma = Mv/I = \frac{32 Mf}{\pi D^3}$

para barras

Por torsión: $\tau = \frac{Mt}{J} r = \frac{16 Mt}{\pi D^3}$

Peso del generador	25 Kg
Peso del agua	10
Peso barra (1)	15
Fuerza del viento en el generador	<u>10</u>
	60 Kg



Suponiendo que este peso está concentrado en el generador, encontramos los momentos de flexión y de torsión con sus respectivas distancias:

$$\begin{aligned} M_f &= 60 \times 1.20 = 72 \text{ {Kg-m}} \\ M_T &= 60 \times 0.86 = 51.6 \text{ {Kg-m}} \end{aligned}$$

y el diámetro de la barra es:

$$D = 0.0381 \text{ {m}}$$

El esfuerzo de flexión es:

$$\sigma = \frac{32 \times 72}{\pi(0.0381)^3 \times 10^4} \frac{1}{2} = 663 \text{ {Kg/cm}^2} \text{ en las barras}$$

El esfuerzo de torsión es:

$$\tau = \frac{16 \times 51.6}{\pi(0.0381)^3 \times 10^4} \frac{1}{2} = 237.58 \text{ {Kg/cm}^2}$$

El esfuerzo máximo de trabajo es:

$$\sigma_{\text{barra}} = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} = 704.28 \text{ kg/cm}^2 = 10,008 \text{ lb/pulg}^2$$

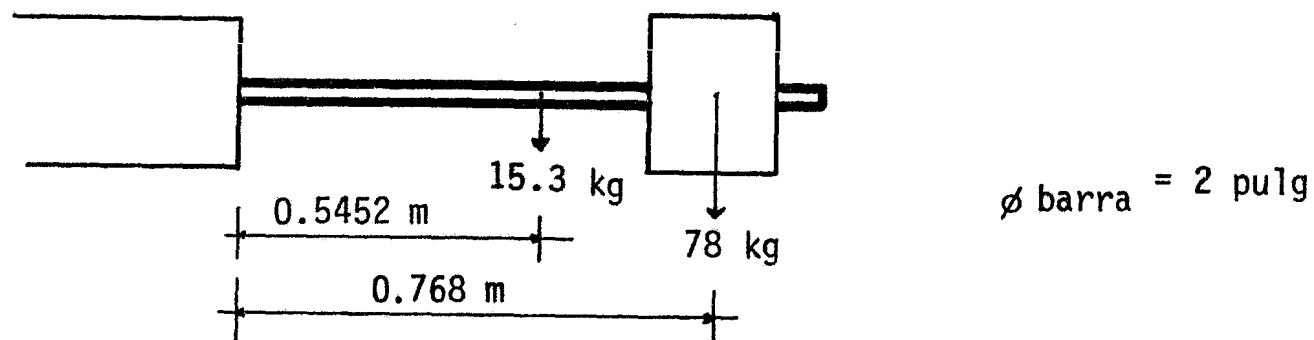
Esfuerzo máximo permisible del material:

$$\sigma_{\text{material}} = 20,000 \text{ lb/pulg}^2$$

El factor de seguridad:

$$F.S. = 1.98$$

Cálculo de la flecha del contrapeso involucrando su propio peso:



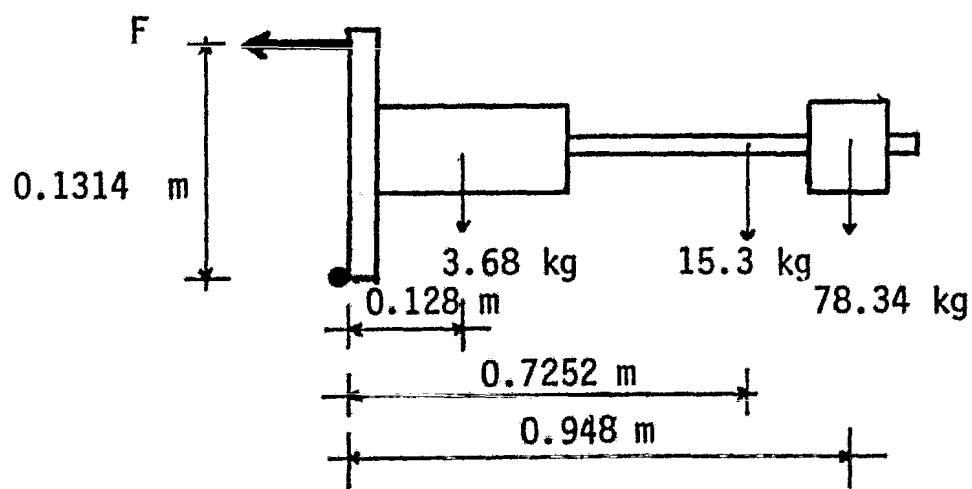
Se encuentra la flexión en la barra:

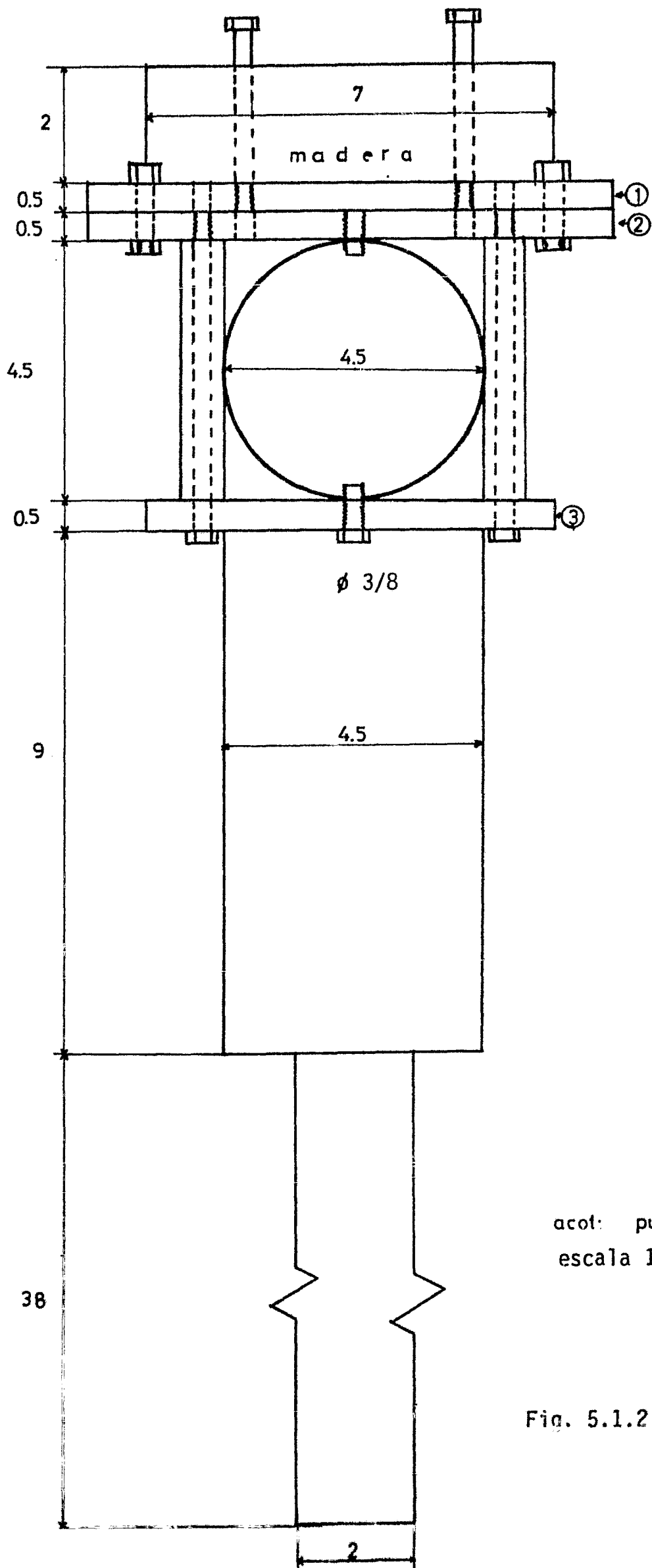
$$\sigma = \frac{32 \times (15.3 \times 0.5452 + 78.34 \times 0.768)}{\pi (2 \times 0.0254)^3 \times 10^4} \times 14.2105 = 7564 \text{ lb/pulg}^2$$

y con el mismo material se localiza el factor de seguridad:

$$\text{F.S.} = 2.64$$

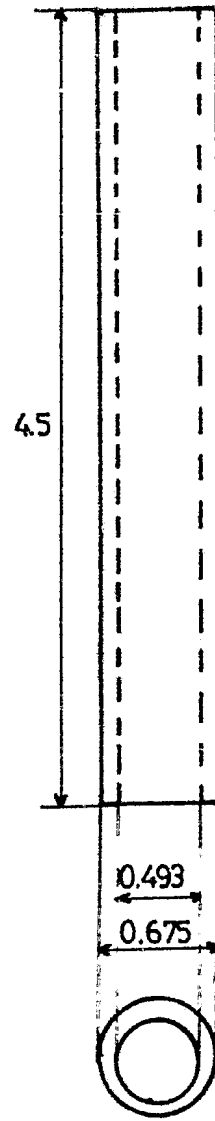
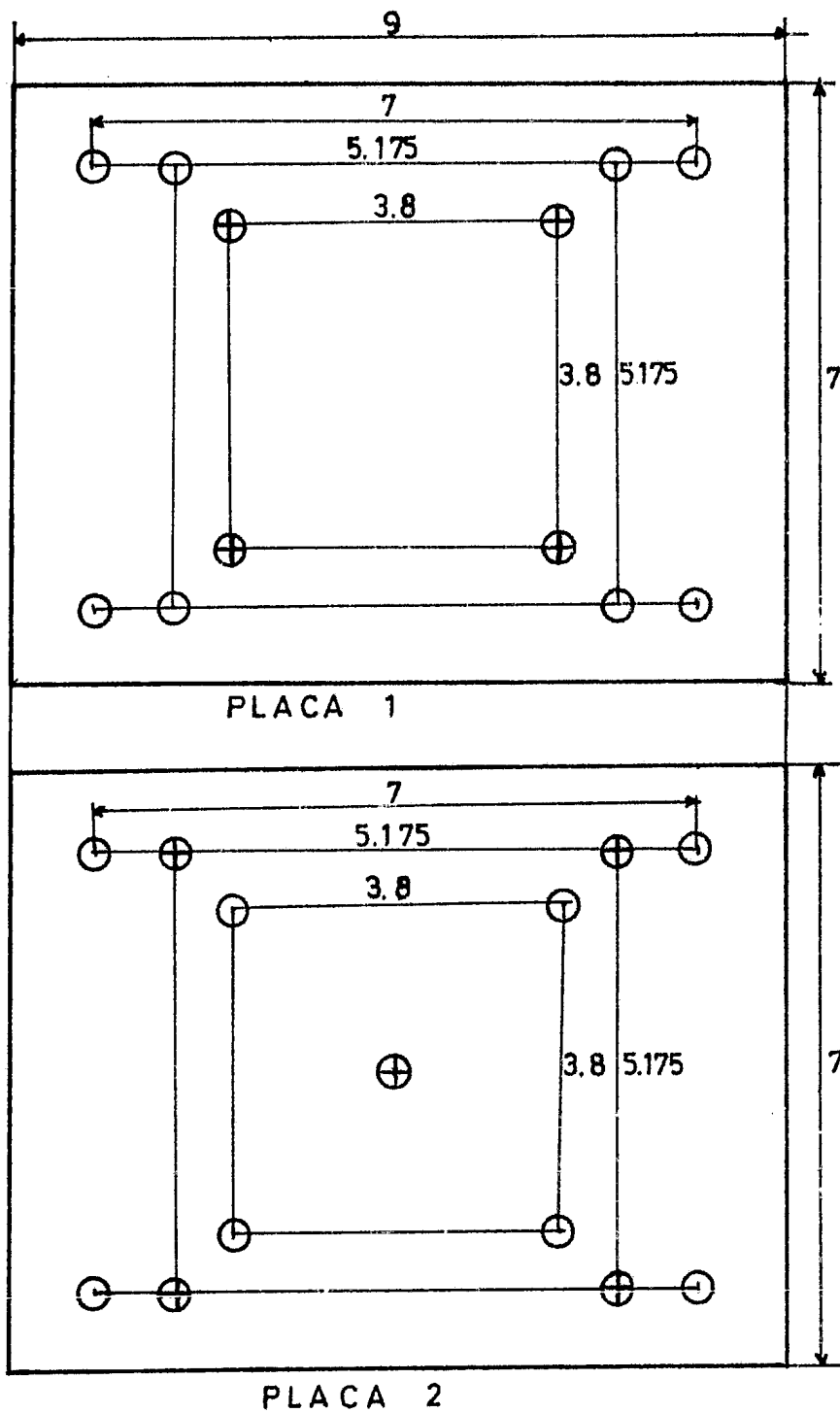
Cálculo de los pernos que sujetan las placas para el soporte del contrapeso, ver fig 5.1.2, fig 5.1.2.1.





acot: pulgadas
escala 1:2.54

Fig. 5.1.2 Soportes del
contrapeso
y parábola



4 ESPACIADORES
tubo 3/8" cédula 40

○ mayor de 3/8"

⊕ rosca de 3/8"

acot.: pulgadas
escala 1:2.54

fig 5.1.2.1 Detalle de las placas de sujeción del contrapeso y parábola

Se calcula la fuerza de tensión en el tornillo o perno:

$$F = \frac{3.68 \times 0.128 + 15.3 \times 0.7252 + 78.34 \times 0.948}{0.1314} = 653.2 \text{ Kg}$$

Con un perno de 1/2 pulg de diámetro su área efectiva es:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \times 0.75 = 0.147 \text{ pulg}^2$$

El esfuerzo de tensión en los dos pernos es de:

$$\sigma = \frac{F}{2A} = 4885.5 \text{ lb/pulg}^2$$

y su factor de seguridad es:

$$\text{F.S.} = 4.09$$

Cálculo de los pernos de 3/8 de pulg de diámetro, por cortante:

Ver fig 5.1.2.

$$\tau = \frac{F_T}{A_T}$$

la fuerza cortante es:

$$F_T = 3.68 + 15.3 + 78.34 = 97.32 \text{ Kg}$$

el área de cortante es:

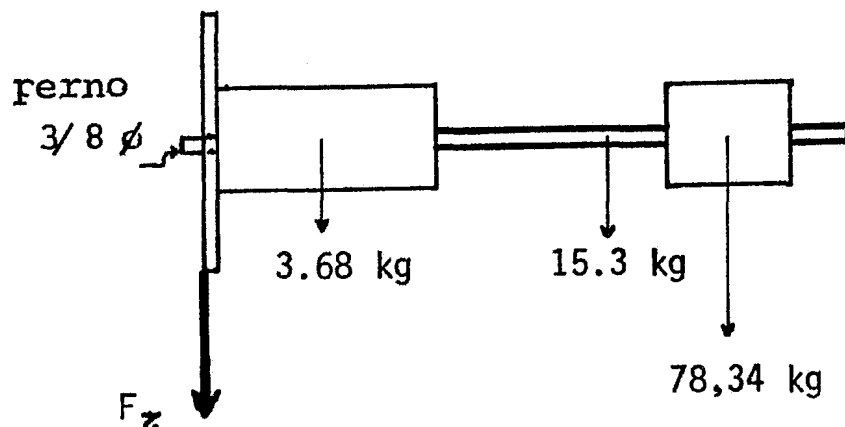
$$A_T = \frac{\pi}{4} D^2 \times 0.75 = 0.0828 \text{ pulg}^2$$

el esfuerzo cortante es de:

$$\tau = 2,589.8 \text{ lb/pulg}^2$$

y su factor de seguridad es:

$$F.S. = 7.72$$

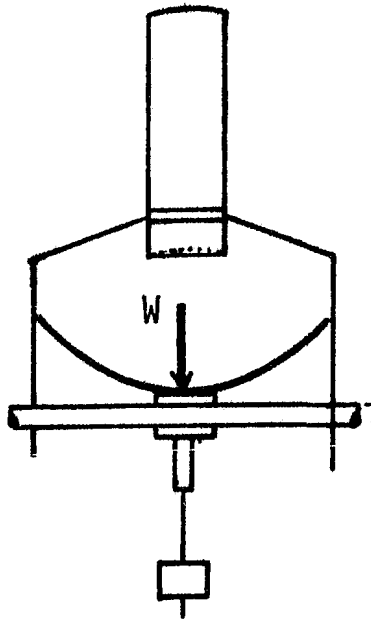


Al tener estos pernos de 3/8 de pulg en el eje de la declinación, los pernos de 1/2 pulg no se flexionan y trabajan sólo a tensión.

Se procede al cálculo del esfuerzo del tubo que sostiene al generador, la parábola y el contrapeso. Suponiendo que todo el peso está concentrado en el centro del tubo:

Generador con agua	35 kg
Soportes del generador	30
Contrapeso	80
Barra del contrapeso	15
Tubo con soportes	38
Parábola	20
Fuerza del viento	<u>145</u>

$$W = 363$$



El esfuerzo de flexión para el tubo es el siguiente:

$$\sigma = \frac{32 M_f D}{\pi (D^4 - d^4)}$$

El momento flexionante en el tubo es:

$$M_f = W \frac{L}{4} \quad ; \quad L = 2m$$

El esfuerzo en el tubo es de:

$$\sigma = \frac{32 \times 363 \times 4.5 \times 50}{\pi (4.5^4 - 4.026^4) 2.54^3} \times 14.2105 = 4,896.3 \text{ lb/pulg}^2$$

y su factor de seguridad es:

$$\text{F.S.} = 4.08$$

Como se ve, los esfuerzos de este tubo son pequeños por lo que no es necesario calcular el cuadro que los sostiene a éste eje de la declinación, por ser más resistentes.

Por último se calcula el esfuerzo al que están sometidas las flechas - que corresponden al eje polar de la montura. Ver fig 5.1.5

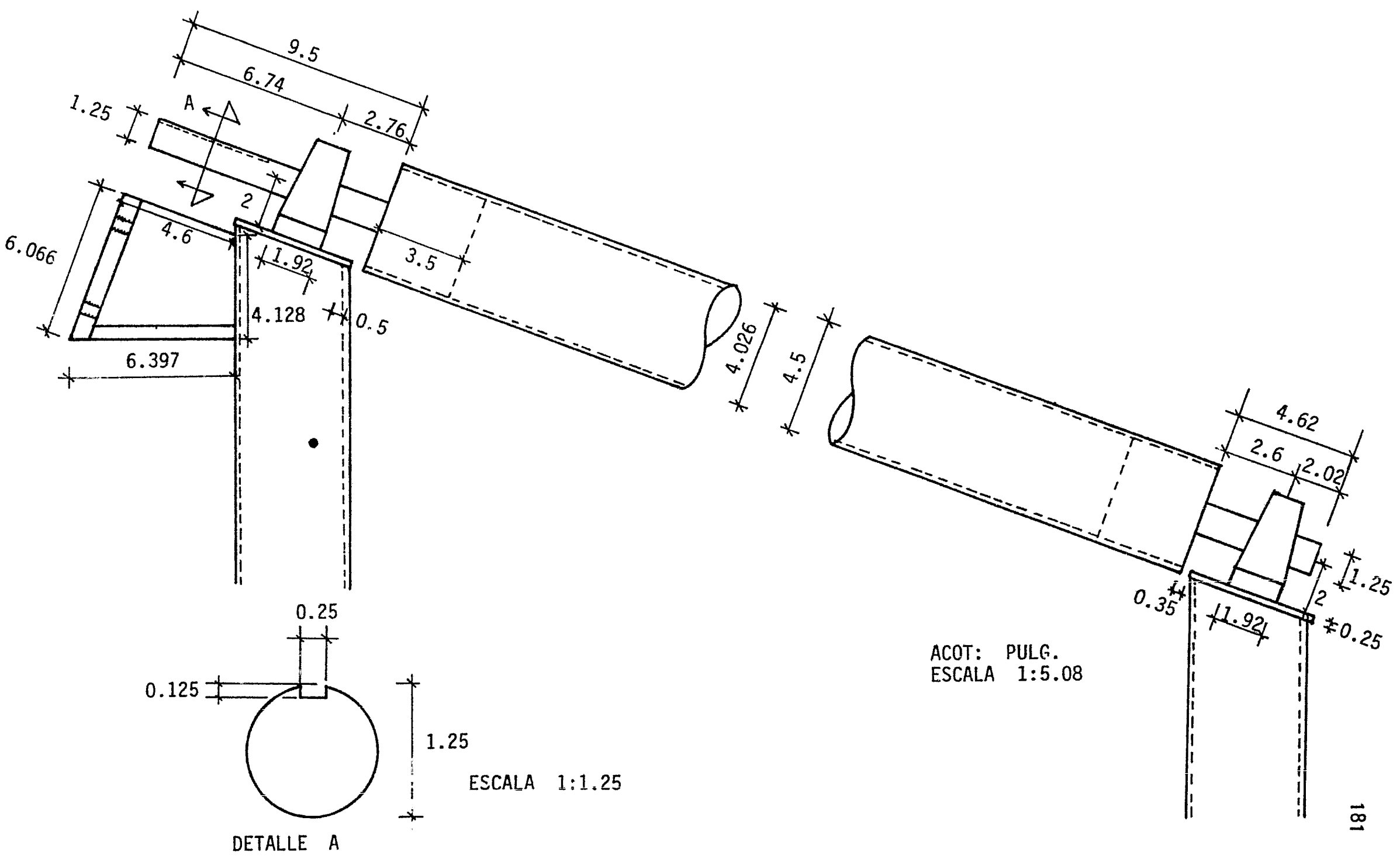


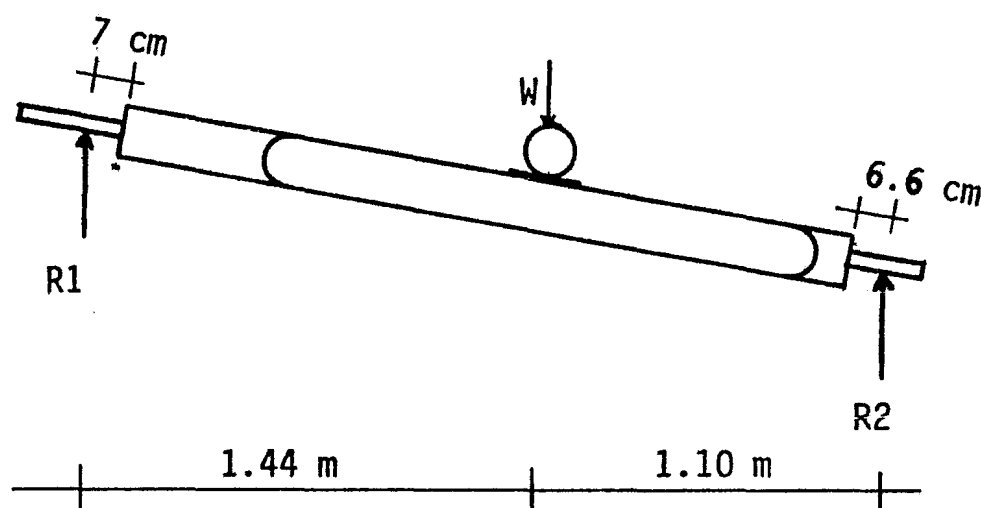
Fig. 5.1.5 FLECHAS DE LA MONTURA ECUATORIAL

La flecha pequeña se analiza por flexión y por cortante, mientras que la grande se calcula por flexión, cortante y torsión por estar acoplada al sistema de seguimiento. Las flechas son de 1 1/4 pulg de diámetro.

Para esto es necesario involucrar además el peso de la estructura cuadrada. Se llevó aproximadamente 9 metros de tubo y su peso es de 145 Kg.

Por lo que se aplican 363 Kg en el eje de la declinación y 145 del cuadro.

Este peso se distribuye en las dos chumaceras de acuerdo a las siguientes distancias:



ver fig 5.1.5.

y sus resultantes son:

$$R_1 = 220 \text{ Kg}; \quad R_2 = 288 \text{ Kg}$$

Con esta fuerza aplicada calculamos las flechas: Flecha mayor por tensión, cortante y torsión.

$$\sigma_F = \frac{32 M_F}{\pi D^3} = \frac{32 \times 220 \times 7}{\pi (1.25)^3 \times 2.54^3} \times 14.2105 = 6964.6 \text{ lb/pulg}^2$$

$$\tau = \frac{F_T}{A_t} = \frac{R_1}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{4 \times 220}{\pi (1.25)^2 \times 2.54^2} \times 14.2105 = 394.87 \text{ lb/pulg}^2$$

El desbalanceo es de 10 Kg a 1.10 m ; $M_T = 1100 \text{ Kg-cm}$

$$\tau_T = \frac{16 M_T}{\pi D^3} = \frac{16 \times 1100}{\pi 1.25^3 \times 2.54^3} \times 14.2105 = 2,487.3 \text{ lb/pulg}^2$$

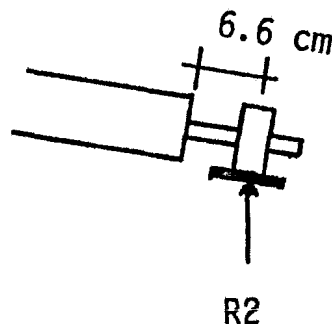
y se obtiene un esfuerzo máximo de:

$$\sigma_{\text{flecha}} = \sqrt{\sigma_F + (\tau + \tau_T)^2} = 7,537.4 \text{ lb/pulg}$$

con un factor de seguridad de:

$$\text{F.S.} = 2.65$$

Cálculo de la flecha inferior por flexión y cortante.



$$\sigma_F = \frac{32 M_F}{\pi D^3} = \frac{32 \times 288 \times 6}{\pi 1.25^3 2.54^3} \times 14.2105 = 7,814.8 \text{ lb/pulg}^2$$

$$\tau = \frac{F_T}{A_T} = \frac{R_2}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{4 \times 288 \times 14.2105}{\pi 1.25^2 2.54^2} = 516.92 \text{ lb/pulg}^2$$

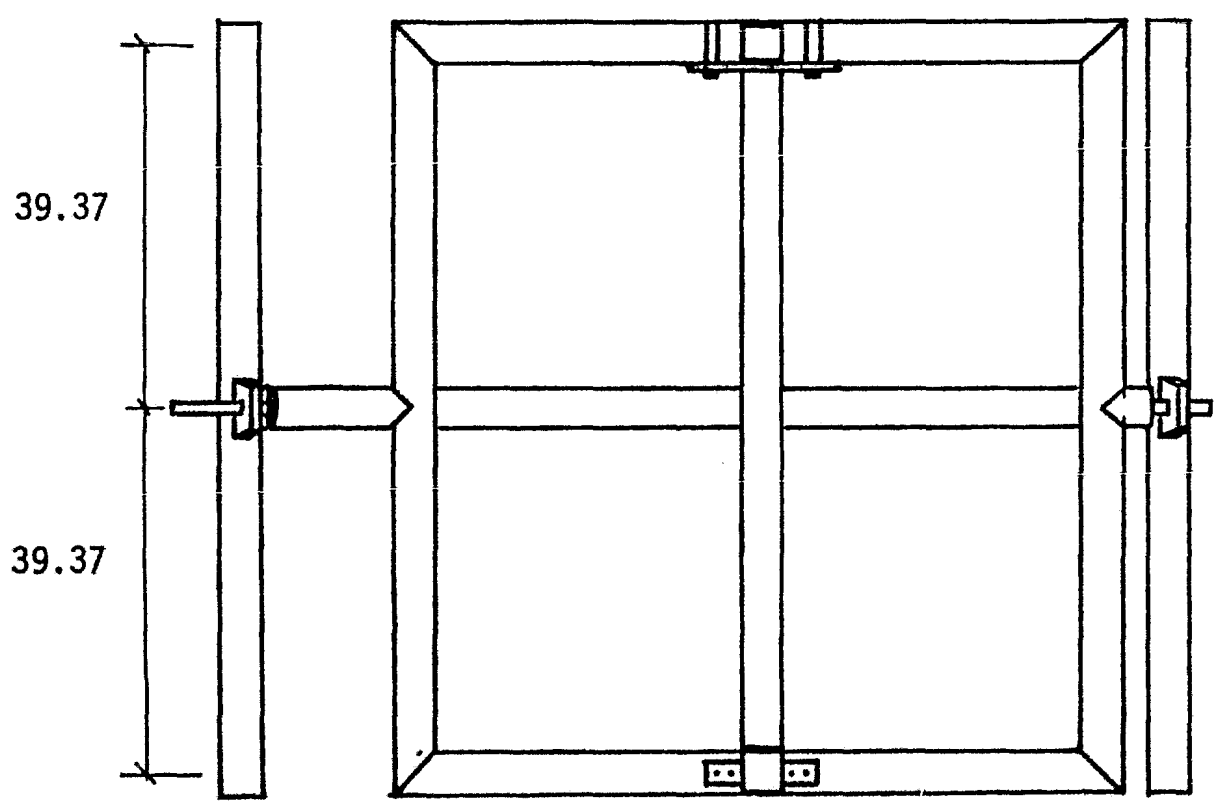
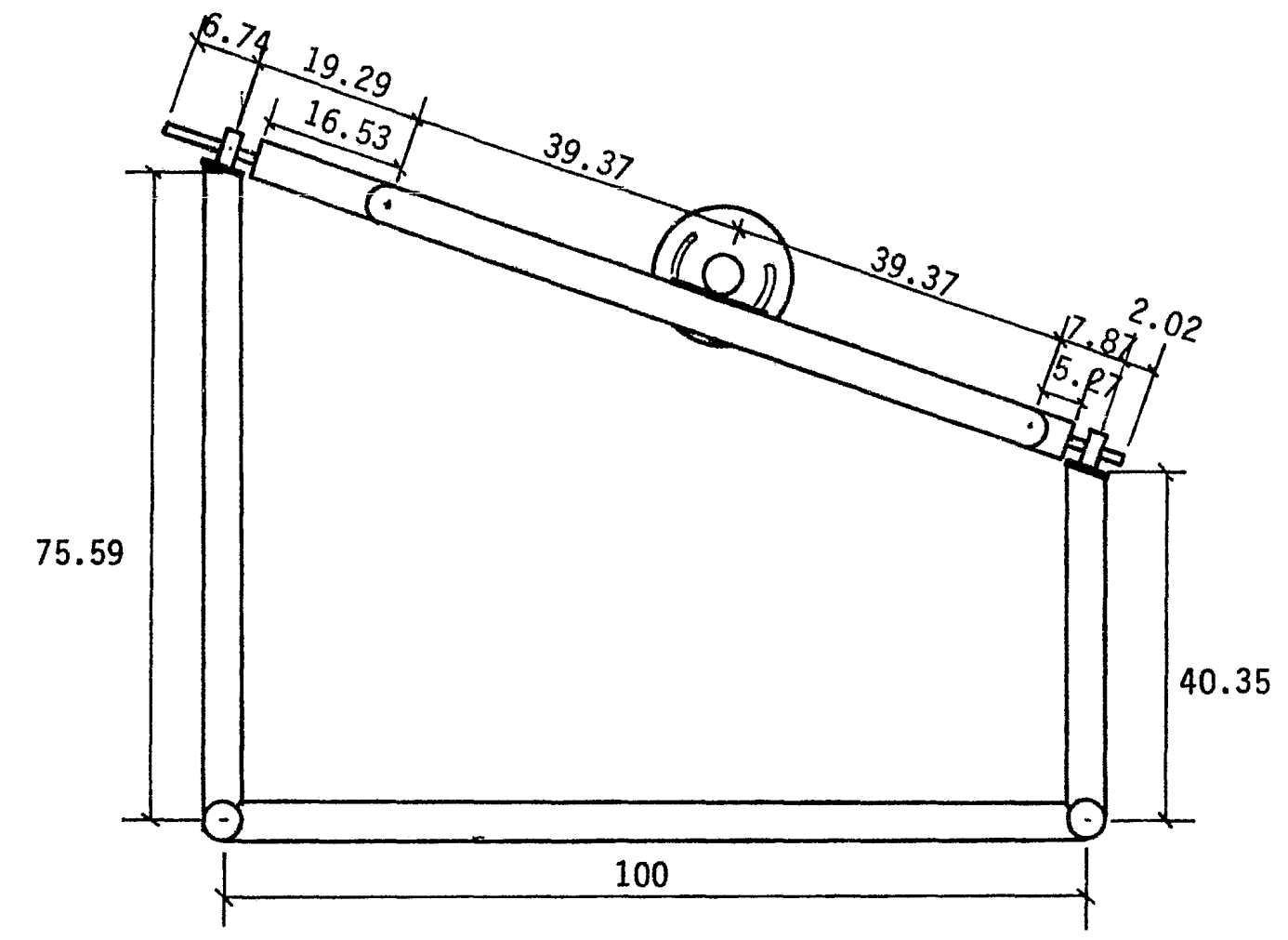
El esfuerzo de trabajo en la flecha es:

$$\sigma_{\text{flecha}} = \sqrt{\sigma_F^2 + \tau^2} = 7,831.9 \text{ lb/pulg}^2$$

y el factor de seguridad es:

$$\text{F.S.} = 2.55$$

Con lo anterior queda calculada la montura ecuatorial con sus dimensiones reales. En las figs 5.16 y 5.17 se muestra la montura ecuatorial.



ACOT. PULG.
ESC. 1:25.4

Fig. 5.1.6 Dimensiones de la montura ecuatorial

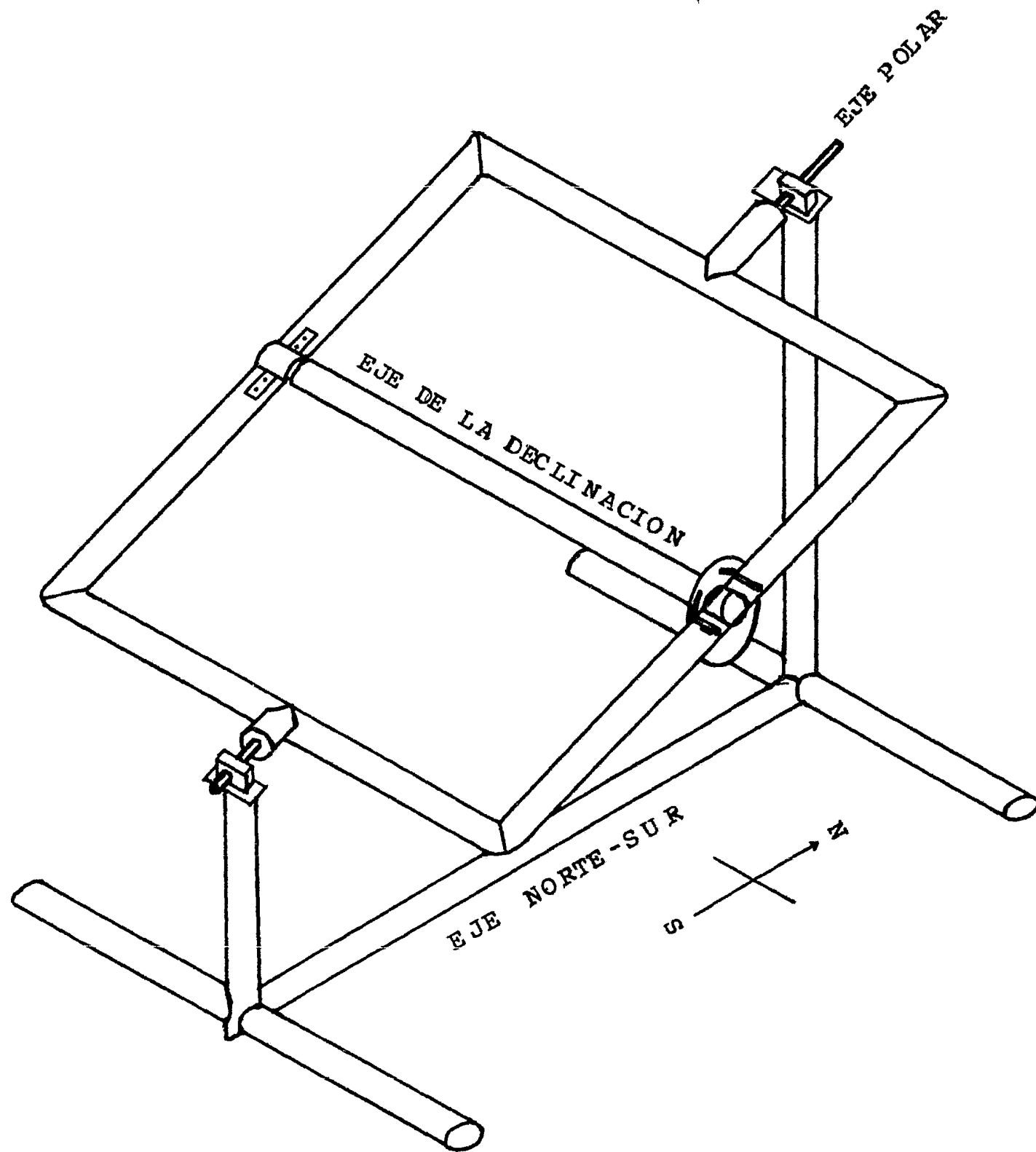


Fig. 5.1.7 Montura ecuatorial

5.2 Memoria de cálculo del mecanismo de seguimiento

Debido a la rotación de la Tierra, es necesario mover la montura a una velocidad angular constante para que siga la trayectoria del Sol, siendo esta velocidad angular de 15 grados/hora que se aplica al eje polar de la montura ecuatorial. Este movimiento se encuentra determinado por un giro muy pequeño en intervalos de tiempo grandes, por lo que es necesario acoplar un mecanismo de seguimiento con el cual se pueden hacer ajustes en intervalos de tiempo pequeños, para poder tener una mayor precisión en el seguimiento.

La reducción que se busca obtener corresponde a una revolución por minuto en la entrada del mecanismo y como salida una revolución por día en la montura. Esta reducción es de 1440 revoluciones a la entrada por una en la salida.

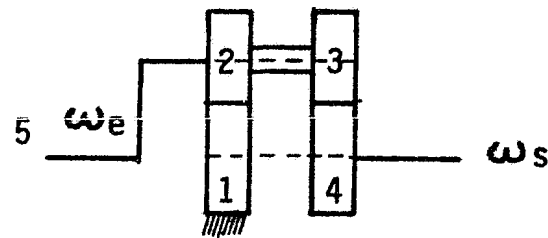
$$\Omega = \frac{1 \text{ rev/día}}{1 \text{ rev/mín}} = \frac{1}{1440}$$

Se observa que esta reducción es muy grande, por lo cual es necesario separarla en dos partes acopladas entre sí.

$$\Omega = \frac{1}{1440} = \frac{1}{40 \cdot 36}$$

Es equivalente una reducción de 1440 a 1 que una reducción de 40 a 1 acoplada con otra de 36 a 1.

La reducción de 1/40 se obtiene con la siguiente disposición epicicloidal de los engranes, como la mostrada a continuación:



donde

el engrane 1 se encuentra fijo

los engranes 2 y 3 giran a la misma velocidad angular

el engrane 4 está acoplado a la flecha de salida

la manivela 5 es la entrada del sistema

La reducción queda representada con la siguiente ecuación:

$$\Omega = 1 - \frac{n_1}{n_2} \frac{n_3}{n_4} = \frac{\omega \text{ salida}}{\omega \text{ entrada}}$$

y haciendo la consideración de que el engrane 2 es igual al engrane 3,

la reducción que se obtiene es la siguiente:

$$\Omega = 1 - \frac{n_1}{n_4}$$

donde

n_1 número de dientes del engrane 1

n_4 número de dientes del engrane 4

$n_2 = n_3$ número de dientes de los engranes 2 y 3

ω_{salida} velocidad angular a la salida

ω_{entrada} velocidad angular a la entrada

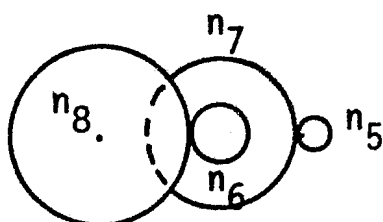
Para la reducción de 1/40 los engranes correspondientes son:

$$n_1 = 39 \text{ dientes}$$

$$n_4 = 40 \text{ dientes}$$

$$n_2 = n_3 = 10 \text{ dientes}$$

La otra reducción de 1/36 se obtiene con el siguiente tren de cuatro engranes



donde

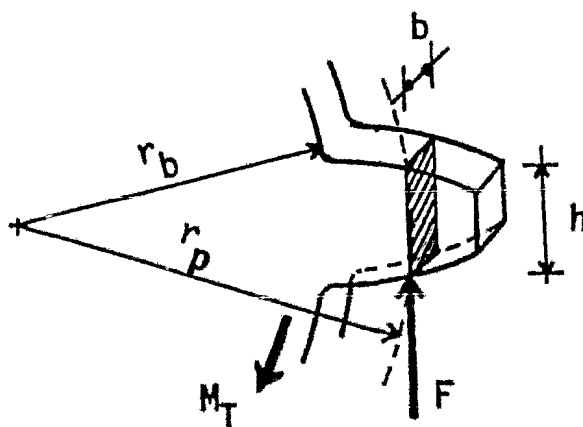
$$n_5 = 6 \text{ dientes} = n_6$$

$$n_7 = 36 \text{ dientes} = n_8$$

$$\Omega = \frac{\omega_{\text{salida}}}{\omega_{\text{entrada}}} = \frac{n_5}{n_7} \frac{n_6}{n_8} = \frac{1}{36}$$

A continuación se calcula el esfuerzo al que se someten los engranes.

Este análisis se hace por la flexión de los dientes y las consideraciones hechas son las siguientes:



donde:

- r_p radio de paso m
- r_b radio base m
- h altura del diente m (para el cálculo de la flexión)
- b espesor del diente m
- F fuerza a que es sometido el diente kg
- M_T momento torsionante km.m

La flexión se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M_f}{I} \frac{h}{2} \quad (5.2.1)$$

donde I corresponde al momento de inercia de la sección rectangular que se expresa como

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad (5.2.2)$$

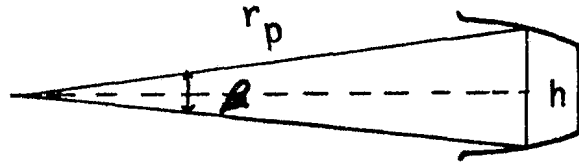
El momento de torsión del engrane es

$$M_T = F r_p \quad (5.2.3)$$

El momento flexionante se calcula de la siguiente forma para los dientes:

$$M_f = F (r_p - r_b) \quad (5.2.4)$$

Para el cálculo de la altura h se divide el círculo de paso entre el doble del número de dientes, para involucrar el hueco entre dientes



$$\beta = \frac{360^\circ}{2n}$$

donde

$$\text{sen } \beta/2 = \frac{h}{2 r_p}$$

y despejando h se obtiene

$$h = 2 r_p \text{ sen } \left(\frac{90}{n} \right) \quad (5.2.5)$$

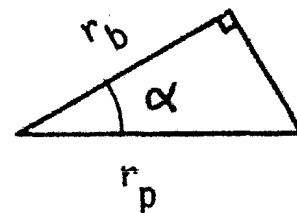
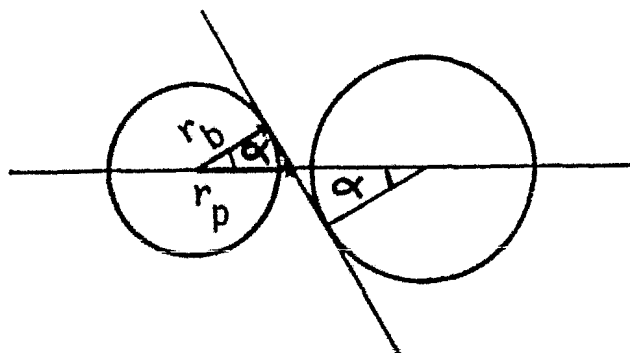
donde

n número de dientes del engrane

r_p radio de paso en m

h altura del diente en m

Por último se involucra el ángulo de presión de los engranes como se muestra en la siguiente figura



donde

$$r_b = r_p \cos \alpha$$

y sustituyendo las ecuaciones 5.2.2 a 5.2.6 en 5.2.1 se obtiene:

$$\sigma = \frac{1.5 M_T (1 - \cos \alpha)}{b r_p^2 \sin^2 \left(\frac{90}{n}\right)} \frac{1}{10^4} \quad (5.2.7)$$

donde

σ esfuerzo de flexión en el diente kg/cm^2

El paso diametral se calcula con la siguiente ecuación

$$P_d = \frac{n}{2 r_p}$$

donde

r_p radio de paso en pulg

Con las ecuaciones anteriores se procede a calcular el esfuerzo de los engranes.

n	M_T	α	P_d	r_p	b	σ	σ_{mat}	F.S.
40	15	20°	6	0.0844667	0.0197	623.4	1407	2.2
10	3.75	20°	6	0.0212	0.0197	157	1407	8.9
39	14.63	20°	6	0.08255	0.0197	607.8	1407	2.3

Cálculo del esfuerzo cortante de los prisioneros de los engranes que los sujetan a las flechas. Son cuatro prisioneros tipo Allen de 1/4 de pulg de diámetro.

$$M_T = F_c r_c$$

despejando F_c se tiene:

$$F_c = \frac{M_T}{r_c}$$

$$A_c = A_{\text{perno}} \cdot 0.75$$

$$\tau = \frac{F_c}{A_c}$$

En la siguiente tabla se muestran los esfuerzos

n	A_{perno}	r_c	F_c	τ	τ_{max}	F.S.
40	0.3166	0.0158	949	998	1407	1.4
39	0.3166	0.0246	594.5	578	1407	2.4

Por último para regular la velocidad angular de la montura se va a acoplar un mecanismo de relojería al tren de engranes descrito anteriormente, para obtener un seguimiento preciso del Sol.

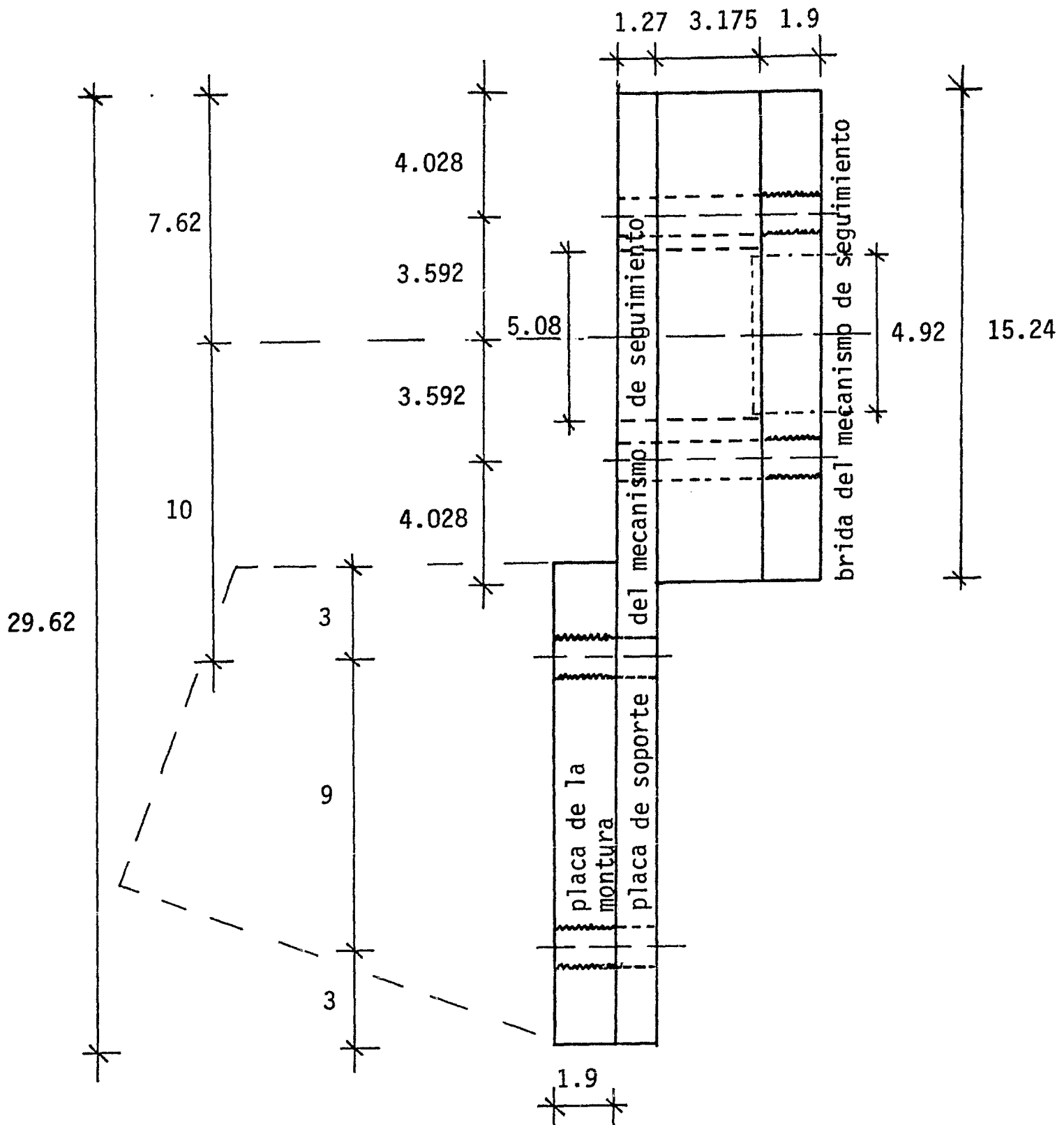
En las siguientes figuras se muestran los soportes del mecanismo de seguimiento, sus componentes y su distribución:

fig 5.2.1 Soportes del mecanismo de seguimiento

fig 5.2.1.1 Detalle de los soportes

fig 5.2.2 Desarme del mecanismo

fig 5.2.3 Componentes



acot. cm
 escala 1:2

fig 5.2.1 Placas de soporte del mecanismo de seguimiento

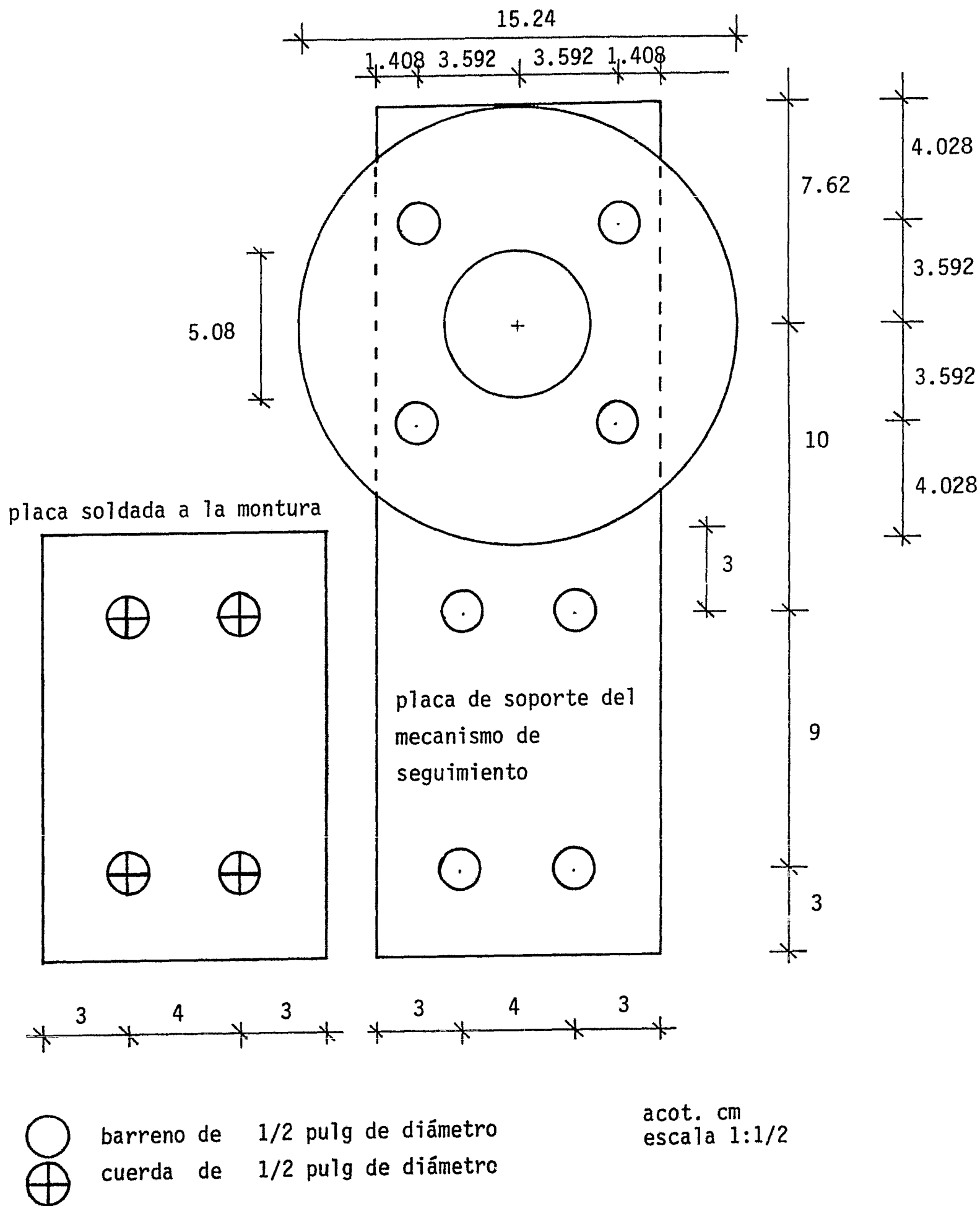


fig 5.2.1.1 Detalle de los soportes

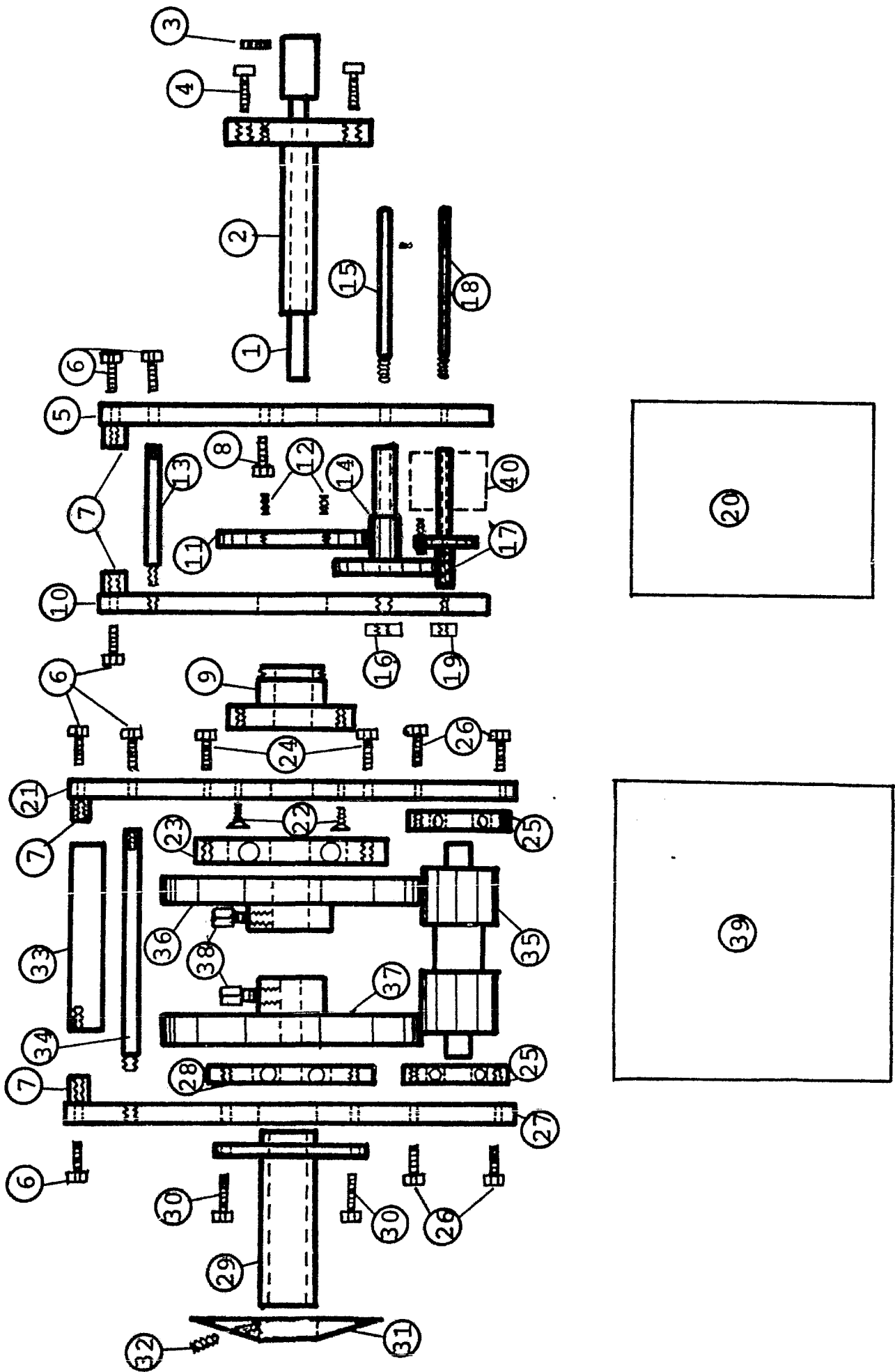


Fig 5.2.2 Desarme del mecanismo

No.	Descripción	Cantidad
1	Flecha de 1-1/4 pulg \emptyset_e x 11 pulg de long. con cople para la montura de 1-1/4 pulg \emptyset_i x 4-1/4 pulg de long.	1
2	Flecha de 1-15/16 pulg \emptyset_e x 7-3/4 pulg de long, soldada a su extremo una brida de 6 pulg \emptyset_e x 3/4 pulg de espesor	1
3	Prisioneros Allen de 1/4 pulg \emptyset que sujetan la flecha No.1 al eje de la montura	4
4	Tornillos de cabeza hexagonal de 1/2 pulg \emptyset para fijar el mecanismo a la montura	4
5	Placa circular de 10-7/8 pulg \emptyset_e , 1-15/16 pulg \emptyset_i x 1/4 pulg de espesor	1
6	Tornillos de 1/4 pulg \emptyset x 3/4 pulg de long. para fijar los soportes de las 2 cubiertas cilíndricas	12
7	Soportes de las cubiertas	12
8	Tornillo de 5/16 pulg \emptyset para fijar la placa No.5 a la brida	1
9	Bronce de 1-15/16 pulg \emptyset_i que atornilla al engrane No.11 y se fija a la placa No.21	1
10	Placa circular de 10-7/8 pulg \emptyset_e , 2-3/8 pulg \emptyset_i x 1/4 pulg de espesor	1
11	Engrane de 36 dientes, paso diametral de 6 dientes/pulg y 1/4 pulg de espesor	1
12	Prisioneros Allen de 1/8 pulg \emptyset x 1/4 pulg de long.	2
13	Separadores de las placas de 3/8 pulg \emptyset x 3-7/16 pulg de long.	2
14	Engrane de 6 dientes, paso 6 y engrane de 36 dientes paso 12 soldados	1
15	Eje de 3/8 pulg \emptyset x 4 pulg de long. de los engranes No.14	1
16	Tuerca de sujeción de 3/8 pulg del eje No.15	1
17	Engrane de 6 dientes, paso 12	1
18	Eje de 15/64 pulg x 4 pulg de long.	1
19	Tuerca de sujeción del eje No.15	1
20	Cubierta cilíndrica 10-7/8 pulg \emptyset de lámina de 1/16 pulg espesor	1
21	Placa circular de 11-1/4 pulg \emptyset_e , 2-1/8 pulg \emptyset_i x 1/4 pulg de espesor	1
22	Tornillos de 1/4 pulg \emptyset de cabeza plana x 3/4 pulg de long.	4
23	Balero y portabalero de 1-15/16 pulg \emptyset_i	1
24	Tornillos de 1/4 pulg \emptyset x 3/4 pulg de long.	4

No.	Descripción	Cantidad
25	Balero y portabalero de 3/4 pulg Øi	2
26	Tornillos de 1/4 pulg Ø x 3/4 pulg de long.	4
27	Placa circular de 11-1/4 pulg Øe, 1-1/2 pulg Øi	1
28	Balero y portabalero de 1-1/4 pulg Øi	1
29	Tubo de 1-7/8 pulg Øe x 6 pulg de long. con brida de 4 pulg Ø	1
	x 1/4 pulg de espesor soldada al tubo	1
30	Tornillos de 1/4 pulg Ø x 1 pulg de long.	4
31	Placa cónica de 3-15/16 pulg Øe, 1-7/8 pulg Øi x 3/8 pulg de espesor	1
32	Prisionero de 1/4 pulg Ø de la placa cónica	1
33	Contrapeso de 1-1/2 pulg Ø x 3-1/2 pulg de long.	1
34	Separadores de 3/8 pulg Ø x 4-5/8 pulg de long.	2
35	Engrane doble de 10 dientes, paso 6	1
36	Engrane de 39 dientes, paso 6	1
37	Engrane de 40 dientes, paso 6	1
38	Opresores de 3/8 pulg Ø x 3/4 pulg de long.	6
39	Cubierta cilíndrica de 11-1/4 pulg Ø de lámina de 1/16 pulg de espesor	1
40	Mecanismo de control de tiempo	1

5.3 Memoria fotográfica del sistema

En las fotografías de la sección de este número (5.3.) se ilustra la construcción del sistema de enfoque puntual discutido en este trabajo.



FIG 5.3.1 Vista de conjunto del captador concentrador

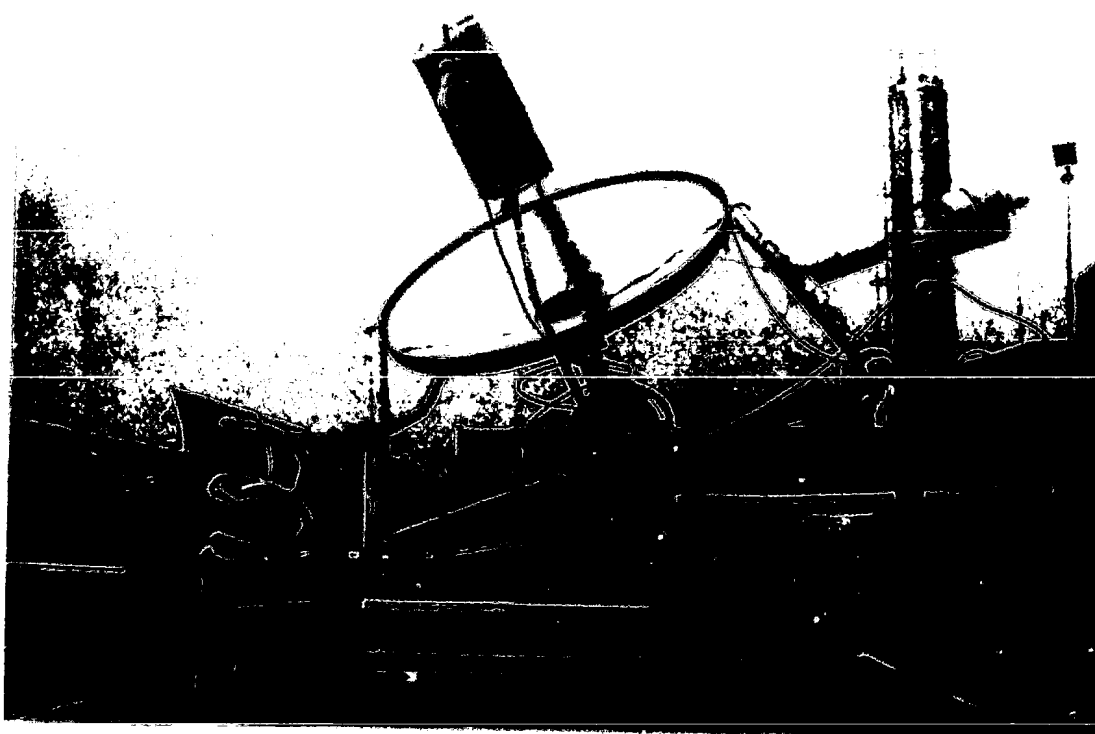


FIG 5.3.2 Localización del aparato experimental
en el Laboratorio

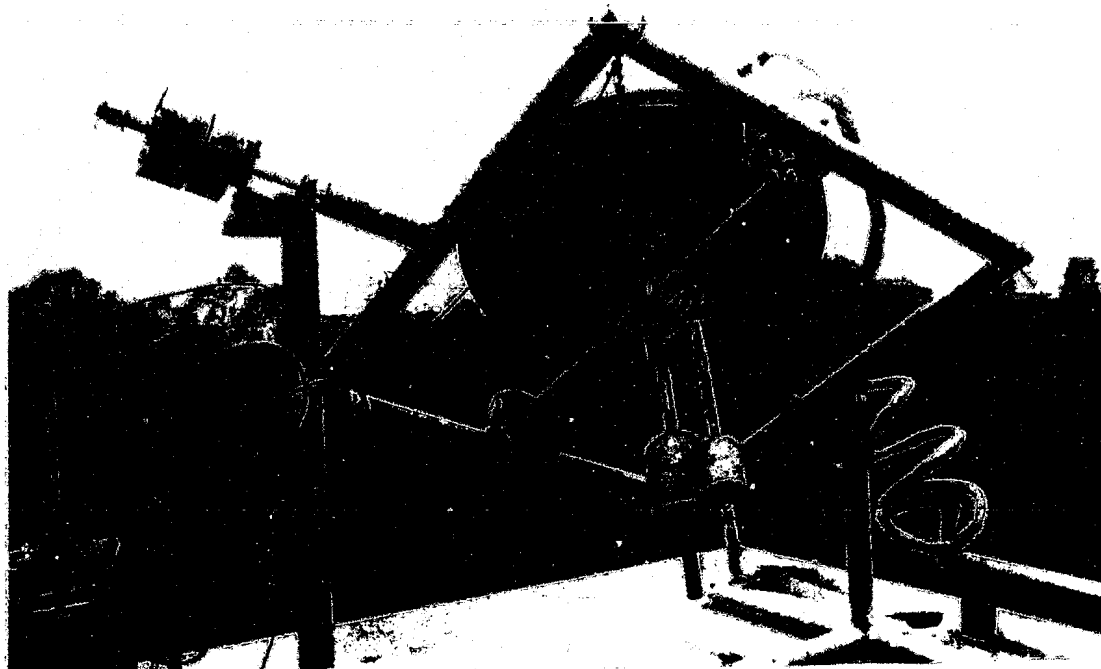


FIG 5.3.3 Vista posterior del espejo



FIG 5.3.4 Detalle del eje de la declinación con disco graduado.



FIG 5.3.5 Detalle del absorbedor



FIG 5.3.6 Detalle del espejo parabólico



FIG 5.3.7 Soporte y aislamiento del generador



FIG 5.3.8 Detalle del espejo

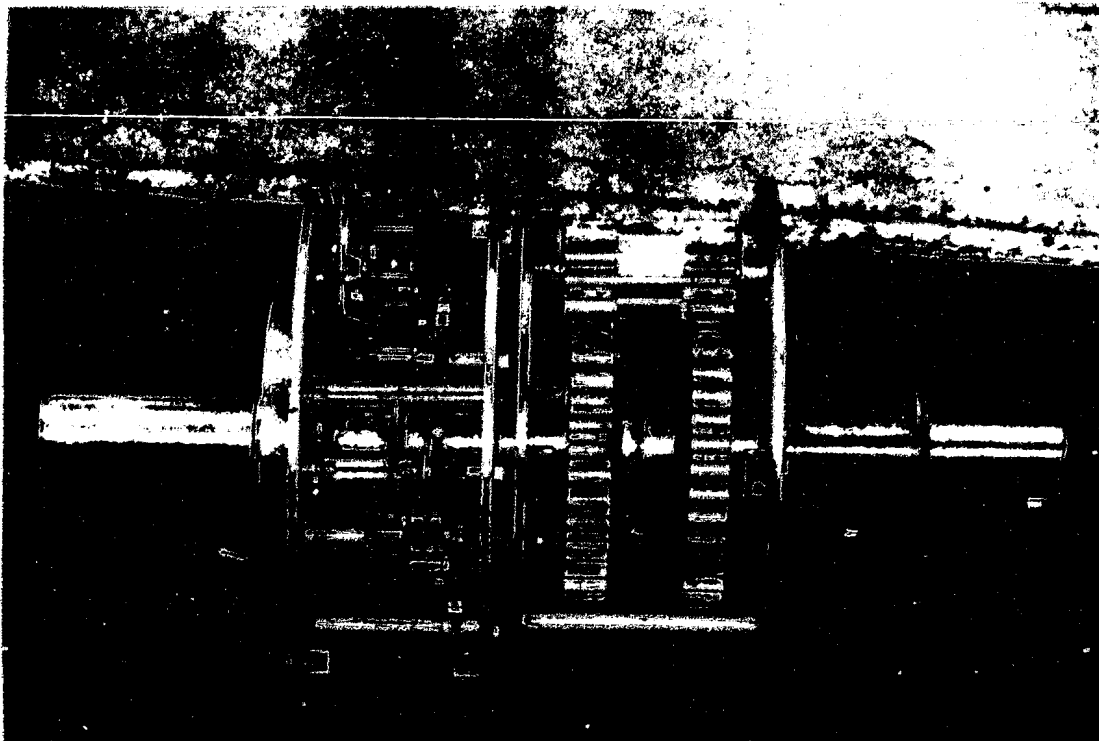


FIG 5.3.9 Vista general del mecanismo seguidor

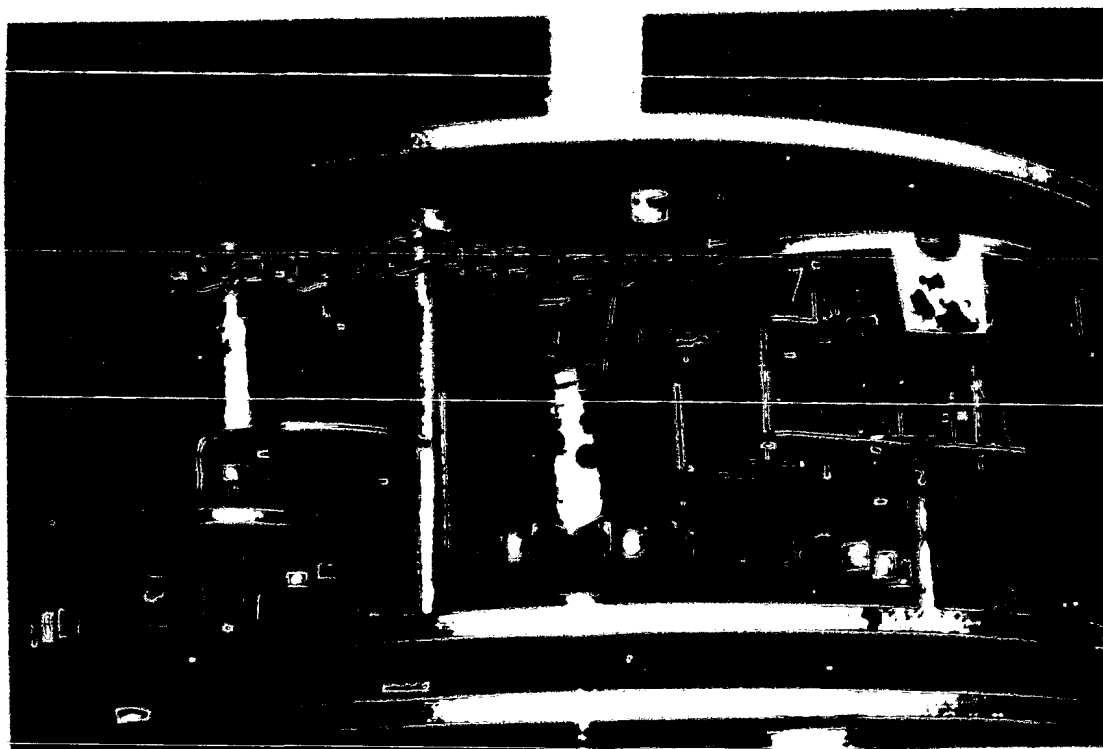


FIG 5.3.10 Detalle del mecanismo seguidor

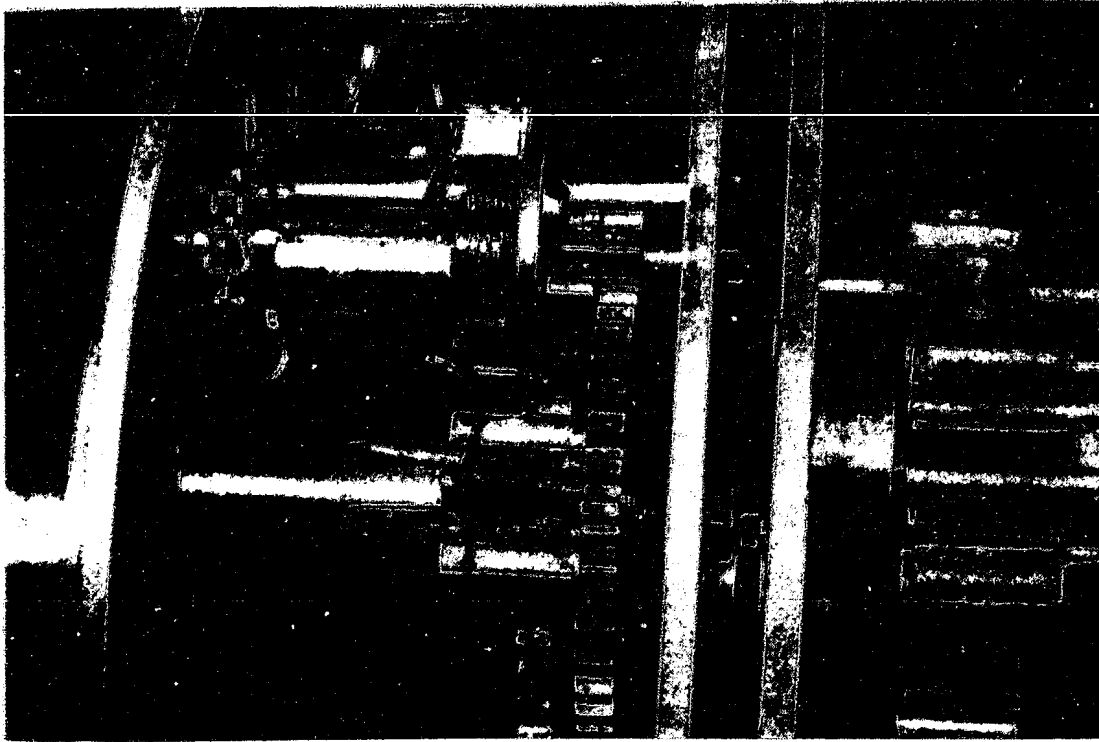


FIG 5.3.11 Detalle del sistema de control de tiempo

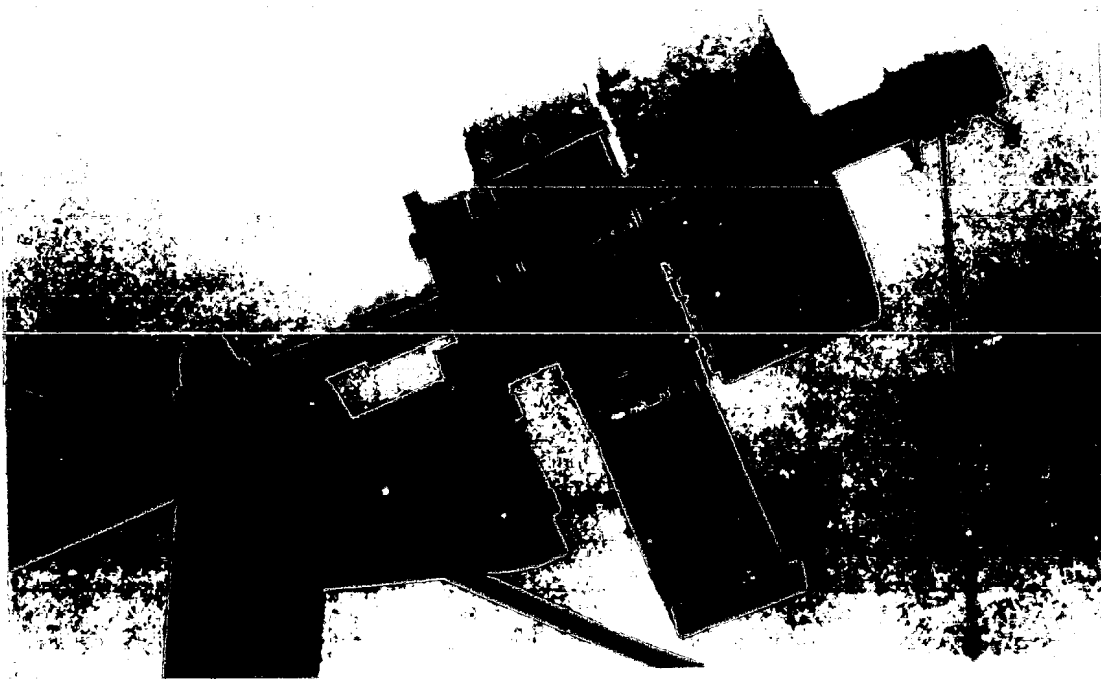


FIG 5.3.12 Acoplamiento del sistema de seguimiento

6. CONCLUSIONES

El Sol es la fuente de la energía más grande que existe en nuestro sistema solar. Recibimos del Sol su energía la cual nos llega de una forma prácticamente pura, no contamina y dependiendo del lugar geográfico en que nos encontremos se tendrán períodos de insolación mayores o menores, por lo cual es un reto para la humanidad el poder aprovecharla cada día de una forma más eficiente.

Por medio de un análisis vectorial es factible simular la trayectoria de los rayos del Sol en un lugar determinado, conociendo los parámetros geográficos y los que relacionan la posición del captador. Estos parámetros son representados por vectores y a su vez se relacionan mediante una expresión matemática con la cual quedan representados los ángulos en estudio. Con los datos obtenidos es posible hacer la selección del

tipo de montura que puede ser utilizada para obtener el máximo de energía que se puede aprovechar del Sol.

Para simplificar el seguimiento solar se seleccionó la montura ecuatorial puesto que con esta solo es necesario dar un ajuste diario a su ángulo de la declinación y el otro movimiento es un giro a velocidad angular constante que compensa al movimiento de rotación de la Tierra.

Existen dos opciones para obtener un espejo parabólico de concentración puntual. La primera opción sería la de disponer de un espejo cuya superficie reflejante sea de una sola pieza y la segunda consiste en armar la superficie reflejante con espejos fraccionados. En el caso que nos ocupa se seleccionó la segunda opción por disponer de una parábola de fibra de vidrio y solo fue necesario recubrirla. Para lograr lo anterior se diseñó un método para la colocación de espejos hexagonales regulares sobre la superficie parabólica.

El análisis térmico del sistema se resolvió mediante el uso de un método de convergencia lineal con el que fue posible obtener la solución numérica del sistema de ecuaciones que comprenden a este estudio. Debido a la complejidad para la solución de las ecuaciones anteriores se observó que los métodos convencionales de convergencia no satisfacían dicho sistema de ecuaciones por lo cual fue necesario diseñar el método de convergencia empleado, dado que de esta manera no es necesario obtener una ecuación general del sistema, sino que se trabaja con las ecuaciones correspondientes.

Para resumir el comportamiento del sistema térmico, la información obtenida se agrupó en seis gráficas que analizan los estados de líquido y vapor del agua; con la ayuda de estas es posible conocer resultados aproximados conociendo las condiciones de entrada sin la necesidad de recurrir a resolver el sistema de ecuaciones. Si los parámetros que se quieren analizar no se encuentran comprendidos dentro del rango de las gráficas o se desea obtener mayor información, entonces el sistema debe ser resuelto numéricamente con la ayuda de la computadora.

De los resultados obtenidos por la simulación térmica del sistema y para obtener un mayor aprovechamiento de la energía solar se observaron los siguientes puntos:

- Es importante dimensionar y conocer las características del espejo que se va a utilizar; el absorbedor solar que se utilice debe de corresponder al tamaño del espejo para que las pérdidas de calor del absorbedor sean las menores posibles y así se pueda aprovechar mejor la energía disponible del Sol.

Se observó que a medida que se reduce la superficie expuesta al ambiente sin aislar térmicamente, las pérdidas de energía por radiación y por convección disminuyen considerablemente y se dispone de mayor energía en el absorbedor.

- La parte restante del absorbedor es importante cubrirla con un material que lo aisle térmicamente para reducir sus respectivas pérdidas de calor. Estas fueron analizadas por convección, en donde se observó que el espesor del aislante y la velocidad de viento consideradas tie-

nen mucha importancia para el estudio de transferencia de calor, que en este caso se analiza como pérdidas de energía por lo cual es recomendable cubrir el absorbedor con el mayor aislamiento posible.

Por último, cabe destacar que el sistema analizado es útil para la producción de calor a temperaturas elevadas y que puede proponerse como alternativa tecnológica tanto para la generación de vapor con fines termoeléctricos como para la producción de calor para procesos industriales. Además, como el análisis presente demuestra, puede optarse tanto por la construcción de grandes espejos parabólicos, de tamaño adecuado a cada carga energética, como por la producción de muchas unidades de tamaño menor para satisfacer la misma carga con una solución modular. Se recomienda proseguir estos estudios mejorando la parte mecánica de los soportes, superando los problemas térmicos y en general reduciendo los costos del sistema solar.

BIBLIOGRAFIA GENERAL.

- (1) LUNDE, Peter J.
Solar Thermal Engineering. U. S. A. , John Willey and Sons, 1980.
- (2) KREIDER, Jan F. and Kreith, Frank
Solar Heating and Cooling. Washington, D. C., Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill, 1975.
- (3) KREITH, Frank
Principios de Transferencia de Calor. México, Herro Hnos., 1970.
- (4) DUFIE, John A. & Beckman, William A.
Solar Energy Thermal Processes. U.S.A., John Willey and Sons, 1974.
- (5) REYNOLDS, William C.
Termodinámica. España, McGraw-Hill, 1967.
- (6) VAN WYLEN, Gordon J. y Sonntag, Richard E.
Fundamentos de Termodinámica. México, Limusa-Willey, 1972.
- (7) SHAMES, Irving H.
La Mecánica de los Fluidos. México, McGraw-Hill, --- 1977.
- (8) ACUÑA Navarrete, Carlos A., Macgregor, Manuel J. y Rojas, Carlos
Modelo Experimental para la Transformación de Energía Solar en Energía Mecánica. México, Tesis Profesional, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 1981.
- (9) DORDELLY, Alejandro , Guerrero, Guillermo y Guerrero, Daniel
La Energía Solar y su Utilización en los Hornos Solares. México, Tesis Profesional, Universidad Iberoamericana, Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 1977.
- (10) SPIEGEL, Murray R.
Análisis Vectorial. Colombia, MacGraw-Hill, 1969.
- (11) SEELY y Ensign
Mecánica Analítica para Ingenieros. México, Unión - Tipográfica Editorial Hispano Americana, 1968.
- (12) SHANLEY, F.R.
Mecánica de Materiales. México, McGraw-Hill, 1977.

- (13) SHIGLEY, Joseph E.
Análisis Cinemático de Mecanismos. Madrid, Ediciones del Castillo, McGraw-Hill, 1970, 2a. edición.
- (14) GUILLET
Cinemática de las Máquinas. México, Compañía Editorial Continental S. A., 1977.
- (15) BLACK, Paul H. & Adams, O. Eugene Jr.
Machine Design. Tokyo, McGraw-Hill, 1968.
- (16) DEGANI, Meir H.
Astronomía Simplificada. México, Compañía General de Ediciones, S. A., 1977, 3a. edición.
- (17) VIVO, Jorge A.
Geografía Física. México, Editorial Herrero, 1976.
- (18) PARDO, Federico y Sanchez Basurto, Raúl
Geografía Física y Humana. México, Editorial Progreso, 1968, 4a. edición.
- (19) ANUARIO del Observatorio Astronómico Nacional para el --
Año de 1972. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Astronomía, 1971.
- (20) GIECK, Kurt
Manual de Fórmulas Técnicas. México, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., 1975, 16a. edición.