



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

## INSTRUMENTACION EN METEOROLOGIA

# T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

Jorge Gómez Juárez

Y

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE ;



MEXICO, D. F.

1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **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 está 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.

# INDICE GENERAL

## PRESENTACION

P-1

### PRIMER TEMA: HISTORIA DE LA METEOROLOGIA

#### INTRODUCCION: ORIGENES DE LA METEOROLOGIA

1

Estructura y composición de la atmósfera

4

Fenómenos meteorológicos

5

Fundamentos científicos de la Meteorología

7

Meteorología instrumental y aplicada

9

#### CAPITULO I: EL BAROMETRO

11

Barómetros de uno o dos líquidos

13

Barómetro de tres líquidos

13

Barómetro de rueda o volante

14

Barómetro diagonal

14

Barómetro de agua

14

Barómetro de gas

15

Barómetros aneroides

15

Barómetro marino de Zeiher

15

Barómetro aneroides de Vidie

16

Barómetro aneroides de E. J. Dent

16

#### CAPITULO II: TERMOMETROS

19

Primeros instrumentos

20

Los termómetros de "líquido en vidrio"

21

Siglo XVII

22

Siglo XVIII

24

Los termómetros centígrados	26
Termómetros de máximas y mínimas	28
Termómetros de deformación	31
<b>CAPITULO III: PRECIPITACION PLUVIAL</b>	<b>33</b>
El vectoplúviómetro	38
Pluviómetros registradores	39
Pluviómetros de flotador	40
Pluviómetros de balanza (excepto de "recipiente volcante")	43
Pluviómetros de recipiente volcante	44
Evaporímetro	48
<b>CAPITULO IV: HIGROMETROS</b>	<b>51</b>
Higrómetros de condensación	56
Higrómetros que dependen de la evaporación en una superficie húmeda (Psicrómetros)	59
Otros instrumentos	61
<b>CAPITULO V: VELOCIDAD Y DIRECCION DEL VIENTO</b>	<b>63</b>
Veletas	63
Anemómetros	67
Anemómetros de plato oscilante	68
Anemómetros de plato normal	69
Anemómetros de tubo de presión	71
Anemómetros de rotación con eje horizontal	74
Anemómetros de rotación con ejes verticales	76
Anemómetros de rotación restringida ("retenidos")	82

INDICE

---

<b>CAPITULO VI: INSTRUMENTOS PARA MEDIR LA DURACION SOLAR</b>	<b>85</b>
Grabadores fotográficos de los rayos solares	85
Los que dejan una señal en la superficie por la luz incidida	87
Los de termómetro diferencial	87
<b>CAPITULO VII: ANTECEDENTES EN MEDICIONES DE VELOCIDAD, DIRECCION Y ALTURA DE LAS NUBES Y EL MOVIMIENTO DE LOS ALTOS VIENTOS</b>	<b>91</b>
<b>CAPITULO VIII: INSTRUMENTOS DE REGISTRO MULTIPLE: METEOROGRAFOS</b>	<b>97</b>
<b>CAPITULO IX: SONDEOS SIN TELEMETRIA EN ALTURAS ELEVADAS</b>	<b>105</b>
Instrumentos para sondeo con la intervención del hombre	105
Instrumentos para sondeo sin la intervención del hombre (cometas y globos sonda)	107
<b>CAPITULO X: TELEMETEOROGRAFIA Y RADIOSONDAS</b>	<b>111</b>
Meteorógrafos de superficie	111
Intentos en telemetría desde cometas	116
El radiometeorógrafo o radiosonda	117

**SEGUNDO TEMA: EL ESTADO DEL ARTE**

<b>CAPITULO XI: ESTACIONES METEOROLOGICAS</b>	<b>125</b>
Generalidades sobre el instrumental meteorológico en el presente	128
Mediciones de presión atmosférica	129
Barógrafo	131
Mediciones de temperatura	131
Mediciones de humedad (psicrometría)	133
Higrómetro	133
Psicrómetro	134
Cantidad de lluvia (pluviometría)	134
Evaporación	135
Viento	138
Mediciones de radiación	139
Aparatos compuestos	143
<b>CAPITULO XII: ANTECEDENTES DEL USO DEL RADAR     PARA FINES METEOROLOGICOS</b>	<b>145</b>
Generalidades	145
Operación básica	149
Métodos de visualización	151
Tipos de radares	154
Radares convencionales	154
Radares de efecto Doppler	156
Otros radares	160

---

<b>CAPITULO XIII: SATELITES ARTIFICIALES</b>	<b>165</b>
<b>Los primeros: la serie TIROS</b>	<b>169</b>
La estructura	170
Unidad de potencia	172
Estabilización y control	173
Dispositivos de comandos y relojes	177
Señales de rastreo y telemetría de mantenimiento	179
Cámaras de televisión y grabadores en cinta	180
Sensores de radiación	182
Transmisores y antenas	185
Estaciones y procedimientos de adquisición de datos	185
<b>Segunda generación: la serie Nimbus</b>	<b>188</b>
La estructura	189
Subsistemas de estabilización y de controles	191
Subsistema de potencia	193
Subsistema de comando-reloj	193
Subsistema de telemetría de mantenimiento	194
Subsistemas de captación de imágenes de video	195
Sistema de cámaras VIDICON avanzadas	196
Subsistema de transmisión automática de imágenes	197
Radiómetro infrarrojo de alta resolución	198
Radiómetro infrarrojo de resolución media	198
Estaciones de comandos y adquisición de datos (estaciones CDA)	199

Después de Nimbus	200
ESSA	200
Cosmos-Meteor	201
Meteor-1	202
Serie ITOS/NOAA	202
EOLE FR-2	204
Serie SMS/GOES	204
Serie Meteor-2	205
Serie Meteosat	207
Serie GMS/Himawari	209
Serie TIROS-N/NOAA 6 al 9	210
Serie GOES 4 al 6	211
Serie INSAT	212
ERBS	212
Serie GOES I al M	213
UARS	214

**CAPITULO XIV: GENERALIDADES SOBRE EL**

**"ESTADO DEL ARTE";**

<b>OTROS INSTRUMENTOS</b>	<b>217</b>
Sistemas de radiosondeo	217
Instrumento de sondeo atmosférico de bajo nivel (Yo-Yo)	218
Sensores de presión para uso en radiosondeo	219
Ceilómetro	220
Sistemas de sondeo radio acústico	224
El SODAR	225
Sistemas integrados de observación meteorológica	227

INDICE

---

Sistema integrado de sondeo	227
Sistema de instrumentos para medición de radiación UV y variables troposféricas relevantes	229
Elementos en desarrollo para uso en sistemas meteorológicos	232
Instrumentos mejorados y sistemas de adquisición de datos para boyas y barcos	232
Instrumentos en desarrollo para inclusión en sistemas de observación automatizados de superficie	236
Profundidad de nieve	236
Sensor de agua equivalente de precipitación congelada	237
Interruptor de luz de sol	238
Detector de granizadas	239
Sensor infrarrojo de agua/CO <sub>2</sub> con fibra óptica	239
Termómetro de cristal de cuarzo con fibra óptica	241
Higrómetros de respuesta rápida (para medidas de fluctuaciones de humedad)	242
Sonda láser de viento atmosférico (LAWS)	243
El perfilador atmosférico para geoplataforma (GAP)	247

**CAPITULO XV: APLICACIONES DE LA METEOROLOGIA**

Aplicaciones	251
--------------	-----

**TERCER TEMA: METEOROLOGIA EN MEXICO**

<b>CAPITULO XVI: LA METEOROLOGIA EN MEXICO</b>	<b>255</b>
El Servicio Meteorológico Nacional	256
La infraestructura del SMN: SNOM	258
Infraestructura: SNTM	259
Centro Nacional de Previsión del tiempo	260
Banco Nacional de Datos Climatológicos	261
Programa de modernización del	
Servicio Meteorológico Nacional	262
Avances hasta 1989	262
Continuación y ampliación de la	
modernización del SMN	263
Especificaciones de las estaciones	
meteorológicas automáticas para la red	
sinóptica básica de superficie del SMN	265
Características de los equipos de observación	
para la red de radiosondeo	269
Especificaciones para las estaciones	
climatológicas automáticas para la	
red climatológica ordinaria del SMN	271
Especificaciones de los equipos de radar	
meteorológico	274

INDICE

---

**APENDICES**

**Apéndice A: Alcance de los fenómenos  
meteorológicos** **AP-1**

**Apéndice B: Notas sobre la predicción del tiempo** **AP-4**

**Apéndice C: CLICOM** **AP-6**

**RELACION DE ILUSTRACIONES**

**Relación de Ilustraciones** **ilus - 1**

**BIBLIOGRAFIA**

**Bibliografía** **Bib - 1**

## PRESENTACION

La elección de un tema de tesis presenta para los egresados de Electrónica y de Computación, con harta frecuencia, problemas especiales de ubicación y de reconocimiento. Y si se tiene el empeño de conjuntar en un solo trabajo los esfuerzos de personas de ambas áreas, la dificultad se multiplica por el número de participantes y se redondea al siguiente entero. Es decir, que cuando los autores (nosotros) decidimos que queríamos trabajar juntos, el primer obstáculo que debimos vencer fue la coincidencia en el interés y en la experiencia de cada uno. Ante la imposibilidad de ponernos de acuerdo, decidimos dejar por la paz la experiencia común y meternos en un lío mayor: abordar un tema acerca del cual ninguno de los dos tuviera la más remota idea.

Una vez puestos de acuerdo al respecto, la elección del tema en particular fue mucho más simple y casi natural. Habiendo conocido con anterioridad a Gloria (que sería después la encargada de dirigirnos, orientarnos, encauzarnos, impulsarnos y, a veces, exasperarnos), surgió en una plática lo infructuoso de nuestra búsqueda. Por coincidencia, ella había estado durante cierto tiempo interesada en desarrollar una investigación sobre Instrumentación en Meteorología, de manera que, al coincidir dos necesidades con tanta precisión, el acuerdo fue muy rápido, y el resultado del mismo es el motivo de esta presentación.

Sorteado el problema inicial y decididos a trabajar con entusiasmo y dedicación, nos topamos con el segundo obstáculo importante: lo que supusimos en principio (honestamente) que sería una mera labor de recopilación, se convirtió en unos cuantos días en una búsqueda frenética de biblioteca en biblioteca y de instituto en instituto, sacándole conversación a burócratas de edad avanzada (y por tanto aferrados a sistemas anticuados de bibliotecología y archivonomía), a bibliotecarios(as) malhumorados y susceptibles y a verdaderos apóstoles de la investigación bibliográfica (al menos encontramos a uno -dentro de la UNAM, por cierto-).

En efecto, resultó que el tema elegido, sin ser "Terra Incognita" por completo, sí era una especie de Antártida, en donde hay que saber por dónde se puede caminar con seguridad y dónde se corre el riesgo de darse un remojón de agua helada (lo que por cierto nos pasó más de una vez).

Y aquí entra la justificación del trabajo que realizamos: la recopilación, en términos accesibles y en un conjunto único de información muy interrelacionada conceptualmente y absolutamente dispersa prácticamente representa, como los lectores (esperamos que haya al menos seis) podrán comprobar, una labor original y de interés que trasciende lo individual. Las dificultades que encontramos durante nuestra investigación nos convencieron de la necesidad real de un documento en el que se englobaran todos esos elementos, si no con la intención de agotar las posibilidades, sí con la de representar un primer acercamiento práctico y una fuente de referencias útiles para quienes se interesen por el tema. Por ejemplo, a nivel Facultad de Ingeniería, el trabajo presentado puede resultar de utilidad, como material de referencia, en materias como Introducción a la Ingeniería, Medición e Instrumentación, Instrumentación y Control, Control Analógico, Microprocesadores y en general en todas aquellas en que se requieran conceptos generales de instrumentación y aplicaciones específicas de dichos conceptos.

En el exterior, por otro lado, se requiere, aunque sea como inclusión al acervo, una obra de consulta con estas características en el Servicio Meteorológico Nacional, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, en instituciones como la Comisión Nacional del Agua, la Secretaría de la Defensa Nacional o la Secretaría de Marina.

Como nota especial, por cierto, creemos conveniente incluir aquí las gracias muy expresivas a todas las instituciones y personas que, de una forma u otra, nos proporcionaron información que entraría a formar parte de este trabajo: la Comisión Nacional del Agua, a

través del Servicio Meteorológico Nacional; el Instituto de Geofísica a través del departamento de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México; el Ingeniero Pablo Ortiz, Coordinador de Proyectos de Enterprise Electronics Corporation; y muy especialmente el Ingeniero Jorge Romero Centeno, que tanta y tan interesante información puso a nuestro alcance. Dado que este trabajo adquirió la forma que tiene en buena medida gracias a sus colaboraciones, es de justicia reconocerlas especialmente.

En términos generales, nuestra tesis presenta, por un lado, un esbozo histórico de la instrumentación meteorológica, en el que se descubren (al menos nosotros descubrimos) principios y personalidades inesperados: mecánica, hidrostática, mecánica de fluidos y termodinámica reciben aplicaciones ingeniosísimas que, quizá malacostumbrada a la lógica eléctrica y digital, la gente de nuestra época difícilmente podría concebir.

Así, en los capítulos I al X se desarrolla con cierta amplitud la historia técnica de cada uno de los instrumentos meteorológicos elementales y de sus primeras aplicaciones y combinaciones en aparatos compuestos. Se abarca, en general, desde el s. IV hasta mediados de los 1930's, con la siguiente distribución:

Capítulo I	:	Barometría.
Capítulo II	:	Termometría.
Capítulo III	:	Pluviometría.
Capítulo IV	:	Higrometría.
Capítulo V	:	Anemometría.
Capítulo VI	:	Actinometría.
Capítulo VII	:	Medición de altura de nubes.
Capítulo VIII	:	Primeros instrumentos compuestos.
Capítulo IX	:	Sondeos de altura sin telemetría.
Capítulo X	:	Radiosondeo.

Por otro lado, se presentan con sencillez (hasta donde ha sido posible), los principios y técnicas de operación de los instrumentos modernos, tanto los relativamente tradicionales como las innovaciones más recientes a cuya información tuvimos acceso. En esta parte, lamentablemente, la ilustración de los temas tratados es mucho menos abundante que en la anterior, porque en primer lugar los informes de investigación actuales tienden a ser más descriptivos que gráficos, y porque, en segundo lugar, cuando se presentan imágenes éstas resultan, con demasiada frecuencia, poco ilustrativas o poco discernibles. La distribución es:

Capítulo XI :	Estaciones Meteorológicas.
Capítulo XII :	Radars (meteorológicos).
Capítulo XIII :	Satélites artificiales.
Capítulo XIV :	Otros instrumentos.
Capítulo XV :	Aplicaciones.

Finalmente, y una vez establecido un marco global de referencia, la atención se dirige específicamente a nuestro país: la Comisión Nacional del Agua y el Servicio Meteorológico Nacional con algún detalle en cuanto a su conformación y sus responsabilidades y sus planes de modernización.

Capítulo XVI :	Meteorología en México.
----------------	-------------------------

A grandes rasgos, esa es la estructura y fue la meta de nuestro trabajo de todos estos meses (muchos, por cierto). Algunos temas fueron tocados con menos precisión de lo que hubiéramos deseado, porque los medios de que dispusimos eran menores que los que hubiéramos deseado, pero el resultado global nos parece bastante bueno. Tanto, que lo estamos presentando como trabajo de tesis. Eso es confianza.

## **PRIMER TEMA: HISTORIA DE LA METEOROLOGIA**

What is it moulds the life of man?

The weather.

What makes some black and others tan?

The weather.

What makes the Zulu live in trees  
and Congo natives dress in leaves  
while others go in furs and freeze?

The weather.

## INTRODUCCION: ORIGENES DE LA METEOROLOGIA

Los fenómenos atmosféricos y meteorológicos representaron misterios para el hombre desde que éste se hizo consciente de su entorno. Muestra de ello son los panteones (es decir, las teologías -de PAN y THEOS-) llenos de dioses del trueno y de la lluvia. Es de suponer que pasaron muchos siglos antes de que se relacionara el comportamiento del "cielo" con los ciclos de la tierra, como la circulación de aguas o las temporadas de lluvias y de sequía.

Con todo, la influencia del clima sobre la historia del hombre parece despreciable mirando desde lejos. Después de todo, el ser humano se ha adaptado a casi cualesquiera condiciones climáticas y ha medrado. Sin embargo, vale pensar que el esfuerzo necesario para no helarse o insolarse, las dificultades de entrada a regiones donde debe convivirse con mosquitos portadores de virus diversos o a desiertos en que es obligado establecerse alrededor de pozos u ojos de agua, forzaron a los hombres primitivos a dar a sus sociedades características específicas. Por supuesto, el esfuerzo de adaptación a un clima hostil ha sido parte importante en el desarrollo cultural. Por ejemplo, el desarrollo del hombre del Pleistoceno estuvo marcado por dos logros fundamentales en la adaptación al clima: primero, el fuego permitió al Homo Erectus mudarse de las zonas subtropicales donde apareció a las zonas templadas y, de paso, le permitió sobrevivir a los rigores de la Tercera Glaciación. Luego, la ropa cosida y la capacidad para construir refugios llevaron al Homo Sapiens a las zonas circumpolares e, incluso, a las polares, permitiéndole aprovechar la tierra de caza virgen que era América.

El Neolítico no tuvo avances comparables en la adaptación al clima, pero sí los presentó, y grandes, en el aprovechamiento de sus variaciones. La capacidad del ser humano creció y, por tanto, la magnitud de sus logros se hizo mayor. En algún período el objetivo dejó de ser calentar los cinco centímetros cercanos a la piel, o los pocos metros cúbicos de una cueva o un refugio artificial, y entonces se adquirió la capacidad para hacer florecer desiertos y, con ellos, a las civilizaciones asociadas. Ahora se trata de la irrigación de kilómetros cuadrados de tierras, primero en Jericó y sus alrededores, en el Valle de Mesopotamia, el Valle del Indo y Egipto. En síntesis, el conocimiento y aprovechamiento de los distintos climas constituyó parte importante en el desarrollo de las culturas originarias tanto de Oriente como de Occidente.

La Astronomía y las Matemáticas se desarrollaron paralelamente a la necesidad de conocer y aprovechar el clima. Otra vez, claro, se debe hacer referencia a Egipto y a Mesopotamia, sin olvidar los calendarios (que incluían fenómenos atmosféricos) sorprendentemente precisos de las culturas asiáticas y americanas.

Muchas investigaciones arqueológicas dan testimonio de la observación de los fenómenos meteorológicos en distintos estadios históricos. Las interpretaciones mágicas o místicas, como podría esperarse, predominan. Un repaso breve sobre algunos conceptos antiguos alrededor de la Meteorología es el siguiente:

- En Mesopotamia se atribuían cualidades proféticas al trueno y a la forma de las nubes, cuyas características llegaban a modificar decisiones personales e, incluso, colectivas.
- En Grecia llegaron a conseguirse notables aciertos, si bien estuvieron acompañados de errores igualmente importantes. Por una parte, se tenían detalladas descripciones de hechos (relaciones entre viento y temperatura, formación de nubes, lluvias y tormentas, etc.), y por la otra interpretaciones fantásticas (de fantasía) de fenómenos considerados erróneamente meteorológicos, como los meteoritos y los cometas. A pesar de todo, se establecieron principios concretos en que se apoyaron los eruditos de varios siglos, hasta bien entrado el Medioevo. Tales principios, que Aristóteles fue el primero en enunciar, comprendían el estudio de todos los fenómenos naturales del mundo sublunar (por debajo de la esfera que ocupaba la Luna) y se entendían como una rama de la Física.

Los hechos que esta Meteorología aristotélica estudiaba se suponían asociados a las combinaciones impuras de los cuatro elementos (tierra, aire, mar y fuego) reconocidos por su autor. Estuvo, además, asociada con la Cosmología, la Astronomía y, de paso, con la filosofía platónica de la perfección de las ideas.

- El Medioevo conservó la mezcla de observación rigurosa y conclusión desafortunada que se presentó en la cultura griega. Se manejaron teorías extrañas sobre la composición del éter y la doble circulación de las aguas en la superficie del planeta.

- A partir del s. XVI (Renacimiento) se reelaboraron las doctrinas científicas en general, y las meteorológicas en particular. La meteorología se hizo eminentemente empírica y los fenómenos naturales se manifestaron más mensurables que pensables. Como un producto de esta nueva concepción, aparecieron disciplinas e instrumentos de medición que fueron los primeros síntomas de la moderna Meteorología. Por ejemplo, aparecieron por entonces la Calorimetría (precursora de la Termodinámica) y los instrumentos clásicos: el termómetro y el barómetro. El desarrollo de las disciplinas asociadas con la termometría llevó al establecimiento de escalas de temperaturas con diferentes criterios de origen y de rangos (Celsius, Fahrenheit, Réaumur). Ya en el s. XIX apareció la escala que se adoptaría después como norma universal: la definida por el británico William Kelvin.
- El enriquecimiento progresivo de las técnicas instrumentales, junto con el conocimiento en aumento de la geografía mundial, apoyaron el desarrollo de los sistemas de inspección de fenómenos atmosféricos. Durante el s. XIX, con el dominio imperial europeo sobre tierras casi desconocidas, se instalaron muchas estaciones meteorológicas, dotadas de rudimentarios instrumentos de medición a lo largo y a lo ancho de Europa, América y distintas zonas asiáticas, en especial en Japón.
- Los primeros aparatos que ascendieron en el aire (globos y aerostatos diversos) permitieron un notable avance en el estudio de la atmósfera y sus componentes, pero la Meteorología alcanzó casi el nivel de ciencia sólo a principios del s. XX. Anteriormente se había limitado a interpretar y describir fenómenos, sin lograr criterios satisfactorios de predicción que, extraídos de la práctica y la observación, sintetizaran aceptablemente los mecanismos de evolución de los estados atmosféricos. Con el siglo XX aparecieron también los primeros mapas y modelos meteorológicos con afán de síntesis y base de los trabajos de estudio y predicción. La extensión de éstos, apoyados en los grandes descubrimientos de la Física, y en particular de la Termodinámica y la Mecánica de Gases, permitió, por primera vez, el estudio a gran escala sobre el comportamiento y la estructura de la atmósfera.
- El importante desarrollo de la aviación en la segunda mitad de este siglo facilitó la toma de imágenes fotográficas desde gran altura y, además, con la capacidad de captar variaciones térmicas. La prolongación evidente de este esfuerzo es el lanzamiento de satélites artificiales de investigación meteorológica; satélites de órbita polar o ecuatorial, equipados con dispositivos de radiometría que abarcan el espectro electromagnético visible y el infrarrojo a fin de efectuar, de día o de noche, mediciones de las temperaturas terrestre y marina y de la altura de las masas nubosas.

Desde el punto de vista definitorio, por otro lado, es en este siglo que se perfeccionan los fundamentos teóricos de la Meteorología, que se establece como una especialidad independiente, con sus propios recursos y métodos dentro del

marco de las ciencias físicas. En sus modernas hipótesis de trabajo figuran los postulados de la Mecánica de Fluidos, la Termodinámica, la Química y las Matemáticas y la Mecánica Aleatorias.

## ESTRUCTURA Y COMPOSICION DE LA ATMOSFERA

La atmósfera de nuestro planeta, formada hace muchos millones de años, constituye la característica de la Tierra que ha permitido que la vida exista tal como la conocemos. Su formación se debió a la actividad volcánica típica de esas eras, que arrojaba constantemente a la superficie anhídrido carbónico, vapor de agua, amoníaco desprendido durante la formación de metano y otros gases que se encontraban en depósitos subterráneos o que se formaban al reaccionar unos elementos con otros. Del vapor de agua se desprendieron luego Hidrógeno y Oxígeno, aunque la principal aportación de éste la dieron los primeros vegetales que aparecieron en el planeta: las algas marinas.

Cómo envolvente gaseosa de la Tierra, la atmósfera presenta regiones distintas entre sí por su composición química y sus características físicas. Según el criterio utilizado para el estudio, puede hablarse de distintos conjuntos de capas atmosféricas. Así, de acuerdo a sus características físicas, se habla de:

- Troposfera, que se extiende desde el nivel del suelo hasta los 30 km de altitud. En ella se producen la mayor parte de los fenómenos meteorológicos de interés. La temperatura disminuye de modo aproximadamente constante desde la superficie hasta su capa superior, conocida como Tropopausa.
- Estratosfera, que tiene un espesor aproximado de 25 km a partir de la Tropopausa y cuya característica primordial es la temperatura constante en toda su extensión.
- Mesosfera, que limita con las capas vecinas a través de zonas de transición llamadas, la inferior, Estratopausa, y la superior, Mesopausa. Es de escaso interés porque en ella no se dan fenómenos meteorológicos importantes. Su característica remarcable es el inicial aumento y posterior disminución de la temperatura en su interior. Los estratos superiores de la atmósfera en esta clasificación son la Termosfera y la Exosfera, que reciben toda la fuerza de la radiación solar y que, por lo mismo, presentan un incremento de temperatura proporcional a la altitud.

Otra clasificación interesante de las capas atmosféricas es la que se refiere a tres regiones fundamentales para la vida en la Tierra: la Biosfera, situada en las regiones más bajas de la Troposfera y donde la concentración de aire respirable rico en oxígeno permite el desarrollo de especies vivas; la Ionosfera, en la que se producen importantes efectos de ionización, se localiza en zonas de la Mesosfera y la Termosfera, donde la fuerte radiación solar activa el intercambio de electrones que, por otro lado, actúa filtrando los extremos más energéticos de la misma radiación; y la Ozonosfera, distribuida en zonas de la Troposfera, la Estratosfera y la Mesosfera y cuya peculiar composición de oxígeno triatómico (ozono) protege la superficie terrestre contra la radiación ultravioleta del Sol.

Desde el punto de vista enteramente químico existe todavía una división distinta de la atmósfera, la que comprende entonces tres zonas: la Exosfera, con una extremada rarefacción motivada por el escape de sus gases al espacio exterior; la Heterosfera, compuesta primordialmente por gases ligeros (helio, nitrógeno e hidrógeno) y que se localiza por encima de los 100 km de altitud; y la Homosfera, por debajo de ese límite y la mayor parte de cuyos componentes se distribuyen de modo aproximadamente constante. Con todo, la Troposfera, que está de lleno dentro de la Homosfera, no tiene una distribución de elementos tan constante como cabría esperar, porque aunque el aire contiene alrededor de 80% de nitrógeno y 20% de oxígeno, aparte de trazas de argón y otros gases nobles, en función de la altura se observan también proporciones mínimas de combinaciones como vapor de agua, bióxido de nitrógeno, bióxido de carbono, azufre y ozono. Por supuesto, la actividad industrial ha modificado perceptible y peligrosamente esas proporciones, sobre todo las de sustancias carbonadas, sulfurosas y halogenadas. Para terminar, se perciben también cantidades ínfimas de partículas sólidas y líquidas.

## FENOMENOS METEOROLOGICOS

Como se anotó al principio, los fenómenos meteorológicos han influido siempre en la actividad de las formas de vida en la Tierra y, por supuesto, del ser humano. La intensidad de acontecimientos como la lluvia, la nieve y el granizo determinaban si éstos eran beneficiosos o perjudiciales para las distintas sociedades. Manifestaciones como el rayo y el trueno asociados a las tormentas y a los vientos, de velocidades y direcciones variables pero que presentan

tal vez alguna periodicidad, fueron objeto de estudio detenido por parte de científicos y filósofos antiguos.

La Meteorología moderna se fundamenta en la observación sistemática de estos fenómenos, en los que se terminó por reconocer una relación de efecto terminal bajo ciertas causas de actuación que obedecen en conjunto a las leyes generales de la Física. Si bien la constitución orográfica, la condición de litoral marino y otras características locales son elementos de importancia en la aparición de fenómenos como nubes, vientos y lluvias, el estado actual de la Meteorología permite prever comportamientos de la masa atmosférica en su conjunto a partir de los postulados más generales de la Termodinámica, la Química, la Mecánica de Fluidos y la Gravitación.

La energía que se requiere para que haya movimiento en la capa gaseosa de la Tierra viene, en su mayor parte, de la radiación solar. La absorción ordinaria de ella en los distintos estratos de la atmósfera origina las variaciones de temperatura que producen los grandes desplazamientos de masa de aire que provocan la mayor parte de los fenómenos meteorológicos a gran escala. Más claramente: el aire caliente se expande y, al no variar su masa, su densidad disminuye, de modo que tiende a "flotar" sobre el aire frío, más denso, que está a mayor altitud. Este desplazamiento obliga a masas de aire frío a ocupar el lugar de la masa flotante. Como el fenómeno es claramente cíclico, se presenta un fenómeno de convección que origina los llamados ANTICICLONES (o zonas de alta presión que contienen aire ascendente) y las BORRASCAS (o CICLONES, que con presiones menores circulan en las capas superficiales y originan inestabilidad atmosférica). La sucesión de tales efectos, superpuestos a los derivados de las condiciones geográficas locales, establece regularidades de comportamiento que, a posteriori, terminan conformando el clima de la región.

Entre las manifestaciones más frecuentes originadas por las anteriores están la formación de nubes y las precipitaciones atmosféricas. En ambas es importante la presencia en el aire de vapor de agua, cuyas partículas son el componente principal de las nubes que, a su vez, tienen características químicas, ópticas, eléctricas y termodinámicas distintas según las condiciones atmosféricas de su formación. La precipitación de las partículas de vapor de agua y hielo contenidas en las nubes se produce cuando alcanzan un tamaño que impide su sus-

pensión contra la gravedad terrestre. En función de la temperatura de la nube y del ambiente se producen los diferentes tipos de precipitación: lluvia, nieve o granizo.

Otras manifestaciones son los fenómenos de turbulencia que incluyen factores como la humedad del aire, la temperatura y la concentración de distintos compuestos, así como los efectos derivados de la actividad solar (variable también con cierta periodicidad) y los fenómenos químicos naturales o debidos al efecto de los desechos gaseosos que produce la actividad industrial.

La Climatología incluye, además del estudio de los fenómenos meteorológicos de la baja atmósfera, efectos astronómicos, como la sucesión de estaciones debida al desplazamiento de la Tierra en torno al Sol y, durante las últimas décadas, los mencionados efectos de la actividad humana, efectos que, por cierto, son nocivos en casi todos los casos. La lluvia ácida y la exageración del efecto de invernadero, por ejemplo, son resultado directo de la industrialización.

## FUNDAMENTOS CIENTIFICOS DE LA METEOROLOGIA

Tradicionalmente, la Meteorología fue entendida como una disciplina que estudia las leyes de los fenómenos atmosféricos, y sólo recientemente puede considerársele una especialidad sistemática (es decir, científica) de estudio y predicción. Como parte de las disciplinas físicas ha procurado conseguir argumentos puramente científicos para su existencia, libre de la imagen especulativa que la caracterizó en el pasado. De ahí la estrecha relación que, ahora más que nunca, mantiene con los avances de las ciencias y la tecnología de su tiempo.

Para emanciparse de la especulación, sin embargo, enfrenta todavía grandes problemas, el principal de los cuales es sin duda la dificultad para conseguir modelos universales, enunciados y ecuaciones con carácter igualmente descriptivo que predictivo para los acontecimientos que se dan en su área de estudio. Tal dificultad se explica en parte porque la información de que se dispone acerca de esos acontecimientos es insuficiente todavía, y en parte por la relativa novedad de esa intención, que se manifestó apenas a principios del s. XX. Los procedimientos teóricos y los sistemas de medición y predicción de la Meteorología están en una

etapa de enorme indagación que pretende llegar a establecer las leyes globales del comportamiento atmosférico aplicando resultados de numerosas especialidades, no sólo físicas, sino matemáticas y químicas, y sin desaprovechar las aportaciones de las ramas empíricas de la Ingeniería y la tecnología. El apoyo de la tecnología, principalmente con el empleo de los satélites meteorológicos, ha sido determinante en la generación de sucesivos modelos e interpretaciones sobre el comportamiento atmosférico, el que se puede presentar, en general, como un sistema regido por fuerzas de actuación sobre el que inciden perturbaciones locales de fuentes diversas.

Puntos característicos de apoyo de la Meteorología en otras disciplinas son los que se anotan a continuación, a manera de ejemplos:

- La Mecánica explica los orígenes y las propiedades básicas de la presión atmosférica, definida como la fuerza que ejerce toda la columna gaseosa de la atmósfera sobre una unidad de superficie terrestre.
- La Mecánica de Fluidos y la Aerodinámica contribuyen con la explicación sobre los movimientos ascendentes y descendentes de las masas de aire, las leyes de circulación general del aire, las turbulencias atmosféricas y los principios del equilibrio hidrostático en los que se basan los modelos modernos de la atmósfera.
- La Gravitación justifica, bajo la perspectiva de las fuerzas mecánicas, la distribución de los gases atmosféricos en las franjas bajas de la envoltura gaseosa del planeta como resultado del aplastamiento producido en ellos por la gravedad.
- Los principios del Electromagnetismo permiten formular teorías acerca de la formación de tormentas eléctricas por la desigual repartición de los cristales de hielo en el interior de las nubes, así como algunos efectos de la radiación solar en los distintos niveles atmosféricos.
- La Química ofrece explicaciones para las transformaciones de los compuestos que interactúan en la atmósfera como consecuencia de las perturbaciones térmicas o electromagnéticas, incluyendo la radiación solar.
- La Termodinámica aporta las nociones básicas de intercambio energético que, aplicadas a la Mecánica de Gases y a la Física Estadística, proporcionan un esquema conceptual y una serie de técnicas de acercamiento y representación matemática muy útiles para expresar la realidad conocida o supuesta. La noción de aleatoriedad de los fenómenos meteorológicos que se agrega al entorno de movimientos y leyes generales proporciona nuevas hipótesis de índole matemática, las cuales tienen mucho futuro en el estudio de los fenómenos de perturbación local, de mucha importancia en el desarrollo de la Física de nubes, el

estudio de la influencia infinitesimal de la rotación terrestre en la formación de partículas en las atmósfera, las perturbaciones tropicales y otros acontecimientos observables muy difíciles de expresar como sistemas matemáticos.

## METEOROLOGIA INSTRUMENTAL Y APLICADA

El área principal de aplicación de la Meteorología es, claramente, la predicción del tiempo, para cuya práctica se apoya en buena medida en los datos y registros generados por la Climatología. Es evidente que las mediciones constantes sobre temperaturas medias, valores extremos en lapsos variables, índices de precipitación de lluvia y nieve, registros de velocidad y dirección de los vientos, etcétera, son esenciales. Es, por tanto, evidente la importancia que la aportación de la Electrónica y la Informática puede adquirir en la adquisición y tratamiento de tanta información, y tan variada. El análisis de los fenómenos meteorológicos a partir de su incidencia, su intensidad y su distribución geográfica constituye el ambiente de trabajo de la Meteorología Sinóptica, una de las más desarrolladas por su aplicación directa en la predicción del tiempo (ver apéndice A: Alcance de los Fenómenos Meteorológicos).

En cuanto a los sistemas de medición de las variables fundamentales a que se hizo ligera referencia, es notable que su avance se haya establecido espectacularmente a partir del s. XVII, con la invención de aparatos como el barómetro y el termómetro, después de muchos siglos de apreciación sensorial. Ese adelanto posibilitó las observaciones de las estaciones meteorológicas distribuidas sobre Asia, América y Europa desde el s. XIX. El instrumental clásico de estas estaciones incluía fundamentalmente un barómetro, un termómetro, un anemómetro y veleta (velocidad y dirección del viento) y un pluviómetro (medición de nivel de las precipitaciones atmosféricas alrededor de la estación. Una adecuada distribución de estas estaciones facilitaba el seguimiento de los fenómenos atmosféricos y, de cierto modo, sus mecanismos de transmisión y evolución temporal. Con todo, sólo el desarrollo de la aeronáutica y la generalización del uso de satélites para realizar tales observaciones con mayor amplitud y fiabilidad permitió el establecimiento de los primeros modelos generales del comportamiento de la atmósfera.

La última parte del párrafo anterior se comprende mejor al repasar el bagaje tecnológico de que disponen los satélites de observación meteorológica: equipos de detección fotográfica

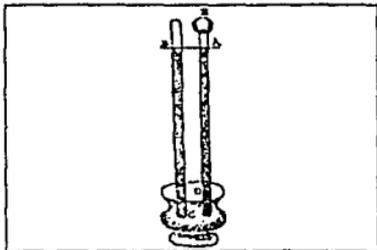
y videográfica con sistemas de penetración en el infrarrojo para visión nocturna, así como los medios de transmisión de información más adelantados, que permiten mantener un contacto casi continuo con las bases en tierra, las que a su vez poseen mecanismos de análisis de la información recabada a través de técnicas de espectroscopía que permiten, a partir de la intensidad de absorción electromagnética detectada en las fotografías especiales, el comportamiento termodinámico y cinético de cada área de la atmósfera que el satélite cubre. Además, están los importantes sistemas de cómputo que, a partir de modelos teóricos fundados en modernos descubrimientos en Matemáticas y Lógica, condensan toda la información proporcionada por los satélites en cuadros estadísticos sobre los que reposa toda la teoría de la ciencia meteorológica.

## I.- EL BAROMETRO

Aunque no es el primer instrumento meteorológico, el barómetro es uno de los más importantes. La ciencia de la meteorología comenzó en el siglo XVII con el interés de relacionar el clima con la altura de una columna de mercurio,

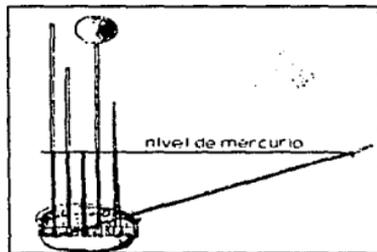
ya la de trazar isobaras en mapas. Las isobaras son líneas que unen puntos de la misma presión en una región específica. Aristóteles tenía la idea que el aire pesaba y esta idea perduró por mucho tiempo, hasta que Galileo en 1615 estableció su creencia de que el aire pesaba "casi nada" por lo que no ejercía ninguna presión sobre las cosas. Uno de los experimentos más famosos al respecto es atribuido a Evangelista Torricelli, quien accidentalmente descubrió la existencia de la presión atmosférica. Tomó

un tubo de vidrio cerrado de un extremo de aproximadamente un metro de largo y lo llenó de mercurio, tapó con un dedo el otro extremo del tubo y lo invirtió, sumergiendo el extremo que cubría en una vasija conteniendo también mercurio. Al retirar su dedo, el nivel de mercurio descendió y se estabilizó a una altura que marcó. Repitió el experimento y encontró que el nivel seguía siendo el mismo que en un principio y esto le llamó la atención. Pensó que el peso del mercurio hacía que éste descendiera formando un vacío en la parte cerrada del tubo.



Ilustr. 1-1: Experimento de Torricelli.

A partir de entonces se le tomó interés a este fenómeno y se buscó si esta altura dependía de la temperatura o de la humedad. Fue entonces que otro científico, Maignan, informó sobre un experimento realizado en Roma, el cual consistía en cinco tubos de vidrio de diferentes dimensiones y formas, uno de ellos con forma de cono, otro con una esfera en la parte superior, otro con una cierta inclinación, y los otros dos de diferentes alturas. Notó que no importando las dimensiones de estos el nivel de mercurio permanecía constante entre ellos, por lo que si la humedad o la temperatura influyeran en el nivel, sería apreciado fácilmente. No así en el caso de un tubo con sección trans-



Ilustr. 1-2: Experimento de Maignan.

versal muy pequeña ya que en ese caso, si las dos partes del tubo estuvieran cerradas, entonces se vería modificada la altura por la temperatura.

Después de esto se empezaron a desarrollar los barómetros de mercurio por tres razones importantes:

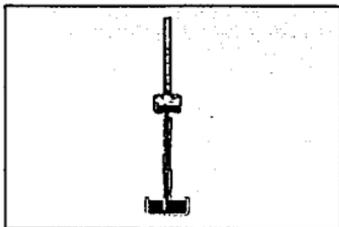
- Para expandir la escala:  
En ese entonces no se tenía una resolución suficiente como para notar las variaciones tan pequeñas que se presentaban en la columna de mercurio.
- Para hacer más portátil el instrumento:  
Originalmente se usaba el tubo de casi un metro con mercurio y su manipulación no era muy fácil, ya que cada vez que se hacía una medición en otro lugar se tenía que guardar el mercurio y transportar el tubo lo cual no era muy sencillo.
- Incrementar la exactitud en la lectura:  
Tampoco en este aspecto eran muy confiables las lecturas en los barómetros, tanto por los errores que conllevaban las dimensiones y características físicas del instrumento como por los debidos a otros factores.

Los barómetros que se desarrollaron entonces fueron, antes del siglo XVII:

- a) De uno o más líquidos
- b) De rueda o volante
- c) De balance
- d) Diagonal
- e) Cónico

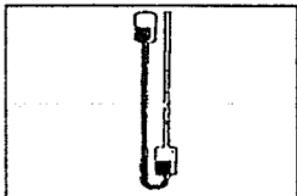
## BAROMETROS DE UNO O DOS LIQUIDOS

El primer barómetro de dos líquidos fue hecho por Descartes y utilizaba mercurio y agua. Su funcionamiento es muy similar al de Torricelli, pero al utilizar dos líquidos con densidades diferentes las variaciones en la altura de la columna del líquido eran mayores que si se tratara solamente de mercurio. Existía en este barómetro una dificultad: que al utilizar el agua como líquido en contacto con la parte donde se creaba vacío parcial se evaporaba por la influencia de la temperatura exterior, por lo que el nivel del líquido para tomar la lectura no era muy exacta.



Ilustr. I-3: Barómetro de dos líquidos de Descartes

El barómetro de dos líquidos construido por Hooke es similar en principio al de Descartes, pero con la diferencia de que el líquido que estaba en contacto con la parte cerrada era mercurio, por lo que la evaporación no era notable (podríamos decir que era nula) por la temperatura en el exterior. Ahora el problema consistía en que el agua era la que se encontraba en contacto con el medio ambiente y se ensuciaba mucho, y al haber incrementos de temperatura, el agua se evaporaba cambiando las condiciones del barómetro.



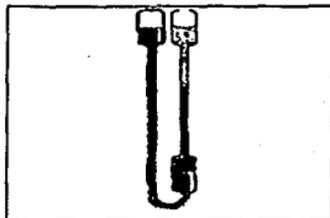
Ilustr. I-4: Barómetro de dos líquidos de Hooke

## BAROMETRO DE TRES LIQUIDOS

También construido por Hooke pero en este caso utilizaba tres líquidos que no se podían mezclar entre sí. El funcionamiento era similar al de dos líquidos y se tomaban las medidas de la misma forma que en éste. Sin embargo, se presentaba el problema de la influencia que tenía la temperatura con los líquidos que no eran mercurio, por ejemplo alcohol y turpentina: los líquidos actuaban como termómetros.

**BAROMETRO DE RUEDA O VOLANTE**

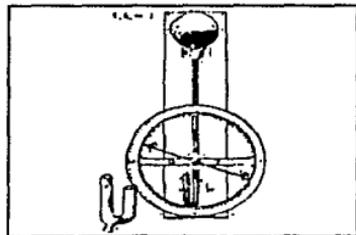
Otro barómetro construido por Hooke funcionaba de manera similar a los otros, pero para incrementar la escala utilizaba dos pesas atadas entre sí y colgadas de un engrane, el cual hacía girar una flecha que se encontraba sobre una corona graduada. Una de las pesas se encontraba en la superficie de mercurio y la otra suspendida en el aire. Tenía la facilidad de que era más portátil y al tener en la parte inferior una como válvula, se podía sacar, vaciar y llenar más fácilmente de mercurio que sus antecesores.



Ilustr. 1-5: Barómetro de tres líquidos de Hooke

**BAROMETRO DIAGONAL**

La peculiaridad de este barómetro era que el mismo tubo que ideó Torricelli, Sir Samuel Morland lo dobló ligeramente arriba de los 69 cm de altura, y al hacer esto magnificó la lectura por el valor de la cosecante del ángulo que formaba este doblez con la horizontal.



Ilustr. 1-6: Barómetro de rueda o volante.

**BAROMETRO DE AGUA**

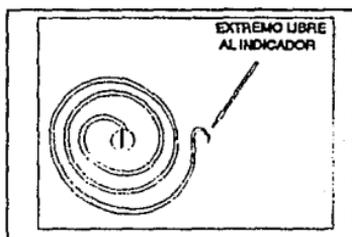
Sus principios se basan en los experimentos de Berti y Pascal, y algunos de estos barómetros fueron construidos por Otto Guericke en 1645, Richard Townley y sus colaboradores en 1661, y uno más en 1683 por Edme Mariotte en el Observatorio de París. Este Observatorio, por cierto, fue una locación excelente para este tipo de barómetros ya que, al no presentar cambios de temperatura notables, el agua no se evaporaba como en otros lugares con temperaturas menos estables. Su funcionamiento era similar al de Torricelli pero, en vez de utilizar mercurio, utilizaban agua, posibilitando una mayor magnificación de las lecturas.

## BAROMETRO DE GAS

Estos se basan en la relación existente entre presión y volumen, o presión y densidad en un gas. Este tipo de barómetros no despertaron mucho interés por lo que se tiene muy poca información de ellos.

## BAROMETROS ANEROIDES

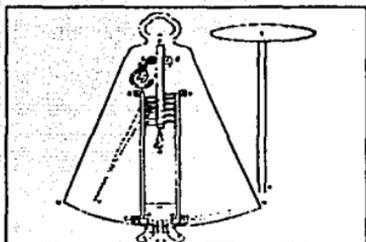
Este tipo de barómetros revolucionaron la forma de medir la presión, ya que no dependían de ningún equilibrio hidrostático ni de las leyes de los gases. El primer barómetro de este tipo fue pensado inicialmente por Blaise Pascal y fueron llamados Aneroides por no contener líquidos y básicamente usaban la elasticidad de los materiales sólidos para, en base a la deformación que sufrían, modificar mecánicamente algún indicador. Supóngase un tubo cerrado por ambos lados conteniendo aire en su interior. Al presentarse una variación en el medio ambiente, este tubo sufriría una ligera modificación en su forma. Si se tuviera uno de estos tubos en forma de espiral, esta sufriría una dilatación o compresión que se reflejaría en una manecilla fijada en uno de sus extremos a uno de los lados cerrados del tubo y a otro punto en el otro extremo, como se aprecia fácilmente en la figura.



Ilustr. I-7: Espiral aneroide.

## BAROMETRO MARINO DE ZEIHNER

Este consistía en un cilindro rígido en el que se introducían dos pistones; uno de éstos estaba unido por medio de un resorte a uno de los extremos del cilindro y el otro se utilizaba para evacuar el aire que se encontraba inicialmente en el aparato. El primer pistón estaba unido además a un eje normal a él y en contacto con dos engranes, que comunicaban su movimiento a una manecilla por medio de la fricción.



Ilustr. 1-8: Barómetro marino de Zeher

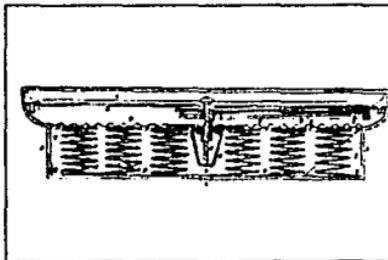
este transmitiendo este movimiento a una flecha o indicador que giraba sobre una carátula. De esta manera al existir algún cambio en la presión, el indicador giraba dando una lectura sobre esta carátula.

#### BAROMETRO ANEROIDE DE E.J. DENT

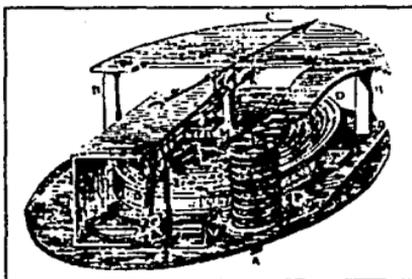
Este barómetro funcionaba por la deformación de un elemento metálico, en este caso un tubo delgado y aplanado (tubo de Bourdon), arrollado en forma de espiral y sujeto en un eje en el centro de una placa de superficie circular; el otro extremo se encontraba también sujeto pero transmitía el movimiento de la espiral a una pieza metálica la cual, a su vez, estaba también unida a otra pieza que al presentarse alguna deformación debida a cambios en la temperatura, corregía la deformación de la espiral para que no tuviera ninguna variación por

#### BAROMETRO ANEROIDE DE VIDIE

Vidie creó un barómetro que estaba compuesto por 33 resortes los cuales se encontraban dentro de un recipiente rígido. Estos resortes se encontraban fijados en la base de este recipiente y por la parte de arriba por un diafragma corrugado el cual, dependiendo de la presión a la que se veía sometido, presionaba a estos resortes. Este diafragma se encontraba comunicado a un eje helicoidal y giraba en su propio



Ilustr. 1-9: Barómetro aneroide de Vidie.



Ilustr. 1-10: Aneroide con resortes externos

la temperatura. De esta forma este barómetro se autocorregía en el caso que hubiera algún cambio en la temperatura.

Todos estos instrumentos fueron muy usados en su época y aún algunos siguen en funcionamiento en la actualidad. Muchos de ellos se encuentran en diversos museos, principalmente en Italia e Inglaterra. El hecho de que haya habido un gran avance en los instrumentos para la medición de la presión, no hace que dejen de utilizarse aún en nuestros días. Es común hallar todavía lugares en los cuales para medir la presión atmosférica se siguen usando instrumentos como los de columnas de mercurio. Estos instrumentos fueron fabricados antes de 1860 y ahora, en la actualidad, existen barómetros que son más exactos y más pequeños.

No

Existe

Página

## II.- TERMOMETROS

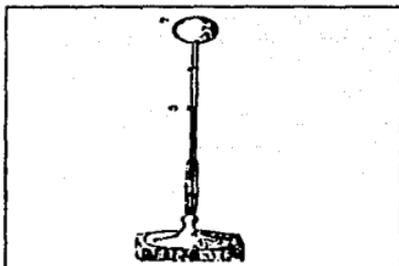
El termómetro es un instrumento que permite cuantificar las sensaciones de "frío" y "calor". La temperatura es una cantidad de características muy particulares, ya que por una parte no es acumulable (como el tiempo o la longitud) y por la otra no es una propiedad de la materia (como el índice de refracción o la densidad). De hecho, hasta hace relativamente poco era necesario definir a la temperatura en términos de cambios mensurables en alguna propiedad de las sustancias que se presentarían al enfriarse o calentarse. Por la misma razón, debe tenerse presente que, para establecer una escala de temperaturas, debieron tomarse tres distintas decisiones de manera más o menos arbitraria: una, la sustancia termométrica; dos, la propiedad de esa sustancia cuyos cambios se cuantificarían; y tres, el sistema de numeración que defina la escala como tal.

Por un accidente histórico, se da que el volumen de los cuerpos constituye su propiedad más cambiante ante los estímulos "frío" y "calor", de modo que fue esta propiedad la usada en casi todos los termómetros actuales, y definitivamente en todos los primeros modelos. Por esta razón, la historia de la termometría es en buena medida una sucesión de intentos de hacer y de justificar elecciones de los otros dos tipos. Así, la primera sustancia utilizada fue el aire, por la magnitud de sus cambios volumétricos. Luego, cuando algunas ineficiencias se observaron, se utilizaron sucesivamente varios líquidos. Por el otro lado, la conveniencia obligaba a establecer puntos fijos a fin de numerar las escalas, de modo que se utilizaron a veces dos referencias extremas y se dividió el espacio entre ellas en un número conveniente de "grados", o bien se utilizó una sola referencia y se hizo que el tamaño del "grado" correspondiera con algún arbitrario incremento fraccional del volumen de la sustancia termométrica a partir de ella. Esta alegre desorganización, que no parecía preocupar a los primeros investigadores de la termometría, tenía su fundamento en la suposición, que se mantuvo hasta bien entrado el siglo XIX, de que el calor era una sustancia material que podía transitar entre un cuerpo y otro, de manera que los termómetros reflejaban en realidad la cantidad de esa sustancia que había en su

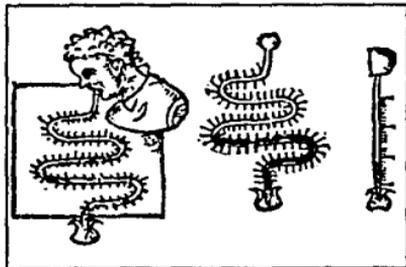
entorno. Por cierto, es interesante mencionar que la noción de una escala de grados de calor y frío es muy anterior al propio termómetro, ya que existe al menos desde los días del médico griego Galeno.

## PRIMEROS INSTRUMENTOS

El sufijo griego "metrón" aplicado a un instrumento que registre los cambios en el estado de alguna variable implica la existencia de una escala. Si tal instrumento sólo señala que ese cambio ha ocurrido, sin especificar su magnitud, resulta más apropiado utilizar "scopium" para caracterizarlo y, en efecto, los primeros intentos dieron como resultado termoscopios, evidentemente de aire. Estos tienen su origen, probablemente, en un experimento que reseñaron en la antigüedad Philón de Bizancio y Herón de Alejandría (en el siglo I a. de C.) y que podría llamarse una "Fuente solar". Consistía en un vaso cerrado, excepto por un tubo de salida y lleno parcialmente de agua que salía por el tubo al expandirse el aire en el vaso cuando éste se calentaba. Este experimento, conocido y repetido por Galileo antes de 1600, fue la base para su termoscopio y éste, al parecer, la versión no graduada de lo que sería después el verdadero termómetro de aire descrito por él en 1613. Vale mencionar, sin embargo, que el médico (también italiano) Santo-



Mostr. II-1: Termoscopio de Santorio.



Mostr. II-2: Termómetros de Santorio

se una "Fuente solar". Consistía en un vaso cerrado, excepto por un tubo de salida y lleno parcialmente de agua que salía por el tubo al expandirse el aire en el vaso cuando éste se calentaba. Este experimento, conocido y repetido por Galileo antes de 1600, fue la base para su termoscopio y éste, al parecer, la versión no graduada de lo que sería después el verdadero termómetro de aire descrito por él en 1613. Vale mencionar, sin embargo, que el médico (también italiano) Santo-

rio Santorre publicó una referencia a su propio termómetro en 1612, el que tenía, además, aplicaciones meteorológicas según el propio Santorio, si bien el instrumento no disponía de una escala propiamente dicha y la lectura debía realizarse midiendo las variaciones "con compases". Versiones posteriores del mismo incluían ya una escala práctica, definida entre los puntos de elevación máxima y mínima del agua en el tubo de salida que a su vez se establecían cubriendo el bulbo con nieve y calentándolo a la flama hasta que el líquido no descendía más. Otros investigadores que trabajaron en el perfeccionamiento del termómetro de aire y le dieron formas verdaderamente artísticas en su momento fueron Robert Fludd, Cornelius Drebbel, Salomón de Caus, el jesuita Jean Leurechon y Otto von Guericke, que fue el primero en percibir el impacto que la presión atmosférica tenía sobre el funcionamiento de los termómetros de aire y, por ende, la necesidad de modificar los modelos existentes.

### LOS TERMOMETROS DE "LIQUIDO EN VIDRIO"

Las modificaciones empezaron a aparecer antes de 1640. Un caso interesante es el de los termómetros sellados que, llenos de alcohol, contenían algunas esferas de vidrio de diferentes densidades. Cuando la temperatura aumentaba, el alcohol perdía densidad y las esferas iban hundiéndose de una en una, de manera que la temperatura se podía relacionar con la cantidad de las que se hubieran sumergido.

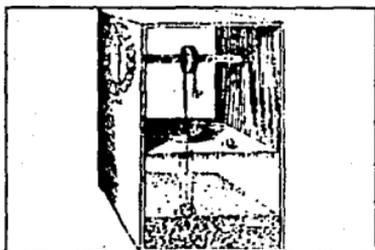
El siguiente de este tipo fue un termómetro de apariencia más familiar. Tenía una escala de cien grados, aunque los hubo con escalas de 50 y de 300. Los grados estaban marcados con trocitos de vidrio fundidos con el tubo y fueron inventados quizá después de 1646 (no se encuentra información incontrovertible). Lo que es casi seguro es que cierta cantidad de estos instrumentos se hayan fabricado en Florencia y enviado a distintas ciudades a fines de 1654 a fin de implementar, bajo la dirección de Luigi Antinori y por orden del rey Fernando II (a quien, de paso, se le adjudica la invención), la primera red meteorológica del mundo occiden-

tal. El líquido usado en ellos era, todavía, alcohol (particularmente del tipo "espíritu del vino") teñido de rojo. Vale comentar que, aunque se hicieron algunos intentos con termómetros de mercurio, los fabricantes se decepcionaron por su escasa variación volumétrica.

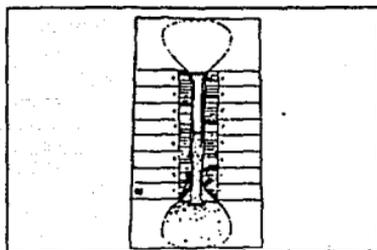
## SIGLO XVII

En los 1660's la Real Sociedad, recientemente fundada en Inglaterra, dio noticia de trabajos sobre termometría efectuados por varios de sus miembros. El primero de ellos fue quizá el meteorógrafo de Christopher Wren, que usaba un termómetro de aire en el que la expansión del mismo hacía variar el nivel de una columna de mercurio en la que flotaba algún tipo de marcador que registraba el movimiento en una carta. Wren fabricó también otro tipo de termómetro que consistía en dos bulbos de vidrio conectados por un tubo en forma de arco. Aparentemente, los bulbos estaban parcialmente llenos de mercurio y la temperatura era indicada por la rotación del conjunto conforme variaba su centro de gravedad.

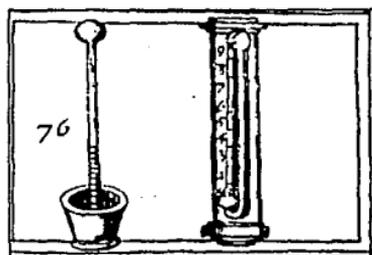
Robert Hooke fue quizá el primero en lograr que termómetros de diferentes dimensiones señalaran la misma temperatura, lo que no ocurría en ninguno de los casos anteriores. Para ello, utilizó un punto fijo: la temperatura del agua destilada cuando comienza a congelarse. Desde este origen, que marcó "0" (cero), sus "grados" fueron hechos para corresponder con variaciones medidas del volumen del líquido termométrico ("espíritu del vino") de modo que cada grado correspondía a una variación de 0.001 del volumen en el punto de congelación. Este método ingenioso para establecer una escala fue comentado por la misma época por Christiaan Huygens quien proponía *"bien el punto de congelación del agua, o el de ebullición"* con los mismos fines.



Ilustr. II-3: Termómetro de aire de Salomon de Caus (1615).



Ilustr. II-4: Termómetro de aire de Tellioux (1611).



Ilustr. II-5: Termómetros de aire posteriores a Leurechon.



Ilustr. II-6: Termómetro de aire de Guericke

Los primeros intentos por usar dos puntos fijos en el establecimiento de una escala tendieron naturalmente hacia los propuestos por Huygens. Primero, el trabajo póstumo presentado en 1679, de Sebastiano Bartolo, un profesor napolitano que dividió el intervalo resultante en 18 grados; luego el de Francesco Eschinardi que proponía un método bastante confuso para establecer la división y, finalmente, Carlo Renardini (o Rinardini), a quien suele atribuírsele la idea original, aunque su trabajo fue publicado hasta 1694. Sin embargo, su método para describir la escala sí fue novedoso y, además, sistemático y confiable.

Un caso interesante es el de Isaac Newton, quien usando como líquido termométrico aceite vegetal, propuso como puntos extremos el de la nieve fundente (cero grados) y el de la temperatura corporal (12 grados). En esta escala, el agua hirviendo marcaba 34 grados.

Mención aparte merece la "escala Real Sociedad", llamada así porque los termómetros que la usaban fueron construidos por el fabricante de los instrumentos para la agrupación: Francis Hauksbee el Joven. Su uso fue recomendado por el secretario de la misma Sociedad, James Jurin, para que quien estuviera interesado realizara observaciones meteorológicas y enviara sus resultados a Londres. Desafortunadamente, parece ser que estos instrumentos difícilmente concordaban unos con otros y su extraña escala invertida (el hielo fundente daba 65 grados y el agua hirviendo 0 grados) fue definitivamente olvidada.

## SIGLO XVIII

Fue a principios de este siglo (1708) cuando se dio a conocer la técnica de fabricación y calibración de termómetros que todavía hoy se usa: el método de Ole Rømer, danés, que usó tubos de vidrio rellenos de mercurio y sellados luego para establecer su método de calibración. Este, según escribió en su "ADVERSARIA" era:

*"Cuando el termómetro ha sido hecho, rellenado y sellado, el punto 7½ es fijado por medio de nieve o hielo picado, el punto 60 hirviendo (agua)..."*

El extraño valor 7½ fijado tenía, al parecer, tendencias marcadamente meteorológicas al impedir, hasta donde era posible, que las temperaturas ambientales debieran presentarse con valores negativos.

Aparentemente, Daniel Gabriel Fahrenheit tuvo contacto con Rømer y sus trabajos. Sin embargo, no parece que aquél haya simplemente tomado y ampliado las propuestas del danés. Fahrenheit había estado haciendo termómetros de mercurio desde 1716 y durante un año utilizó en ellos una versión de la escala de Rømer con mayor resolución, pero el mismo Fahrenheit atribuyó después su uso del mercurio a un informe de Amontons acerca de la necesidad de modificar las escalas barométricas de acuerdo a la temperatura. De todos modos, publicó la descripción de su propio termómetro y su calibración en 1724, haciendo hincapié en la independencia de la escala de la longitud del tubo, ya que estaba comprendida entre dos puntos fijos: el hielo fundente a 32 grados y la temperatura del cuerpo humano sano, a 96 grados (sin embargo, en su informe original él habla de un tercer punto de referencia: el hielo fundente mezclado con dos tipos de sales de amoníaco, que daban el nivel de cero grados. Este último fue poco confiable, incluso para Fahrenheit) que no incluían el agua en ebullición. Fue después de 1736 (año de la muerte de Fahrenheit) cuando se consideró esta temperatura (212 grados) como punto fijo en lugar de la del cuerpo humano.

Una escala basada en un solo punto fijo, como la de Hooke, constituyó una de las peores producciones de un eminente científico: René-Antoine Ferchault de Réaumur. Los métodos que utilizó para establecerla fueron, con mucho, inferiores a los de Hooke. A pesar de ello, sus cero grados para el agua congelándose siguieron utilizándose en Francia y Europa Central por más de un siglo una vez que su nivel de 80 grados se había ajustado para que

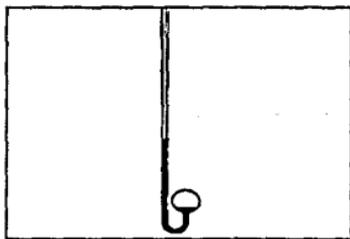
coincidiera con el punto de ebullición del agua. Por otra parte, su elección de alcohol diluido como líquido termométrico le causó problemas al tratar de encontrar un porcentaje de tal disolución cuyo comportamiento resultara confiable al medir temperaturas mucho mayores. Al final, encontró una solución que aumentaba en 80 partes por 1000 su volumen al pasar de la temperatura marcada de cero grados a la del agua hirviendo, y de ahí "porque 80 era un número conveniente para dividir" decidió marcar los 80 grados en el punto marcado *POR EL AGUA HIRVIENTE ACTUANDO SOBRE ESA SOLUCION PARTICULAR*. Sin embargo, sus métodos fueron cayendo en el olvido y durante la década de 1730 se construían termómetros de *MERCURIO* calibrados de 0 a 80 grados a partir del hielo fundente y el agua hirviendo bajo el nombre de "termómetros de Réaumur". Esta clase de instrumentos son, en realidad, los que conservaron su vigencia hasta el siglo siguiente. Otra escala análoga fue la propuesta por el astrónomo francés Nicolás Delisle en 1732. Su termómetro, lleno de mercurio, tenía su punto 0 en la temperatura de ebullición del agua y se incrementaba conforme la temperatura descendía (un grado señalado por una contracción de 1/100,000 -luego 1/10,000- del volumen de 0 grados). Aunque Delisle no se refirió en su informe a la temperatura de congelación del agua, trabajos posteriores asignaron a ésta el valor de 149.5 grados (1738-39).

## LOS TERMOMETROS CENTIGRADOS

En el sistema decimal de numeración, es evidente que el 100 es un número muy cómodo de manejar. Por eso era lógico que aparecerían, antes o después, escalas termométricas con 100 grados entre dos puntos fijos. Así, en 1724 y 1741 aparecieron instrumentos con esa característica: el primero fue fabricado por los hermanos Delisle y marcaba 0 grados en agua hirviendo y 100 grados en el ambiente de los sótanos del Observatorio de París; el segundo fue obra de un genovés -Jacques Barthélemi Michelt du Crest- con exactamente la escala inversa, excepto por la consideración de que los cien grados eran la temperatura del agua hirviendo "... BAJO PRESIÓN DE 27.75 PULGADAS PARISINAS DE MERCURIO". La escala centígrada

en el sentido que tiene actualmente aparece con las contribuciones de los astrónomos suizos Anders Celsius y Märten Strömer, el botánico Linneo y Jean Pierre Christin, de Lyon. Extrañamente, la escala que propuso Celsius originalmente era una que marcaba cero grados en agua hirviendo y 100 grados en el punto de congelación del agua (diciembre de 1741, aunque su trabajo fue publicado el año siguiente). Por cierto, Celsius no sólo estableció las condiciones de presión para determinar sus puntos fijos (25¼ pulgadas suizas de mercurio), sino que estableció una regla para definirlos si era necesario bajo condiciones distintas. Muerto Celsius en 1744, su termómetro fue usado hasta 1750 en las mediciones oficiales en Uppsala y en ese año fue sustituido por la versión de Strömer, que tenía la escala como la conocemos. Con todo, y a pesar de que Strömer ya tenía funcionando su termómetro en 1746, parece que el naturalista Linneo expuso uno similar ante el Senado de la Universidad en 1745, destinado a controlar la temperatura de los invernaderos de la Institución. Y todavía más: en mayo de 1743 Jean Pierre Christin presentó a la Academia Francesa un trabajo en el que describía con detalle la fabricación y escalamiento de un termómetro centigrado con la misma característica de los reseñados arriba. Estos son muchos autores, y sólo suele reconocerse a uno...

A estas alturas podría pensarse que los termómetros de aire ya habían sido olvidados. De hecho no fue así. Desde 1672, cuando Hubin modificó el barómetro de dos líquidos de Hooke (o de Huygen) para medir temperaturas añadiéndole un bulbo y utilizando como líquidos una solución ácida de nitrato de cobre y el agua, hubo sucesivas mejoras y modificaciones que llevaron, alrededor de 1700, al descubrimiento de Guillaume Amontons de la relación entre el porcentaje de cambio de volumen del aire y el cambio en su temperatura, y luego al establecimiento de la independencia de la relación temperatura-presión de una masa encerrada en gas respecto



Ilustr. II-7: Termómetro de aire de Amontons

a la presión inicial. A partir de estos trabajos, Amontons fabricó un termómetro de aire muy simple, con forma de J abierta en la rama larga y con un bulbo en la rama corta. El único líquido que la presión del aire calentado movía era mercurio y esa era una ventaja. La desventaja era que, evidentemente, el instrumento era sensible a la presión atmosférica. Sin embargo, bastaba con sellar la rama larga para obviar ese problema, y parece que eso hizo Vittorio Francesco Stancari, de Bolonia, alrededor de 1708. Finalmente, vale mencionar que un termómetro de aire -de hidrógeno en realidad- se convirtió en la norma para todos los demás, y que esto ocurrió bien entrado el siglo XIX.

Es claro que, por lo menos al principio, los termómetros que se construían no eran tan confiables como hubiera sido desear. Así fue como el Comité sobre Calibración y uso de Termómetros que el químico Henry Cavendish dirigía encontró que los termómetros ingleses presentaban, de fabricante a fabricante, variaciones de cerca de 4 grados Fahrenheit. Sus recomendaciones para corregir este estado de cosas, a pesar de que sus medios materiales han sido considerablemente mejorados, han sido seguidas y demostrado ser efectivas desde entonces hasta ahora.

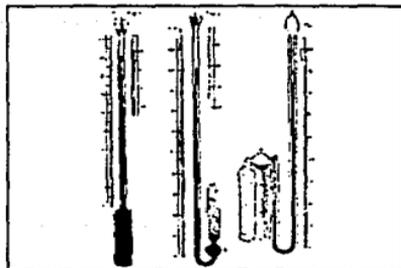
## **TERMOMETROS DE MAXIMAS Y MINIMAS**

Johann Bernulli, en una carta a Leibnitz de 1698, sugirió el primer diseño conocido para termómetros de máxima y mínima. Como su idea no fue puesta en práctica, los primeros verdaderos instrumentos de este tipo fueron los que se atribuyen a Lord Charles Cavendish (padre de Henry Cavendish), descritos en 1757. Tanto el de máxima como el de mínima eran termómetros más o menos normales, excepto porque sus bulbos eran especialmente amplios y porque contenían mercurio y alcohol. La evaporación y concentración de éste en los bulbos

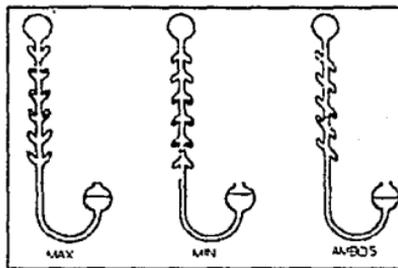
estaban relacionadas con los valores de las temperaturas extremas, de manera que bastaba leer la temperatura del momento y sumarle o restarle la cantidad de alcohol que se hubiera acumulado en los tubos.

Los instrumentos de Lord Cavendish eran difíciles de transportar y de reparar, de manera que cayeron en desuso a finales del siglo XVIII, a medida que se presentaban ideas mejores.

James Six, por ejemplo, inventó un instrumento combinado de máximas y mínimas cuyo líquido termométrico era alcohol, contenido en un largo bulbo cilíndrico y en la rama opuesta del instrumento (ver figura). Entre esos dos volúmenes de alcohol había uno de mercurio cuya función era forzar dos marcadores de acero cubiertos de vidrio a moverse dentro de los tubos. Las bajas temperaturas comprimían el alcohol del bulbo, lo que provocaba que el mercurio ascendiera por la rama de "bajas" del instrumento empujando el marcador correspondiente, que el alcohol no tenía densidad suficiente para mover; por otro lado, las temperaturas altas expandían el alcohol, que empujaba la columna de mercurio en sentido contrario con efectos similares sobre la otra rama.



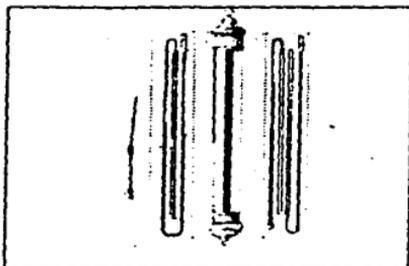
Ilustr. II-9: Termómetros de Lord Charles Cavendish.



Ilustr. II-8: Propuestas de Bernoulli para termómetros de máximas y mínimas.

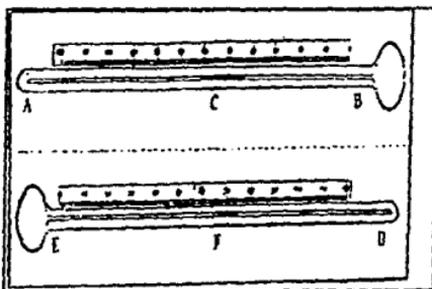
En 1790 Daniel Rutherford describió un par de termómetros inventados por John Rutherford. De ellos, el de mínima es esencialmente el que se utiliza actualmente por parte de los servicios meteorológicos, y es simplemente un termómetro de alcohol con un indicador cónico de vidrio apun-

tando hacia el bulbo y sumergido en el alcohol. El de máxima es un termómetro de mercurio, con su indicador cónico de marfil. Ambos eran colocados horizontalmente, con el bulbo del termómetro de mínima y el extremo del de máxima hacia la derecha. Inclinar el marco en que se montaban en ese sentido era suficiente para preparar ambos instrumentos. El termómetro de máxima de Rutherford terminó apareciendo insatisfactorio porque el mercurio tendía a rebasar el indicador. En cuanto al de mínima, la única modificación que se le ha hecho hasta ahora es cambiar la forma del indicador por la de una campanita (alrededor de 1826).



Ilustr. II-10: Termómetros combinados de máximas y mínimas (S<sup>ra</sup>)

Un tipo mejor de termómetro de máxima fue diseñado en 1832 por el geólogo John Phillips y reinventado en 1855 por F. H. Walferdin, de París. Se trataba simplemente de un termómetro de mercurio ordinario en el cual una fracción de la columna, separada del resto por una pequeña burbuja, funciona como indicador cuando el instrumento es colocado horizontalmente. Esta clase de aparatos se siguieron fabricando hasta los 1870's, cuando fueron superados por el instrumento usado actualmente en casi todas las estaciones meteorológicas y que fue patentado por la firma Negretti & Zambra, de Londres, en 1852, cuya característica es un estrechamiento del tubo cerca del bulbo. La razón de que el termómetro de Wal-



Ilustr. II-11: Termómetros de máximas y mínimas (Rutherford)

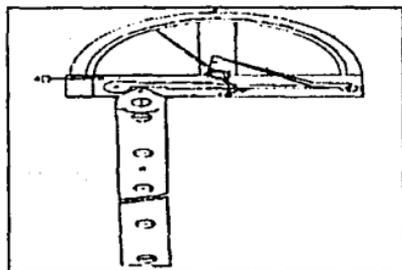
ferdin fuera preferido durante algún tiempo fue el cuidadoso manejo que requería el de Negretti & Zambra, lo que obstaculizó su adopción inmediata.

## TERMOMETROS DE DEFORMACION

Esta clase de instrumentos, como su nombre lo indica, señala modificaciones en la temperatura a través de cambios en la forma o la configuración de sistemas de cuerpos sólidos, normalmente metálicos. Pueden distinguirse, de entrada, dos tipos particulares de ellos: los que usan barras o tubos rectos de diferentes materiales, y los que incorporan una barra compuesta de dos o más metales unidos, la cual cambia su curvatura conforma la temperatura varía.

Los primeros termómetros de deformación fueron del primer tipo, y quizá el primero de ellos fue el hecho por Cromwell Mortimer alrededor de 1735. Sin embargo, era un instrumento hecho para funcionar a muy altas temperaturas. El primero diseñado para los rangos meteorológicos data de 1748 y fue hecho por John In-

gram, inglés, según la propuesta de Samuel Fotheringham. Una barra de latón, de cuatro pies de largo fue remachada a una de hierro en el extremo inferior y sujeta a ella a intervalos por tornillos en ranuras. En el otro extremo de la barra de latón había una punta de cincel de acero que comunicaba el movimiento relativo del extremo de la barra a la primera de dos palancas de aumento y una cadena y polea. Un señalador estaba



Ilustr. II-12: Termómetro metálico (Samuel Fotheringham)

sujeito a la polea y su extremidad debe haber tenido una proporción de aumento de 500.

Otros aparatos similares fueron diseñados por el Conde Hans von Löser y fabricados por J.G. Zimmer. Aunque aparentemente fueron anteriores al trabajo de Mortimer, sólo fueron descritos en 1764, y estaban compuestos por marcos de latón o de acero y por varias barras de plomo cuya deformación era multiplicada por sistemas de poleas y palancas. Por otro lado, Keane Fitzgerald describió uno en 1760 que mejoró al año siguiente con la adición de indicadores que el apuntador principal podía empujar para indicar las temperaturas máximas y mínimas. En cuanto a los termómetros de barra compuesta (que conocemos como bimetalicos), la primera referencia que se conoce es de 1779 y por parte de Lambert, quien menciona que alguien en Inglaterra había tenido la idea de hacer cintas bimetalicas de cobre y hierro, las que no tenían que soldarse, pues bastaba con enrollarlas, aunque no parecía que estuvieran muy en boga termómetros de este tipo. Ya en 1782 el portugués Jean Hyacinthe de Magellan escribe sobre ellos en otro tono. Aparentemente, para entonces los termómetros bimetalicos eran bien conocidos:

*"Para construirlos, una cinta de acero y una de cobre o de latón son sólidamente remachadas o, incluso, soldadas (...) Es mejor dar a esta cinta doble forma espiral, de modo que se tenga longitud suficiente para hacer evidente la deformación (...) Esta banda, sujeta por un extremo, mueve el lápiz sujeto al otro extremo de acuerdo a las diferentes temperaturas de la atmósfera"*

Un termómetro de bolsillo que debe haber contenido una cinta bimetalica fue seguramente construido en 1767 en Pennsylvania por David Rittenhouse. El instrumento era, según un comentario de la época,

*"...insensible a la menor irregularidad o daño en cualquier posición en que se le ponga, haciéndolo seguramente portátil; tanto así que puede ser llevado convenientemente en el bolsillo".*

### III.- PRECIPITACION PLUVIAL

Conocer las cantidades de agua que el suelo de determinada región recibe de las precipitaciones atmosféricas es de evidente interés en muchos campos. En la agricultura, por ejemplo, y modernamente en los trabajos de Ingeniería Hidráulica e Hidroeléctrica, se ha requerido de un conocimiento cada vez más detallado de la distribución de las precipitaciones pluviales (entiéndase lluvia, nieve, granizo, aguanieve, etc.). Por eso no es de extrañar que los instrumentos (llamados sucesivamente hietómetros, ombrómetros y pluviómetros) usados en estas mediciones hayan sufrido continuas modificaciones a pesar de tratarse de aparatos esencialmente simples.

El pluviómetro es un instrumento inventado en Oriente y reinventado mucho después en Europa Occidental. Existen documentos del s. IV a. C. que contienen registros pluviométricos de varias regiones de la India. Y en 1910 se publicó, por parte del director (japonés) del Observatorio Meteorológico de Corea, el doctor Y. Wada, un artículo sobre la precipitación pluvial en Corea durante el s. XV. El pasaje en los anales de la época que motivó esa publicación decía:

*"En el año 24 [1442] del reinado de Sejo, el rey ordenó la fabricación de un instrumento de bronce para medir la lluvia. Este es un vaso de [30 cm] de profundidad y [14 cm] de diámetro que descansa sobre un pilar. El instrumento fue instalado en el Observatorio y, cada vez que llueve, los oficiales del mismo miden la altura con una escala y se la hacen saber al rey. Estos instrumentos fueron distribuidos por las provincias y cantones y los resultados de las observaciones eran enviados a la Corte"*

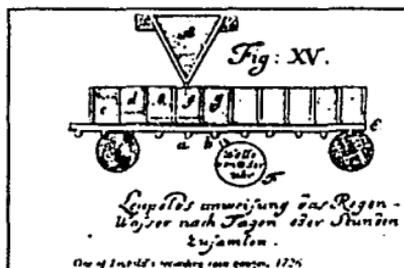
Este fragmento hace pensar que ya en el s. XV se había establecido la primera red meteorológica de cualquier tipo en el mundo, anterior al menos en dos siglos a la establecida por Fernando II en Italia.

En 1639 Benedetto Castelli, interesado en su momento en la estimación de cuánto contribuía la precipitación pluvial al desbordamiento del lago Trasimeno, escribió a Galileo describiendo el método que había seguido para realizar su estimación. Suponiendo, en primer lugar, que la lluvia era uniforme sobre la región en estudio, utilizó

*"...un vaso de vidrio con forma de cilindro, de un palmo de alto y medio palmo de diámetro... expuesto luego al aire libre para recibir la lluvia que pudiera caer dentro de él por espacio de una hora..."*.

Extrañamente, la Accademia del Cimento no hizo mucho caso del asunto, y las siguientes versiones del pluviómetro aparecieron en Inglaterra, fabricadas por Christopher Wren, de quien se ha hecho mención antes.

Es característico de Wren que sus dos pluviómetros fueran registradores, y que al menos uno de ellos formara parte de su meteorógrafo, instrumento que generaba registros respecto a varios elementos meteorológicos. En particular, el pluviómetro de Wren tenía un mecanismo para colocar una sucesión de contenedores bajo la descarga de un embudo colector. El sistema, sin embargo, tenía el defecto de que el agua en los contenedores



Ilustr. III-1: Pluviómetro registrador de Leupold (1726).

podía evaporarse significativamente antes de que el observador los examinara. Esto ocurría en junio de 1663 y, para noviembre del mismo año, ya Wren había abandonado la idea. Sin embargo, en 1726 Jacob Leupold vuelve a presentarla en uno de sus varios libros sobre máquinas, aparentemente reinventándola, ya que Leupold no presenta el acostumbrado reconocimiento a los diseñadores originales. El cambio de contenedor ante el embudo se realizaba gracias a un ingenioso sistema de movimiento discontinuo proporcionado por un engrane de un solo diente.

Otra versión de la misma idea apareció en 1789, en una compilación de instrumentos registradores realizada por Erzgebirge. El pluviómetro, propuesto por Christian Gotthold Hermann, tenía doce botellas en círculo sobre un disco horizontal, y las ponía sucesivamente bajo el embudo colector gracias a un sistema de relojería que las mantenía en posición durante una hora.

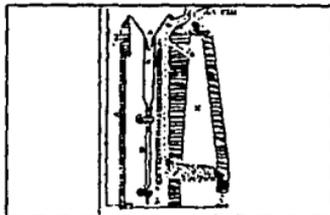
Es interesante notar que, en el s. XVII, el interés por la pluviometría no estaba fundado ni en las necesidades agrícolas ni en las de ingeniería, sino en un interés puramente académico sobre el origen de los ríos y los manantiales, cuestión que, de hecho, databa de épocas clásicas. El meollo del asunto estaba en la duda respecto a que el agua caída como lluvia o nieve fuera suficiente para cubrir el gasto de los ríos. Pierre Perrault, en su "De l'origin des fontaines" describe las primeras observaciones sistemáticas de la precipitación pluvial en Europa y de paso, aunque sin describir el instrumento usado en ellas, demuestra que dicha precipitación era más que suficiente para mantener un río.

Un trabajo similar, si bien con la ventaja de describir el pluviómetro utilizado, fue publicado por Edme Mariott. Este usó un colector de dos pies cuadrados de área que fue expuesto a la lluvia sobre un soporte, a seis pies de una ventana cercana al techo de una casa, y un tubo llevaba el agua de lluvia a un vaso del que muy poca podía evaporarse. Una construcción básicamente igual fue usada por Philippe de la Hire en el Observatorio de París, donde el pluviómetro era un recipiente de cuatro pies cuadrados y seis pulgadas de profundidad, con el fondo ligeramente inclinado hacia una esquina, de modo que el agua pasara por un corto tubo a un cántaro. Después de cada lluvia, el agua era medida en un pequeño vaso cúbico.

Entretanto, se realizaban observaciones en Inglaterra, primero por parte de Richard Townley y en su propia casa, usando como pluviómetro un túnel (sic) de doce pulgadas de diámetro con un tubo de plomo para descargar en un recipiente en su habitación. Medía el agua con un vaso cilíndrico que había sido graduado por peso. Townley fue el primero en publicar totales mensuales y en proponer la creación de diversos centros de observación

en otras zonas de Inglaterra, lo que no parece haber ocurrido en su tiempo. Sólo en 1695 comenzaron en el Colegio Gresham, de Londres, a realizarse observaciones y mediciones que se publicarían anónimamente dos años después (atribuibles, sin embargo, a Harry Hunt, "operador" para la Royal Society de 1676 a 1696). Observadores cuyos instrumentos representaron extremos en sus dimensiones fueron el rev. Horsley de Widdrington, quien usó un embudo de treinta pulgadas de diámetro para sus observaciones, y Roger Pickering, cuyo "ombrómetro" consistía en un embudo de sólo una pulgada cuadrada descargando directamente en un tubo graduado de vidrio y de casi ½ pulgada de diámetro. De hecho, un tubo graduado como parte integral del instrumento había sido usado ya por Johann George Leutmann, sólo que el embudo de éste tenía una

área de un pie cuadrado, y el tubo estaba graduado en libras y medias onzas. Evidentemente, Leutmann prefería dar sus resultados en libras de agua/pie cuadrado. Como los inviernos eran duros en su villorrio, cercano a Wittemberg, Leutmann previó además un sistema para impedir que el embudo de captación fuera bloqueado por nieve o hielo. Este consistía en una torre de piedra tan alta como el instrumento, y de ancho tal que el embudo la cubriera por completo. A un lado debía construirse un horno de un pie de ancho y suficientemente alto para mantener un fuego por doce horas. de haberse construido, este aparato debió ser el primer pluviómetro calentado.



Ilustr. III-2: "Pluviómetro calentado" de Leutmann

Durante los siguientes treinta años, casi todo el mundo pareció satisfecho con aceptar el liderazgo de la Academia de París. Grischow reportaría después que la precipitación pluvial sólo empezó a medirse en Berlín en 1728, pero además parece ser el primero en notar que la nieve captada por los instrumentos era nuevamente expelida fuera de ellos cuando el viento era fuerte. Y la primera propuesta para resolver ese problema fue elaborada por Pieter van Musschembrock, quien sugirió el empleo de pluviómetros de latón, de un pie cuadrado de área, con lados de ocho pulgadas de alto y con el fondo en forma piramidal. Esto evitó ya las pérdidas de nieve reciente casi por completo, pero de paso, aunque

esto sería comprendido mucho más tarde, minimizó también las pérdidas de lluvia por salpicaduras. Una propuesta distinta sería elaborada en 1776 por Henry Cavendish mientras describía los instrumentos usados por la Royal Society. En este caso, el recipiente del agua era un embudo cónico, reforzado en su parte alta por un anillo de latón y de doce pulgadas de diámetro, cuyas paredes se inclinaban 65 grados respecto a la horizontal. Con esta inclinación, escribió Cavendish,

*"... no parece haber probabilidad ni de que ninguna lluvia que caiga en el embudo pueda salpicarse fuera, o de que alguna que caiga fuera pueda salpicarse dentro del embudo"*

Dentro del mismo orden de ideas, dos propuestas para impedir las pérdidas por salpicadura aparecieron en los 1790's. John Goug, filósofo ciego, había propuesto utilizar embudos de lino cuya salida estuviera costreñida dentro del recipiente colector. Thomas Garnett, por su parte, propuso usar embudos con paredes altas y perpendiculares y, de paso, prefirió también los recipientes rectangulares, pensando que el viento tenía efectos más definidos en los cilíndricos.

Fue hasta 1840 cuando empezaron a emplearse prácticamente ideas similares. J. Quetelet, en Bélgica, utilizó embudos con paredes muy altas, diseñados para capturar nieve. Su eficacia al medir lluvias ligeras, en cambio, dejaba mucho que desear dada su gran superficie de evaporación. Sin embargo, pudo establecer la conveniencia de dejar el interior de los recipientes sin pintar, ya que las paredes pintadas propician la adherencia de grandes gotas que, eventualmente, se evaporan. En 1842 el Ingeniero en Iluminación Thomas Stevenson redescubrió el interés de la pluviometría para la Ingeniería y la agricultura, al margen de la importancia para la "INTERESANTE PERO INCIERTA CIENCIA DE LA METEOROLOGÍA", realizando además una excelente discusión acerca de los modelos conocidos entonces de pluviómetros y proponiendo por su parte dos formas de ellos con las bocas al nivel del césped, propuestas que no sólo no tuvieron el éxito esperado, sino que, al decir de un observador posterior llamado G. J. Symons, "... SU EFICIENCIA MAYOR ESTABA EN LA

RECOLECCIÓN DE INSECTOS". De todas formas, fue por esa época cuando el problema de la altura sobre el nivel del suelo a la que debían colocarse los pluviómetros para minimizar la acción del viento en la cantidad de agua recogida se hizo patente. Así se llegó a establecer una norma por encima "del césped corto" en las Islas Británicas, si bien en la mayor parte de los países nevados esa altura sobre el suelo llegó a variar entre los 70 y los 200 cm. Porque además, para entonces, ya se sabía que la recolección de nieve presentaba dificultades específicas, tanto que en 1788 se había fabricado una tabla de diez pies de extensión para ser colocada en los jardines de la Academia de Berlín, con una regla de latón en su centro. Sin embargo, incluso Franz Carl Achard, su creador, debió reconocer que era casi inútil en tiempo airoso. En su descargo, vale decir, de todos modos, hasta 1960 no se había inventado todavía un instrumento al efecto que satisficiera a todos. Colectar nieve en pluviómetros normales, incluso con paredes profundas, es poco satisfactorio debido a los efectos del viento, y sólo en 1878 F. E. Nipher inventó un dispositivo que, de hecho, ha sido desde entonces el mejor sujeto de investigación y mejoramiento de que se dispone. Su característica principal es el llamado "escudo de Nipher", que consiste en un cono invertido del que la parte alta -la más ancha- está alineada con malla de alambre, la que se extiende a un anillo horizontal. Esta malla previene las salpicaduras casi por completo, y la estructura general, de líneas aerodinámicas, hacen del dispositivo una opción muy adecuada, pese a que sigue presentando dificultades con la nieve, particularmente con la húmeda.

## EL VECTOPLUVIOMETRO

Un vectoplúviómetro es un instrumento diseñado para determinar de dónde viene la lluvia, o la distribución de la misma en varias direcciones, o ambos. Puede intentarse indicar el ángulo promedio de caída de las gotas, o medir la cantidad de agua proveniente de cierto número de direcciones. El primero del que se tiene noticia fue diseñado por un instrumentista de nombre Kerr. El aparato tenía dos aberturas circulares, una vertical y la otra horizontal. La vertical siempre estaba de cara al viento gracias a la acción de una veleta, en tanto que un tubo partiendo de cada colector descargaba en dos conjuntos concéntricos de ocho contenedores. Luego, en 1837, Rev. Thomas Knox describió un

instrumento similar, pero éste tenía sólo el colector vertical y un conjunto de contenedores. Un diseño completamente distinto fue propuesto por el geólogo John Phillips en 1840. Este aparato, sin partes móviles, era un simple conjunto de 5 pluviómetros: uno en su posición vertical normal y los otros de cara a los puntos cardinales. De la cantidad de agua colectada por cada uno podía calcularse la dirección y la inclinación promedio de las gotas de lluvia. Por cierto, a pesar del interés que esta clase de información podría despertar en los constructores, los vectoplúviómetros han sido poco utilizados.

### PLUVIOMETROS REGISTRADORES

Como es lógico, el interés fundamental de los pluviómetros, como de cualquier otro instrumento meteorológico, es registrar el comportamiento del fenómeno estudiado como una función del tiempo, graficando para ello dicho comportamiento en cartas al efecto. De esta clase de instrumentos pueden definirse dos tipos principales: los pluviómetros de flotación, en que un flotador que sube con el nivel del agua en el recipiente mueve el lápiz de registro, y aquellos en que el peso del agua colectada es usado de alguna forma para realizar el registro. Una subdivisión histórica más fina de estos instrumentos puede darse en los siguientes términos:

#### a) Pluviómetros de flotador

- El registro limitado por la capacidad de la cámara del flotador, sin previsión automática para vaciarla ni para cruzar el papel repetidamente.
- Registro limitado por la capacidad de la cámara, pero con arreglos mecánicos para regresar el lápiz a cero una o más veces.
- La cámara del flotador se vacía automáticamente en un nivel predeterminado, normalmente por efecto de un sifón, regresando el lápiz a cero.

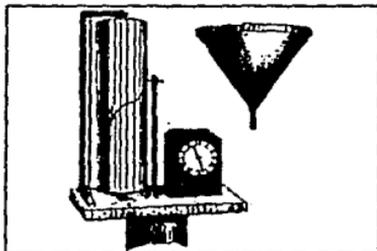
**b) Pluviómetros de balanza.**

- El registro limitado por la capacidad del recipiente en que el agua es colectada.
- El vaso colector es vaciado con un sifón cuando se llena regresando el lápiz a cero.
- El recipiente volcante ("Tipping-Bucket").

Aunque resulta difícil de entender, los pluviómetros de recipiente volcante debieran ser subclasificados en aquellos cuya medición corresponde a un llenado de recipiente (Bucket), y aquellos en los que el recipiente es pesado constantemente mientras se llena, usando la volcadura (Tipping) sólo para regresar el lápiz a cero.

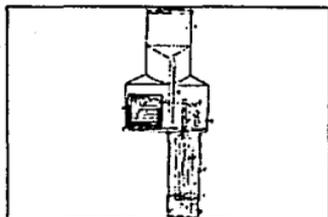
**PLUVIOMETROS DE FLOTADOR**

Aparte de una referencia dada por John Hyacinte Magellan en 1782 a un instrumento que debería realizar registros pluviométricos y que aparentemente nunca fue construido, la primera versión de un instrumento de este tipo fue la de Bevan, de 1827, en la que la cámara del flotador debía vaciarse a mano. Este diseño no admite mejoras sustanciales y el siguiente intento al respecto era un poco más versátil. Este, primer representante del tipo ab), formó parte de un meteorógrafo y consistía en un embudo de un pie cuadrado que llevaba el agua colectada a una cámara donde el flotador, conforme ascendía, provocaba que un extremo de la palanca que operaba al brazo de la pluma se deslizara a lo largo de uno de los 6 planos



Ilustr. III-3: Pluviómetro de flotador de Bevan (1827).

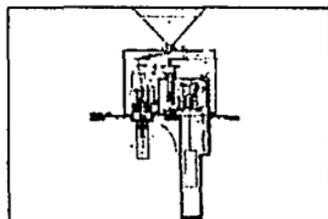
que subdividían la cámara hasta que salía de lado, cayendo en el plano inferior y regresando la pluma a cero.



Ilustr. III-4: Hystógrafo de Halliwell (1907).

El Hystógrafo de F. L. Halliwell fue un desarrollo más sofisticado de la misma idea y era además de construcción sencilla. El descenso de la pluma después de cada media pulgada de lluvia caída era amortiguado por un depósito de aceite.

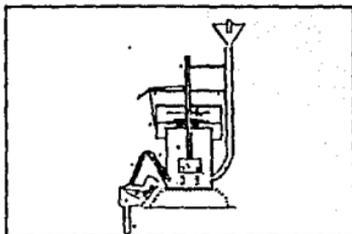
El tercer subtipo de pluviómetros de flotador es el que contiene la mayor cantidad de ejemplos. El primero parece haber sido el diseñado por Robert Beckley y descrito a la Asociación Británica en 1869. Sólidamente construido en hierro, un mecanismo de relojería bien protegido del agua activaba el giro de la carta de registro. El flotador era un cilindro de hierro flotando en un baño de mercurio y que tenía sólidamente sujeto el brazo de la pluma. El agua colectada por un embudo era llevada a una cámara apoyada también en el cilindro. Conforme la cámara se llenaba, su peso hacía descender al conjunto hasta que, en un momento dado, se activaba un mecanismo de sifón que vaciaba por completo la cámara, con lo que ésta, el cilindro y la pluma volvían a su posición original. El fabricante de este instrumento fue, finalmente, James Hicks, que lo incluyó en su catálogo.



Ilustr. III-5: Pluviómetro registrador de Beckley (1869)

El problema fundamental en esta clase de aparatos era conseguir que el mecanismo de sifón vaciara por completo y rápidamente la cámara al llegar a cierto nivel. Para 1875 había ya varias soluciones ingeniosas, pero en 1886 la firma Richard Frères envió a G.J. Symons un pluviómetro de sifón que Symons devolvió porque no se vaciaba completamente. El encargado de corregir el problema fue Jules Richard, y su solución consistió en un electroimán que, cuando habían caído 0.4

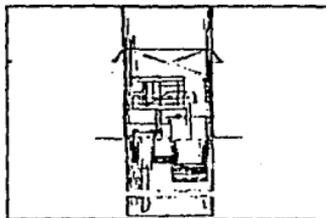
pulgadas de lluvia, le daba un fuerte empujón al flotador de modo que el flujo de salida comenzaba rápidamente. Por supuesto, el requerimiento de una batería se oponía al éxito de la idea. Un esquema más simple fue propuesto por Gustav Hellman, en Alemania y fabricada por la firma berlinesa de Fuess. Su característica más importante era la longitud del tubo de descarga del sifón, hecho de cristal delgado. En Inglaterra, por otra parte, F. L.



Ilustr. III-6: Pluviómetro registrador de Palazzo (1906)

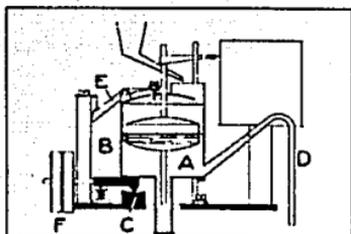
Halliwell (ya mencionado) patentó en 1901 un pluviómetro en el que el flotador, en lo alto de su carrera, liberaba un gancho que dejaba caer al sifón. El extremo corto de éste, sumergido en un sello de mercurio, iniciaba el flujo de inmediato. Luego, en 1906, L. Palazzo desarrolló su propio sistema que consistía en que las primeras gotas del sifón caían en un balde dentro de una cámara cerrada. El balde descargaba rápidamente a través de un tubo y la succión resultante iniciaba el flujo completo. El mecanismo de reloj estaba montado alrededor de la varilla del flotador y el registro era hecho en coordenadas cartesianas.

Otro invento de Halliwell, fabricado luego por Negretti & Zambra, tenía un sifón coaxial. La parte superior del tubo externo estaba formada por una cubierta cóncava de vidrio pulido. La parte superior del grueso tubo de descarga formaba con el vidrio una abertura anular muy estrecha, si bien suficiente para expulsar el agua rápidamente.



Ilustr. III-7: Pluviómetro de sifón natural (fabricado por Negretti & Zambra).

Para terminar con este tipo de instrumentos, es digno de mención el diseñado por W. H. Dines, en el cual la cámara del flotador, el mismo flotador y el sifón estaban montados sobre soportes afilados. Cuando el flotador llegaba al tope de su recorrido, golpeaba una palanca conectada con un gatillo que liberaba el conjunto completo y le permitía caer de golpe hacia un lado de modo que se expulsara agua

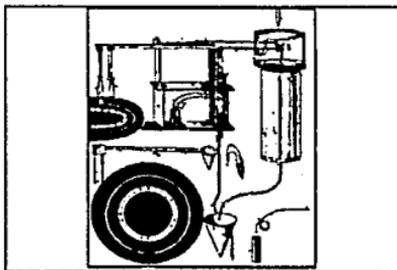


Ilustr. III-8: Pluviómetro de sifón de Dines

suficiente para que el flotador volviera al cero. En este punto un contrapeso devolvía el conjunto a la posición original, donde era sujetado de nuevo por el gatillo hasta que el flotador lo volviera a liberar. Un paso de la pluma por el papel correspondía a 0.2 pulgadas (5 mm) de lluvia.

### PLUVIOMETROS DE BALANZA (EXCEPTO "DE RECIPIENTE VOLCANTE")

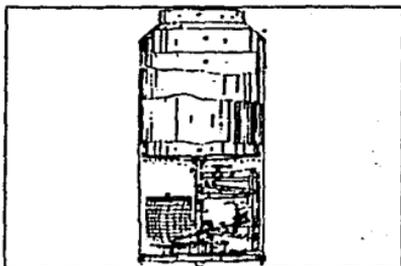
Un aparato ingenioso, que debía registrar la cantidad y la duración de las precipitaciones gracias al peso del agua colectada fue descrito en 1782 por Marsiglio Landriani. La carta de registro era un disco que giraba a razón de una vuelta cada veinticuatro horas. Cuando pasaba agua por la manguera conectada a la descarga del embudo colector, una pluma era apoyada en el disco, señalando en éste no sólo la duración, sino el período específico en que el agua había estado cayendo. Por otro lado, cada vez que el vaso primario de colección se llenaba, un mecanismo de sifón lo vaciaba en otro recipiente cuyo peso presionaba otra pluma y que era vaciado inmediatamente después por otro sifón.



Ilustr. III-9: Registrador de Landriani (1782).

Como resultado de la necesidad de disponer de un pluviómetro capaz de registrar cualquier tipo de precipitación atmosférica, S. P. Ferguson desarrolló en el Observatorio de Blue Hill el que sería el primer pluviómetro de balanza. La lluvia o la nieve pasaban a través de una abertura de ocho pulgadas y eran colectadas en un depósito apoyado en una

balanza de muelle especialmente diseñada. Dos palancas aseguraban el movimiento lineal del brazo que llevaba la pluma. El diseño de la boca del pluviómetro y la adición de un depósito de glicerina reducían las oscilaciones causadas por el viento, y en el verano se podía colocar un embudo en la boca del aparato para prevenir la evaporación.



Ilustr. III-10: Pluviómetro registrador de Fergusson.

Alrededor de 1890 surge el primer instrumento de este tipo que funcionó eléctricamente. Inventado por C. F. Marvin, de la Oficina del Clima de los Estados Unidos. Al parecer, consistía en una báscula que sostenía en su plato el recipiente colector, y una pesa se movía sobre el brazo gracias a un trinquete activado cuando era necesario restablecer el equilibrio. Al mismo tiempo, una pluma se movía en correspondencia con el desplazamiento de la pesa y lo señalaba en un tambor activado por un mecanismo de reloj.

## PLUVIOMETROS DE RECIPIENTE VOLCANTE

El diseño básico de esta clase de instrumentos consiste en un vaso colector que, una vez lleno, se vuelca para vaciarse y luego vuelve a su posición original. La primera vez que este dispositivo se utilizó en un pluviómetro fue por cuenta del multicitado Wren, y dos diseños al respecto fueron realizados en 1670 por Robert Hooke. El primero de estos últimos consistía en un vaso cuyo centro de gravedad se modificaba conforme se llenaba hasta volcarse. La adición de un contrapeso hecho con una cadena de balas de plomo bastaba para asegurar que la volcadura se diera bajo control y que el recipiente volviera a su posición original. El inconveniente de esta idea era que el movimiento era convulsivo y no continuo. Por eso Hooke propuso, en su segundo diseño, que el contrapeso fuera un cilindro inmerso en algún tipo de fluido, de modo que el vaso, al volcarse, lo hiciera emerger poco a poco hasta llegar al punto de vaciado, y luego volviera suavemente a la vertical.

Aparentemente, estos diseños fueron utilizados por Hooke en lo que sería su "reloj del clima", que se comentará más adelante.

El siguiente pluviómetro de este tipo apareció en 1827, y fue el primero en funcionar con varios "recipientes autovolcables" (tres) y un mecanismo de engranes para contar. La descripción, hecha por John Taylor, indica que los vasos eran sostenidos por fricción, de modo que probablemente el instrumento no haya llegado a funcionar a satisfacción.

Una idea distinta para llenar-vaciar-llenar recipientes fue aplicada casi simultáneamente en Suiza e Inglaterra entre 1829 y 1830, si bien el método había sido propuesto en 1738. Se trataba de un par de recipientes en forma de prismas puestos espalda con espalda y montados en un mecanismo oscilatorio. En Suiza, Johann Kaspar Horner utilizó este dispositivo de modo que cada ciclo completo (los dos vasos llenos y vueltos a vaciar una vez) avanzaba un mecanismo de reloj que contaba el número de volcaduras. En Inglaterra el diseño fue esencialmente el mismo, excepto por el arreglo de los engranajes de conteo, y se le atribuye a Samuel Crosley.

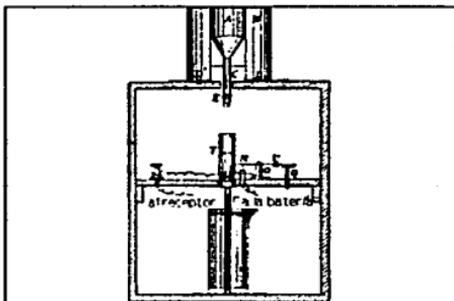
Más avanzado el s. XIX se introdujeron dos innovaciones. En una de ellas, los recipientes activaban, al volcarse, un tornillo que impulsaba la pluma registradora; en la otra, cada volcadura conectaba por un momento un interruptor eléctrico, encendiendo a distancia un electroimán que operaba un contador o una pluma.

Una mejora considerable en los métodos de registro que, sin embargo, no fue nunca suficientemente aprovechada, fue introducida en 1889 por A. Sprung y R. Fuess, alemanes, que construyeron un instrumento en el que el papel de registro no era movido por un sistema normal de relojería, sino por uno que sólo avanzaba cuando el pluviómetro enviaba un pulso, excepto por un pequeñísimo desplazamiento para fijar el cambio de período. En resumen, si no había lluvia se gastaban sólo cinco centímetros de papel al día, cantidad que aumentaba proporcionalmente a la duración de las precipitaciones. Una versión de este eficiente aparato de registro estuvo en uso hasta mediados de los 1950's para el estudio

de tormentas en el Observatorio de Kew (India), en el que se utilizaba un tambor rotatorio que recibía una marca cada minuto que pasaba. La distancia entre marcas indicaba la cantidad de lluvia caída en ese minuto, de modo que, si no había lluvia, el tambor no se movía.

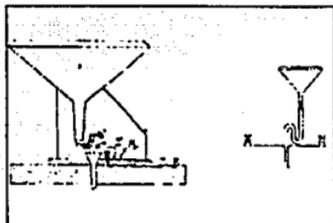
El paso siguiente a la determinación de la cantidad de agua precipitada por unidad de tiempo era establecer el porcentaje de ésta debida a diferentes intensidades de precipitación. Si bien en principio es posible obtener esta información de las gráficas producidas por casi cualquier tipo de pluviógrafo, en la práctica no resulta factible lograr una escala adecuada para lluvia fuerte que sea legible en lloviznas. Por eso debieron fabricarse instrumentos especiales para el registro de la tasa de lluvia, los que fueron en general de dos tipos, que se describen a continuación.

El primero consistía fundamentalmente en cuentagotas. A través de diversos mecanismos se procuraba que el agua colectada tomara la forma de gotas de tamaño constante que, al caer dentro del aparato, accionaban alguna clase de dispositivo mecánico o eléctrico que registraba el evento. Si la frecuencia del goteo era proporcional a la intensidad de la lluvia y el medio de registro se desplazaba con regularidad, la cercanía entre las marcas podía utilizarse para determinar la distribución en el tiempo de las intensidades de precipitación e, incluso, el intervalo preciso en que se daba.



Ilustr. III-11: Registrador de intensidad de lluvia de Binnie (1892).

Instrumentos de esta índole fueron propuestos sucesivamente por W. J. Binnie en 1892, W. Gallenkamp en 1905 (por cierto, uno de estos estuvo al menos hasta 1955 en el Observatorio Kew), y Sprung en 1907.

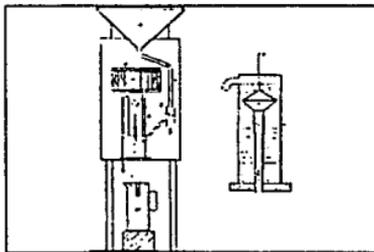


Ilustr. III-12: Cuentagotas de Gallempack (1905) y modificación de Sprung (1907).

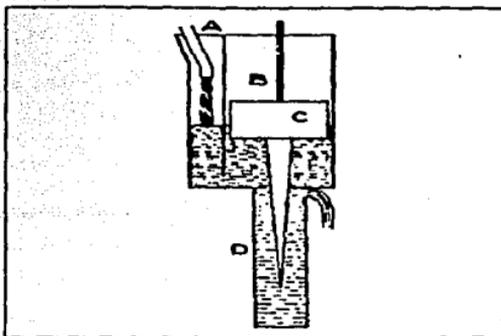
El segundo tipo basaba su funcionamiento en el gasto a través de una cámara con flotador. El agua colectada llegaba a la cámara, de la que sólo podía salir a través de un orificio practicado en alguna parte. Mientras más fuerte era la precipitación mayor era el gasto y, por tanto, la cámara se llenaba más, elevando el flotador. Este llevaba normalmente fija una pluma o algún mecanismo que dependía de él y que realizaba el registro de los flujos.

Diseñadores de este tipo de instrumentos fueron Gallempack y Jardí en la década de 1900 1910.

Es conveniente mencionar aquí, de paso, un registrador de tasa de lluvia que no pertenece a ninguno de los tipos anteriores, pero sí es ingenioso y simple. Descrito en 1853 por P. H. Madle, consistía simplemente en un pluviómetro común, excepto porque el embudo de colección tenía descarga horizontal y el recipiente estaba dividido internamente en una serie de compartimientos. A medida que la lluvia era más fuerte, la descarga del embudo alcanzaba compartimientos más lejanos, de modo que era posible determinar, al final de un período, cuánta lluvia había caído y qué porción de ella se debía a distintas intensidades normalizadas de precipitación.



Ilustr. III-13: Versión posterior del registrador de Gallempack (1908).



Ilustr. III-14: Registrador de intensidad de lluvia de Jardí.

## EVAPORIMETRO

Una vez que se conoce cuánta agua ha precipitado y sabiendo que de ésta una parte va a parar a ríos y mares, y otra vuelve a ascender en forma de vapor, el interés por evaluar cuantitativamente este último fenómeno apareció casi obligadamente. El primer intento por estimar la cantidad de agua evaporada de los océanos se dio en 1687 cuando Edmond Halley colgó de una balanza una cacerola con agua que puso durante cierto tiempo a una temperatura ambiente similar a la del aire en verano, y trató de extrapolar sus resultados al sistema terrestre completo. Un aparato similar, que llevaba el nombre de "exatmosphopium" o de "evaporatorium" fue diseñado por Leutmann en 1725, mientras Stephen Hales pesaba cacerolas pulidas llenas de tierra para estimar la evaporación desde el suelo.

El primer evaporímetro inspirado en el principio del pluviómetro fue diseñado por G. W. Richmann, petersburgués que llamó a su instrumento "atmómetro" o "atmidómetro", que

lo consideró un mero ejercicio de diseño y que dudaba, con fundamento en sus propias observaciones, de que cualquier experimento realizado en recipientes pequeños pudiera aplicarse a ríos y mares. De hecho, durante todo el resto del s. XVIII se dieron varios intentos por establecer reglas que gobernarán la evaporación en recipientes de tamaños, formas y materiales distintos, pero los resultados no fueron buenos. De ahí el escaso interés que presenta la descripción de muchos de los pequeños evaporímetros que se desarrollaron por la época. Con todo, puede decirse en general que se trata de dos tipos de instrumentos: los que utilizan una superficie de agua y que pueden leerse por peso, nivel del líquido o medición volumétrica de la cantidad de agua que debe agregarse para devolver el nivel a una marca fiable; y los que miden la evaporación desde superficies porosas de tela o papel.

Un evaporímetro que funcionaba por peso podía hacerlo como registrador. Pietro Moscati, de Milán, describió en 1781 un aparato que tenía en un extremo de un brazo un cazo con agua y en el otro extremo un contrapeso que, conforme el peso del agua en el cazo descendía, señalaba en una escala la magnitud de la evaporación. Este aparato, con una pluma en el mismo extremo que el contrapeso y una carta plana movida lateralmente por un mecanismo de reloj se transformó un poco más tarde en el probable primer atmógrafo. Un siglo después, G. W. Hough, de Albany, N. Y., aplicó el mismo principio, con la sofisticación de usar un servomecanismo eléctrico, pero el aparato no dio mejores resultados ni más útiles que el de Moscati.

El aparato oficial distribuido por la Sociedad Meteorológica de Mannheim era una caja cúbica de latón con una ventana en un costado para que el nivel del agua pudiera ser medido con una escala fija en el exterior, y diseños que incluían tubos exteriores de vidrio "suficientemente amplios para no modificar las lecturas por capilaridad" fueron realizados por Achard y Luke Howard. Diseños que pretendían además proteger el agua de cambios bruscos de temperatura incluyeron vasos de plomo con compartimientos internos y cajas de latón en el centro de amplias cajas de tierra, como los realizados por Richmann y Herculanus Schwaiger. Finalmente, con el tiempo resultó claro que la idea más precisa respecto

a la evaporación real la darían tanques amplios, tanto como fuera posible y hundidos en el suelo. Con todo, durante cierto tiempo las estadísticas comúnmente aceptadas indicaban que la evaporación anual era superior a la precipitación. Por 1839, además, se inventó el dispositivo ideal para realizar mediciones sobre evaporímetros de tanque amplio. El diseño es de Uriah A. Boyden, de Massachusetts, y se conoce como evaporímetro de gancho. En él, una punta es colocada bajo la superficie del agua; la coincidencia de la punta con la superficie era fácilmente observada y podía obtenerse con facilidad una precisión de centésimas de milímetro.

Para terminar, puede mencionarse otra clase de evaporímetros: los que pretendían considerar en sus mediciones el agua perdida a través de la hojas y los tallos de las plantas. John Leslie y Angelo Bellami, por separado y con algunos años de diferencia, trataron de diseñar aparatos con esa característica, y usando para ello materiales porosos en superficies de evaporación esféricas o planas. De ese modo, el aparato de Leslie podía simular la evaporación de los frutos y los tallos de las plantas, mientras el de Bellami simulaba la de la parte superior de una hoja. En 1872 Albert Piche de Pau, en los Pirineos, habló a sus colegas de un "atmismómetro" que podía representar a una hoja en su totalidad, porque la evaporación tenía lugar desde un disco de papel de filtro cubriendo la parte inferior, abierta, de un tubo graduado. El papel, que tenía una minúscula perforación al centro, debía sostenerse en su lugar por la presión del aire, pero se agregó un broche de latón por seguridad. El evaporímetro de Piche fue de hecho es- extensamente usado por agricultores y silvicultores desde entonces.

## IV.- HIGROMETROS

La medición de humedad atmosférica es el proceso de dar números a las sensaciones de "húmedo" y "seco", o mejor, a las propiedades del aire responsables de tales sensaciones. Los primeros instrumentos inventados con ese propósito fueron desarrollados mucho antes de que se tuviera una idea clara de cuáles eran esas propiedades. Los antiguos griegos y los hebreos, por ejemplo, tenían una idea bastante aproximada del ciclo hidrológico, esto es, de la elevación del agua de la Tierra y del mar y su regreso en forma de precipitación. La dificultad era que un estado del proceso no era observable visualmente, y lo natural fue suponer que en ese estado el agua se convertía en aire. Esta idea de la interconvertibilidad del aire y el agua fue mantenida por Aristóteles, que consideraba que el vapor invisible estaba hecho "de aire formado de agua", aunque reconocía que las nubes estaban hechas de gotas de agua.

Sólo en el s. XVII resultó claro que el vapor de agua era una sustancia distinta, como resultado en buena medida de la influencia de René Descartes, que creía que todas las sustancias estaban compuestas de partículas pequeñas, todas del mismo tipo de materia, y que eran distinguibles gracias a las formas y tamaños de sus partículas constitutivas. Si bien esto constituyó un importante avance intelectual, surgió de él la necesidad -supuesta- de encontrar mecanismos que evitaran que las partículas difusas de agua volvieran a caer, dado que el pensamiento de esa época no podía asimilar que el aire húmedo fuera más ligero que el seco a la misma temperatura y presión. Ni siquiera la afirmación categórica que Sir Isaac Newton hizo al respecto en 1717 recibió atención durante décadas, ya que parecía evidente que la adición de cualquier cosa al aire (agua incluida) debía hacerlo más pesado. La misma idea prevaleció incluso después de 1738, cuando Daniel Bernoulli estableció su teoría cinética de los gases.

Jean André Deluc fue un destacado defensor de la teoría de que el vapor de agua era un compuesto químico de agua y "fuego" (calor), sustancia extremadamente tenue y casi enteramente sin peso. Lavoisier también apoyaba esa idea y, por los 1800, ya sólo una minoría aceptaba que el vapor fuera una solución de agua en aire.

Por 1790 ya estaba establecido el principio de que el vapor de agua tenía las propiedades de los gases, "y las ejerce en completa independencia de otros fluidos". En otras palabras:

*"el producto de la evaporación es siempre de la misma naturaleza: un fluido expansible, el cual, ya sea solo o mezclado con aire, afecta al manómetro en presión y al higrómetro en humedad, sin ninguna diferencia apreciable por la presencia o ausencia de aire".*

Por la época, Dalton estaba también estudiando el vapor de agua y, a partir de resultados alcanzados por Newton, definitivamente malinterpretados, llegó a la conclusión de que, en una mezcla cualquiera de gases (incluso el vapor de agua), las partículas de cada uno se mantenían independientes de todas las demás. Este desbarre del famoso químico tuvo, sin embargo, sorprendente aceptación, incluso entre quienes podían haber notado la incongruencia de su razonamiento. De todas formas, incluso ahora su nombre aparece ligado a la termodinámica en una ley de aditividad, si bien ésta se limita a la presión de gases y la presión de vapor en el mismo espacio.

Hablando ya de instrumentos diseñados para la medición de humedad atmosférica, podemos referirnos básicamente a los siguientes tipos, que se presentaron históricamente:

- a) Los que dependían de las propiedades higroscópicas de varias sustancias (la capacidad de los cuerpos para absorber humedad o no de su entorno).
- b) Los que dependían de la formación de una película sobre una superficie que pudiera ser enfriada artificialmente.
- c) Los que dependían de la reducción de temperatura producida por la evaporación de una superficie húmeda (psicrómetros).
- d) Aquellos en que la humedad era tomada de un volumen conocido de aire y pesada o medida de alguna otra manera (Higrómetros de absorción).
- e) Los que dependían de otras propiedades físicas.

La invención del higrómetro suele atribuirse, en los libros de texto, a Leonardo Da Vinci, a pesar de que nació dos años después de que Nicolas Cryfts de Cues terminara un trabajo en el que aparecía el siguiente pasaje:

*"Si alguien colgara un buen montón de lana seca, atada junta al extremo de un par de escalas y las equilibrara con piedras en el otro extremo, se notaría que el peso de la lana se incrementaría cuando el aire llegara con humedad, y se decrementaría cuando el aire llegara seco. A partir de esa diferencia, la persona podría pesar el aire y hacer conjeturas acerca de un probable cambio en el clima..." (1452).*

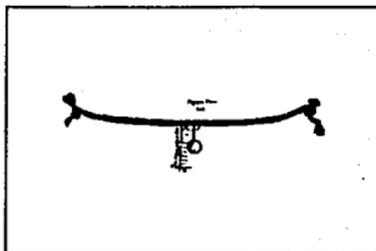
Esa referencia, que contiene una clara descripción de un higrómetro anterior incluso al nacimiento de Leonardo, deshabilita a éste como pretendiente al título de inventor del instrumento. Sin embargo, sí existen dos dibujos suyos de higrómetros de este tipo, que están preservados en el Codex Atlanticus. Uno representa una esponja contrabalanceada por un peso, y está acompañado por una nota que puede traducirse como "medios de pesar el aire y encontrar cuándo el clima romperá".

Volviendo a nuestra clasificación, los Higrómetros higroscópicos pueden subdividirse todavía en dos tipos:

- a) Aquellos que absorben la humedad que existe en el medio ambiente e incrementan su peso.
- b) Aquellos en los que los cambios en sus dimensiones o en su forma son los indicadores de esta variación en la humedad.

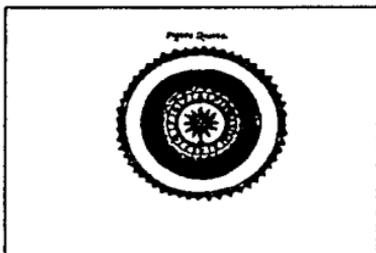
Un ejemplo típico de ellos es el Higrómetro de cuerda (Santorio Santorre, 1612). Este, al estar colgado por sus dos extremos en forma horizontal sobre un muro o pared, y con un peso en su centro, experimentaba un incremento en su espesor al absorber la humedad.

en la que se encontraba sumergido y, por ende, una tensión en sus extremos que elevaba el peso en su centro, en tanto que se presentaba una elongación al disminuir el nivel de humedad. Esto se debe a que las fibras de las cuales esta hecha la cuerda se "hinchaban" y acortaban al absorber la humedad y se contraen al ir disminuyendo. La pesa servía como indicador de la cantidad de humedad que reinaba en el medio en ese momento dependiendo de la altura a la que se encontrara. El problema en este tipo de instrumentos era que muchas veces el viento influía en las lecturas ya que éste traía, dependiendo de su dirección, mayor o menor cantidad de humedad.

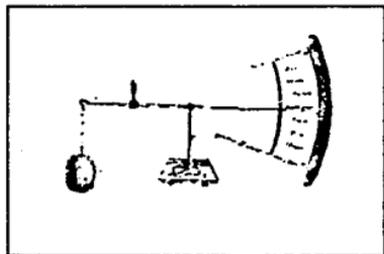


Ilustr. IV-1: Primer higrómetro de cuerda de Santorio.

Otro tipo de Higrómetro es el de William Arderon, el cual consistía en una esponja sujeta en un extremo de una aguja balanceada con unas pequeñas cadenitas para mantener un poco de equilibrio, y el otro extremo señalaba sobre una escala qué tan húmedo se encontraba el aire (1736).



Ilustr. IV-2: Segundo higrómetro de cuerda de Santorio.



Ilustr. IV-3: Higrómetro de Arderon (1736)

De este tipo de Higrómetros existen muchas variantes, entre ellas se encuentran los Higrómetros de Desaguliers y Hales (1744), Conier (1675), y otros más. Hooke fabricó otro tipo de Higrómetros y su funcionamiento se debía a la propiedad que tienen algunas plantas de cambiar su forma dependiendo de la cantidad de humedad a la que se veían sometidas. Instrumentos basados en el mismo principio son los

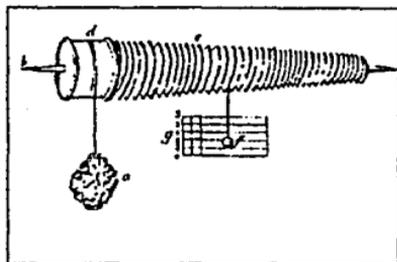
fabricados por Molyneux (1685), Kater y Robinson (1820), De Saussure, Deluc, Richer (1789), Babinet (1824), por citar algunos. En estos instrumentos no sólo se utilizaban plantas sino también el cabello humano, el cual es muy delgado y es bastante resistente en comparación con sus dimensiones. Algunas plantas al absorber la humedad tienden a enroscarse, es decir, a girar sobre ellas mismas y este movimiento se podía transmitir a una aguja que giraba, y la cantidad de humedad absorbida era proporcional a la cantidad de vueltas que daba la aguja.

De entre otros instrumentos que también utilizaban al cabello humano como medio de observación, podemos citar al de De Saussure, que utilizaba un cabello en tensión, el cual, dependiendo de cuánta humedad absorbía del medio ambiente, se tensaba más o menos; este incremento o decremento en la tensión transmitía un movimiento a unos engranes, que a su vez lo transmitían a una aguja que servía de indicador.

También se fabricaron instrumentos que dependían no sólo de un cabello sino de tres y hasta de ocho cabellos para dar una mejor exactitud en las lecturas.

Otro Higrómetro que cabe mencionar es el de Gould, que utilizaba una cuerda atada en un extremo a una base y la otra a una esfera de metal, la cual a su vez estaba unida a una aguja que se movía en forma circular dependiendo de qué tanto se estirara la cuerda. Esta cuerda era pasada por varias poleas para tener una mayor elongación o tensión por unidad de longitud.

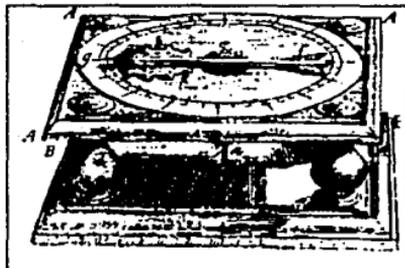
## HIGROMETROS DE CONDENSACION



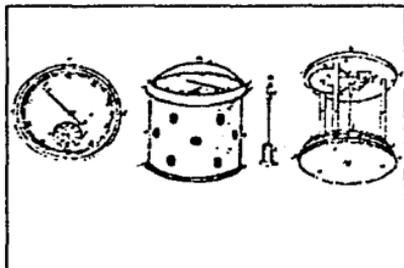
Ilustr. IV-4: Higrometro de Desaguliers y Males (1744)

En 1655 Fernando II, Gran Duque de Toscana, observó la condensación que se producía en el exterior de un vaso de agua que contenía hielo y de esta observación construyó un instrumento que pudiera cuantificar la cantidad de agua que se condensaba en cierto tiempo. Colocó una vasija que terminaba su parte inferior en punta llena de hielo en pedacitos pequeños, y la asentó sobre una base de

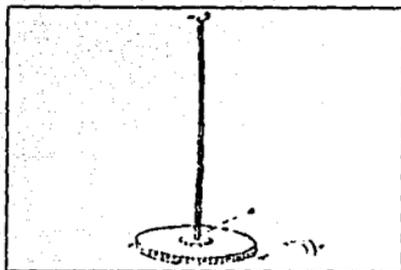
tres pies colocando bajo de la vasija otro recipiente más pequeño en el cual se iba a recolectar el líquido obtenido por la condensación.



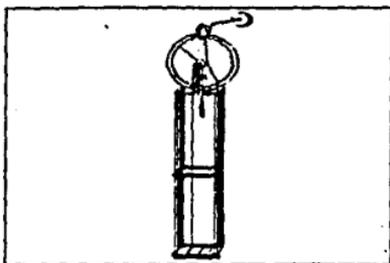
Ilustr. IV-5: Higrometro de 'barba de avena' de Hooke



Ilustr. IV-6: Higrometro de Kater (hecho por Robinson en 1820)



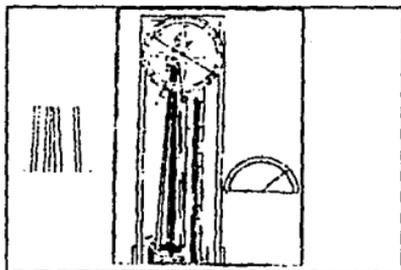
Ilustr. IV-7: Higrómetro de Molineux (1685)



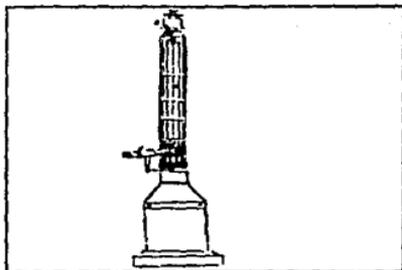
Ilustr. IV-8: Higrómetro de hueso de ballena de Deluc.

Al realizar el experimento encontró que en un minuto se condensaban alrededor de 13 gotas de líquido.

A partir de este se siguió trabajando y experimentando con diferentes recipientes y les empezó a dar escalas para poder cuantificar la cantidad de humedad que reinaba en el entorno. También se observó que existía una temperatura a la cual ya no se condensaba el aire. Se intentó encontrar esta temperatura, que se suponía que tenía una relación con la cantidad de humedad en la atmósfera en la que se encontraba. Estos son los Higrómetros de punto de condensación (Dew point).



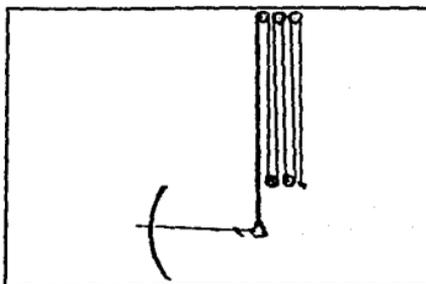
Ilustr. IV-9: Higrómetro de Richer con ocho cabellos



Ilustr. IV-10: Higrómetro de Babinet.

Entre estos instrumentos se encuentran los siguientes:

- Higrometro de Daniell.
- Higrometro de Regnault.
- Higrometro de Alluard.
- Higrometro de Belli.
- Higrometro de G. Dines (1871).

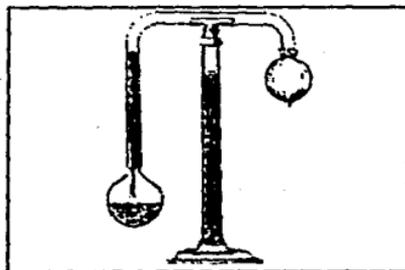


Ilustr. IV-11: Higrometro de Goult.

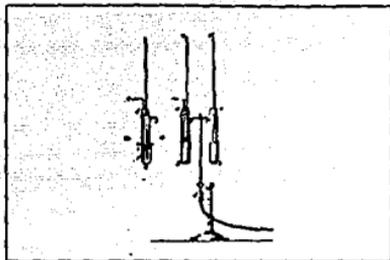
Todos estos Higrometros coinciden en el principio de funcionamiento, el cual era el de tomar la lectura de un termómetro en el instante en el que se presentaba la condensación del aire.



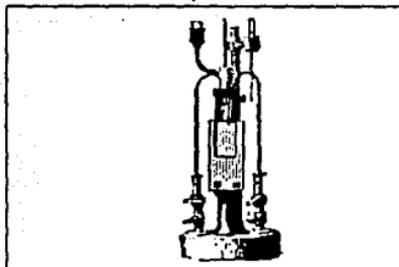
Ilustr. IV-12: Primer higrometro de condensación (1835)



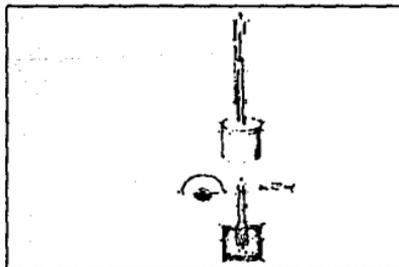
Ilustr. IV-13: Higrometro de punto de rocío de Daniell.



Ilustr. IV-14: Higrómetro de Regnault de punta de rocío.



Ilustr. IV-15: Higrómetro de punta de rocío de Alluard



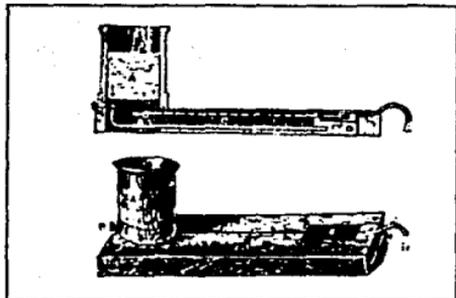
Ilustr. IV-16: Higrómetro de Bell de punta de rocío

### HIGROMETROS QUE DEPENDEN DE LA EVAPORACION EN UNA SUPERFICIE HUMEDA (PSICROMETROS)

Antes que nada, es importante recordar que la evaporación constituye un medio natural de enfriamiento, dado que, entre más líquido es evaporado de una superficie húmeda, mayor es la pérdida de calor de esa superficie. Además, es evidente que la velocidad de dicha evaporación dependerá del grado de humedad ya presente en la atmósfera circundante. Este fenómeno fue observado por Michael Christoph Hanow, de Danzing, que en 1756 publicó un escrito en que llegaba a las conclusiones anotadas, de modo que:

*"el enfriamiento tiene lugar más notablemente si (1) el aire no está húmedo, sino muy seco; (2) cualquier otra masa de aire fresco viene a reemplazar al viejo; o (3) en el mismo tipo de aire la evaporación es mantenida por mucho tiempo; y (4) el*

*material a enfriar, junto con su película de agua es mucho más caliente que el aire en el que la evaporación tiene lugar. Pero si el aire ya está suficientemente húmedo o lleno de vapor, incluso si es renovado por el viento o de alguna otra forma... muy poco enfriamiento puede resultar'.*

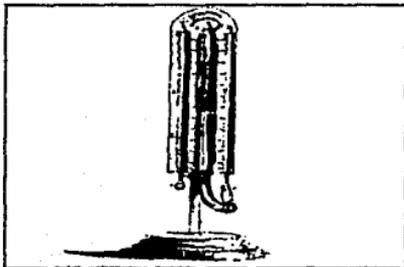


Ilustr. IV-17: Higrómetro de punto de rocío de G. Dines (1871).

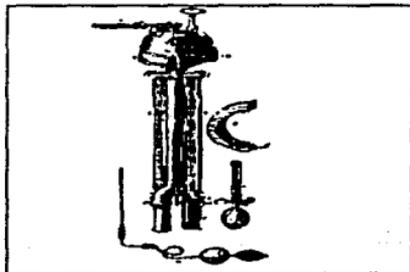
Hanow describe además, varias aplicaciones prácticas para este fenómeno, pero un higrómetro no es una de ellas.

De hecho, el primer hombre que se valió de este fenómeno para medir la humedad del aire parece que fue el famoso geólogo escocés James Hutton, quien observó, al trabajar con un termómetro cuyo bulbo humedecía previamente, que el descenso de temperatura que se observa-

ba en él parecía proporcional a la falta de humedad del aire y permitía, por lo tanto, establecer una medición de esa variable.



Ilustr. IV-18: Higrómetro de Mason (1836)



Ilustr. IV-19: Psicrómetro de Assmann (1892).

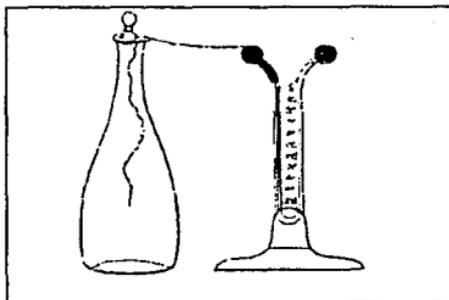
John Leslie, también escocés, percibió en 1790 la conveniencia de disponer de dos termómetros juntos, uno con el bulbo seco y el otro húmedo, de manera que se pudieran comparar las temperaturas de ambos en el mismo instante. La diferencia de estas temperaturas era, según pudo establecer, inversamente proporcional al grado de humedad que el medio ambiente presentaba. Tiempo después, en 1815, una teoría completa acerca de la dinámica del bulbo húmedo, fue presentada a la Academia de Ciencias en París por Louis

Joseph Gay-Lussac, quien sin embargo pensó que los higrómetros de bulbo húmedo exigirían la creación y el uso de tablas muy extensas y que, por tanto, los higrómetros de condensación serían más útiles. Fue hasta 1822 cuando James Ivory desarrolló una teoría del bulbo húmedo con utilidad para la meteorología, y tres años después Ernst Ferdinand August, de Berlín, llegó por su cuenta a los mismos resultados. Además, fue suya la idea de llamar "psicrómetro" (algo así como "triómetro") a los higrómetros con base en este principio.

Otros instrumentos similares fueron desarrollados por: John Abraham Mason (1836), Regnault en los 1840's, James Glaisher en Inglaterra, y Richard Assmann, en 1892 y cuyo instrumento es con mucho el mejor de este tipo.

## OTROS INSTRUMENTOS

Existen una gran cantidad de maheas para medir humedad, pero ninguna parece haber llevado al diseño de instrumentos verdaderamente útiles para la meteorología, si se exceptúan los sensores eléctricos en uso desde hace pocos años. Por ejemplo Alessandro Volta propuso un instrumento para medir la humedad del entorno, utilizando un electrómetro observando el tiempo que tardaba en descargarse desde una marca previamente establecida hasta otra al drenar esta carga a través de alguna sustancia higroscópica. Luego, en 1871, E.H. von Baumhauer, describió un instrumento de registro fotográfico que funcionaba bajo el principio de un hidrómetro flotando en un baño de aceite. A través de éste se conducía aire en volumen conocido y, la humedad era absorbida por ácido sulfúrico dentro del cuerpo del higrómetro. El registro representaba la integral en el tiempo de la humedad por unidad de volumen.



Ilustr. IV-20: Termómetro diferencial de Leslie como higrómetro (1799).

Un principio alternativo que hubiera podido usarse en un higrómetro de absorción, es la medición de la caída de presión provocada por la eliminación de vapor de agua de un volumen sellado. La dificultad al respecto es evitar que los cambios de temperatura falseen los pequeños cambios en presión.

## V.- VELOCIDAD Y DIRECCION DEL VIENTO

La dirección del viento es una de las características climáticas más fácilmente observables, y por supuesto han existido instrumentos para realizar esas observaciones objetivamente al menos por 2.000 años. La medición de su fuerza, por otra parte, es una habilidad que apareció mucho después, y el registro de estas características sólo fue logrado durante el siglo XVII.

Es interesante notar que las referencias históricas y míticas a los vientos consideran cantidades diversas de direcciones posibles. En la Biblia y los poemas homéricos se habla sólo de cuatro; en Babilonia se conocía la Rosa de los Vientos de ocho puntas; en Grecia y Roma clásicas se conocían doce, si bien se usaba ocasionalmente la Rosa de ocho puntas. La introducción de la brújula marinera con su horizonte dividido en ocho, dieciséis y treinta y dos direcciones le dio a este formato el éxito definitivo y la nomenclatura actual, que utiliza las iniciales de los nombres compuestos de esas direcciones (N, NE, NNE -norte, noreste, nor-noreste-, etc.) data de 1536. Los instrumentos que se han desarrollado históricamente para conocer las características del viento son esencialmente de tres tipos: indicadores de dirección (veletas), indicadores de fuerza (anemómetros) e indicadores mixtos. El desarrollo que sigue se da aproximadamente bajo una organización similar.

### VELETAS

Las veletas (indicación de dirección), evidentemente, aparecieron primero. En Atenas, alrededor del 100 A. C., Andronicus de Cyrrha construyó

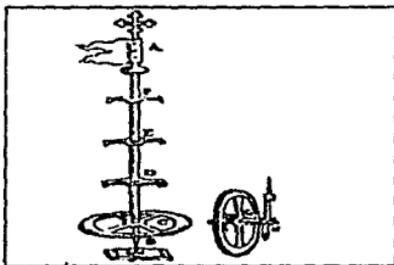
*"... una torre octagonal de mármol y, sobre los varios lados del octágono, tenía representaciones de los vientos, grabados opuestos a sus varias corrientes. Y sobre la torre ordenó que se hiciera un remate de mármol y sobre éste colocó un Tritón de bronce sosteniendo una vara en su mano derecha. Lo hizo de mane-*

*ra que fuera movido por el viento, y siempre encaraba la corriente de aire, y sostenía la vara como indicador sobre la representación del viento que soplabá"*

(Marcus Vitrubius Pollio, "De architectura libri decem")

Esta Torre de los Vientos fue construida en realidad para alojar un reloj de agua que daría lecturas sobre varias de las ocho caras. Un poco después, Marcus Terentius Varro tuvo su propia veleta en su granja, con la particularidad de que la dirección del viento podía observarse desde dentro de un cuarto que tenía los indicadores en el techo.

Desde entonces hasta la Edad Media, las veletas alcanzaron gran popularidad, si bien su valor era más artístico que práctico, ya que sólo se movían -al menos la mayor parte de ellas- cuando el viento era bastante fuerte. La primera modificación significativa desde Terrentius debió esperar hasta 1578, cuando Egnatio Danti, profesor de Astronomía en Bolonia, fabricó una que indicaba la dirección del viento en un disco vertical. Muy poco después Jacob Leoupold introdujo una serie de mejoras a este aparato, pero sin modificarlo esencialmente.

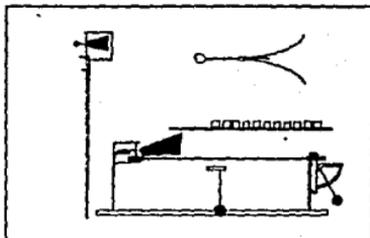


Ilustr. V-1 Instrumento vertical de Danti (1578).

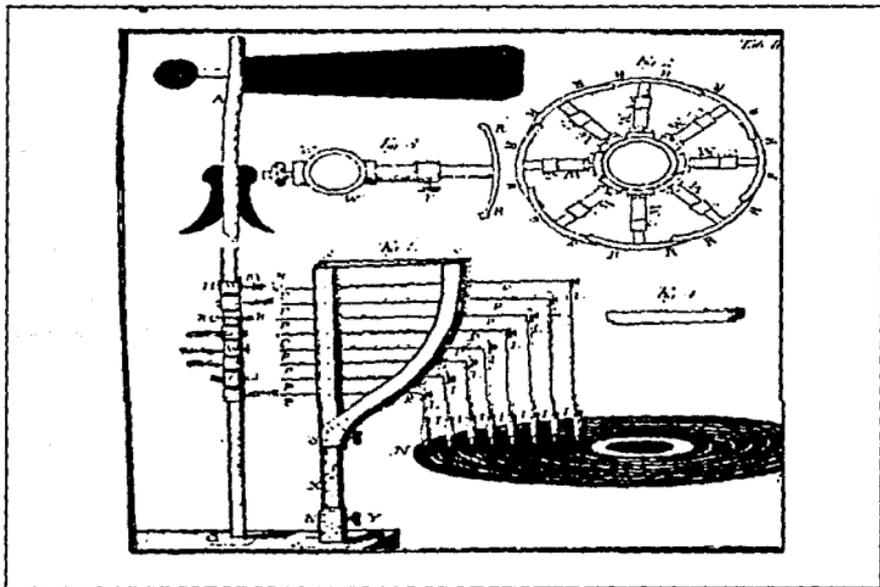
El primer cambio realizado en la forma de la veleta en sí misma, que hasta entonces había sido completamente plana, fue realizado por G. F. Parrot en 1797. Primero, la adición de un contrapeso para equilibrar el dispositivo y asegurar su giro sin rozamientos excesivos, y luego el uso de dos placas divergentes en lugar de la única usual para incrementar la magnitud del momento generado en el aparato por el viento. Por alguna razón no documentada, Parrot propuso que las placas tuvieran, además, una curvatura cicloidal, pero las veletas "divergentes"

terminaron popularizándose con las placas planas y siendo muy utilizadas hasta que el desarrollo de la aeronáutica (s. XX) terminó imponiendo el uso de perfiles aerodinámicos.

Una exagerada estimación de la importancia meteorológica de la inclinación del viento respecto a la horizontal originó, durante el siglo XVIII, una es-



Ilustr. V-2 Veleta de placas divergentes de Parrot (1797).



Ilustr. V-3 Registrador de dirección de viento de Landriani (1797)

pecie de manía por construir veletas que pudieran indicar también esa característica. Franz Carl Achard, de la Academia de Berlín, J. F. Benzenberg y Hyacinte Carena realizaron diseños por separado, pero fundados todos en el misma idea básica: una veletita girando sobre un eje horizontal que a su vez era una prolongación de la "cola" de una veleta común. En cuanto al registro de la dirección del viento exclusivamente, el primer instrumento reportado fue diseñado por Christopher Wren, que, lo mismo que sus termómetros, pluviómetros y barómetros de registro, diseñó su veleta para incluirla en su proyecto definitivo: el meteorógrafo. Luego, en 1789, Christian Gotthold Herrmann, clérigo en Kämmerwalde (Sajonia) describió una máquina consistente en una rueda dividida en doce compartimientos que giraba impulsada por una veleta. Una vez por hora, un manillo operado por un reloj arrojaba un cubo numerado de una cámara dentro del compartimiento de la rueda correspondiente a la dirección del viento en ese momento. Durante la década siguiente, el conde Marsiglio Landriani desarrolló un instrumento en el que la rueda tenía salientes que activaban uno de los ocho lápices que rozaban un disco operado por un reloj.

En 1837 James H. Coffin construyó un instrumento poco fiable en realidad, pero con el cual el mismo Coffin realizó detalladas observaciones. El aparato consistía en una tolva, que dejaba caer un chorro continuo de arena seca en una caja sujeta al pie de una veleta. Según la posición de ésta, la arena caía en uno de treinta y dos compartimientos y el tiempo que el viento había soplado en la dirección correspondiente podía estimarse por el peso de la arena al final de un período prefijado.

Los primeros registradores de dirección que trataban a ésta como una función continua del tiempo (es decir, que no estaban limitados a un número finito de direcciones preestablecidas) fueron descritos por Jacob Leupold, en el s. XVI, que no llegó a construir físicamente el instrumento, y luego por Karl Kreil, de Praga, en el s. XIX, quien sí materializó su diseño. Este realizaba sus registros sobre una carta plana y la veleta operaba un lápiz moviendo una tuerca sobre un tornillo de giro rápido. Había espacio para dos vueltas completas de la veleta antes

de que el lápiz no pudiera seguir avanzando, y Kreil no consiguió nunca corregir ese defecto. Sustituyendo la carta plana por un tambor rotado por la veleta y moviendo la pluma axialmente por medio de un reloj, F. Pfeiffer en 1868, Daniel Draper alrededor de 1880 y Joseph Baxendal en 1900 obviaron el problema que Kreil no pudo resolver.

Las veletas que indicaban dirección del viento eléctricamente y a distancia empezaron a aparecer cerca de 1850. Un instrumento ingenioso de este tipo fue el de A. Moritz, que usaba sólo tres cables de conexión para indicar 64 puntos. Esto depende de un conjunto de contactos hechos cuando se gira en un sentido y de un conjunto distinto al girar en sentido contrario. El receptor tenía dos electroimanes. Desafortunadamente no había realimentación, de modo que un contacto perdido alteraba todas las indicaciones posteriores.

## ANEMOMETROS

Históricamente y limitándonos a los aparatos de uso meteorológico propiamente dicho, los anemómetros son fundamentalmente de dos clases: los que dependen de la deformación provocada en algún material por la fuerza del viento y los que funcionan al medir la velocidad de rotación (o el número de revoluciones) de un sistema mecánico activado por el mismo. Con más detalle y esquemáticamente se tiene:

- 1) Anemómetros de presión
  - a) De plato oscilante
  - b) De plato normal
  - c) Anemómetros "retenidos"
  - d) De tubo de presión

## 2) Anemómetros de rotación

- a) Con eje horizontal
- b) Con eje vertical

## ANEMOMETROS DE PLATO OSCILANTE

El primer anemómetro de que se tiene noticia es precisamente de este tipo y fue descrito e ilustrado alrededor de 1450 por León Battista Alberti. Consistía en una pequeña tabla oscilante encarada al viento por una veleta y cuya deflexión podía leerse sobre un arco de circunferencia graduado. El siguiente instrumento que aparece es el diseñado por Leonardo Da Vinci quien, por cierto, suele ser considerado el inventor original del anemómetro. El hecho es que en alguno de sus escritos Leonardo se refiere como de pasada al aparato diseñado por Battista. Y luego aparece de nuevo Robert Hooke que, el doce de octubre de 1664 reportó ante la Real Sociedad la fabricación de un instrumento hecho para medir la rapidez del viento. Se trataba de una tabla sujeta a un brazo cuyo otro extremo giraba libremente alrededor de un pivote. Al soplar el viento, la tabla y el brazo se elevaban relativamente y la lectura se hacía sobre un arco de circunferencia graduado y vertical. Muy parecido era el "anemoscopio" de Roger Pickering, sólo que mucho mayor y con la adición de un mecanismo de trinquete para indicar la velocidad máxima del viento.

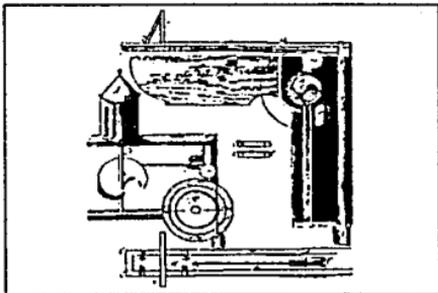
A finales del s. XVIII, el abate Antonio María Vassalli-Eandi utilizó el plato oscilante en un instrumento de registro. Su plato era de un metro cuadrado y se encaraba al viento gracias a una enorme veleta de dos metros cuadrados. Una cuerda unida al plato llevaba un lápiz rojo

a lo largo de un tambor rotado una vez cada treinta horas. La veleta activaba además un mecanismo que causaba que uno de treinta y dos lápices negros presionara el tambor a 180° del rojo que registraba la velocidad del viento.

Fue Michael Christoph Hanov, de Hanzing, quien descubrió que el "plato oscilante" no tenía que ser un plato. A partir de observaciones realizadas en diciembre de 1713, Hanov desarrolló expresiones analíticas para determinar la fuerza del viento sobre superficies esféricas de cualquier área, lo que permitía utilizar bolas de metal como cuerpos oscilantes -o flotantes-. Esta idea fue aprovechada un siglo después por Sir Charles Wheatstone en el diseño de un tejado doblemente parabólico, con cinco o seis anillos conductores y una esfera colgando de un alambre en el punto de unión de las parábolas. El anillo superior debía estar dividido en ocho o en dieciséis partes para dar la dirección del viento.

#### ANEMOMETROS DE PLATO NORMAL

En esta clase de instrumentos se utiliza también un cuerpo que reciba la fuerza del aire, pero ahora ese cuerpo permanece todo el tiempo perpendicular a la dirección del viento y la medición debe hacerse sobre algún dispositivo de deformación lineal. Aparentemente, el primer anemómetro de este tipo fue descrito por Santorio Santorre, en 1625. En 1627 los Estados Generales de Holanda otorgaron a Willem Douglas una patente sobre quince dispositivos, el décimo de los cuales era un instrumento "...para mostrar el incremento y decremento de los vientos proporcionalmente". El multimencionado Leupold también



Ilustr. V-4 Dos anemómetros de Leupold.

presentó algún instrumento de esta clase, el que consistía en un plato colocado contra el viento por una veleta y montado sobre una corredera. La resistencia al desplazamiento estaba dada por un peso actuando sobre una polea espiral.

Una aplicación simple del plato de presión la logró Pierre Bourguer midiendo el viento en el mar. Este anemómetro de mano era un resorte equilibrado con una pieza de cartón de seis pulgadas cuadradas que presionaba una flecha cuadrada dentro de una caja contra la resistencia de un resorte. La escala en la flecha se establecía por calibración con pesos.

Los primeros ingenieros que tomaron consciencia de la relación entre velocidad y presión y comenzaron a hacer experimentos con máquinas giratorias fueron Benjamin Robins y John Smeaton. En San Petersburgo Johann Ernst Zeiher fabricó una máquina giratoria con la que calibró un anemómetro de Bourguer, y en 1783 Richard Lovell Edgeworth reportó, en sus "Experimentos sobre la resistencia del aire" el hecho de que la resistencia ofrecida por el aire a un objeto móvil depende de su forma, así como de su tamaño, y que para superficies de forma similar, la resistencia no es proporcional a su tamaño. Propuestas posteriores incluyeron resistencias calibradas con una balanza romana (Dalberg), columnas variables de líquido (Wilcke), balanzas de cadena (Woltmann), etcétera. Pero un diseño ligeramente posterior y único es el propuesto por Sir George Cayley en 1849. En éste el plato de presión está al final de una barra ligeramente pesada y sujeta a un marco por dos cuerdas, obligando a un movimiento paralelo. La deflexión de una de las cuerdas era leída en un cuadrante.

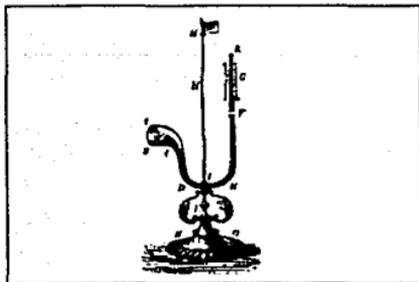
El anemómetro de Goudriaan, por otro lado, es interesante porque incluía un reloj de agua para incorporar la coordenada tiempo en los registros que podía realizar. De hecho, se trataba de una combinación de veleta, anemómetro y pluviómetro que registraba la velocidad del viento en una carta circular y su dirección y los niveles de precipitación en tambores, uno de los cuales funcionaba activado por una veleta y el otro por un flotador. Un plato normal de

presión giraba el disco sobre el cual el lápiz era movido radialmente por el reloj de agua. Otro instrumento del mismo tipo fue diseñado por Follet Oster en Inglaterra, cuyo interés, más que técnico, se deriva del hecho de que estuvo en servicio por muchos años en varios observatorios europeos. Estos dos instrumentos son los primeros anemómetros registradores (o "anemógrafos") a que este repaso se refiere.

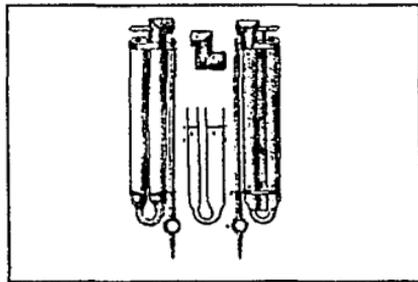
Un diseñador que introdujo varias novedades en los anemómetros de plato normal fue Charles Cator, la más interesante de las cuales fue el arreglo que logró para medir el "recorrido" del viento (la distancia recorrida por la masa de aire en 24 hrs.). Este dispositivo se basaba en un corrimiento del plato de presión sobre el regulador de un reloj especial, de manera que el número de minutos que éste avanzaba indicaba el "recorrido" del viento.

#### ANEMOMETROS DE TUBO DE PRESION

Comenzando apenas el s. XVIII, Pierre Daniel Huet, obispo de Avranches (Normandía), propuso un instrumento que leyera la velocidad del aire en relación a la presión que ejerce



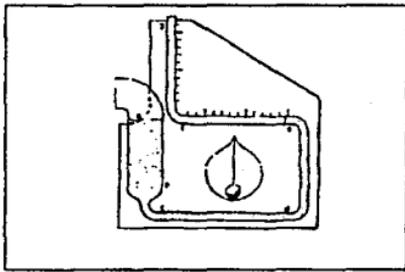
Ilustr. V-5 Anemómetro de Huet.



Ilustr. V-6 Anemómetro de tubo de presión de Lind (1775).

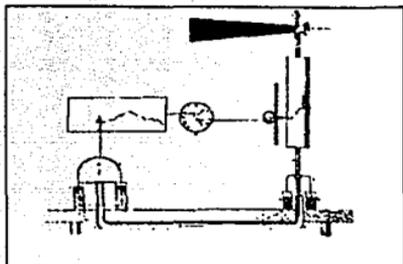
sobre una columna de líquido. Su diseño, sin embargo, parecía un tanto ingenuo: una veleta diminuta y un arreglo mecánico en el eje que no parecía tener razón de ser, además de utilizar como líquido el mercurio, cuyo peso difícilmente hubiera permitido un desplazamiento visible ante vientos normales. Un trabajo muy parecido fue realizado por Stephen Hales en 1743, pero usando agua en vez de mercurio. En realidad, el primero de estos instrumentos que funcionó satisfactoriamente fue el construido por el físico James Lind, de Edimburgo, que no requería de una veleta incorporada porque, si estaba bien instalado, se colocaba contra el viento por sí mismo.

El problema del anemómetro de Lind era que requería de vientos de casi 16 nudos (más de 25 Km/h) para presentar una variación de nivel de 0.1". La modificación que permitió medir brisas ligeras fue propuesta por W. Snow Harris y consistió en incorporar un segmento horizontal al tubo de desplazamiento del líquido, segmento en el cual se presentaba una magnificación de 16:1 respecto a la resolución del instrumento original.



Ilustr. V-7 Modificación de Snow-Harris al anemómetro de Lind (1858)

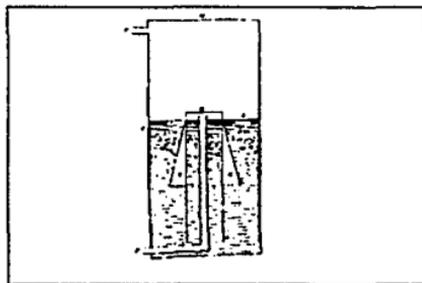
La evolución de estos diseños hacia la anemografía comenzó en 1836, cuando la Sociedad Escocesa de Artes entregó a Richard Adie una medalla por un anemómetro de tubo de presión encarado al viento por una veleta. Un tubo desde la cabeza llegaba al espacio dentro de un cilindro flotante; la fuerza ascendente era reforzada por un peso actuando en una polea espiral... que no provocaba el funcionamiento de ningún medio de registro, pero que sí pretendía "linealizar" la escala. Este aparato no era todavía un anemógrafo, pero el concepto del flotador hueco que aparece por primera vez es esencial en el desarrollo posterior, el primer ejemplo es el "Windautograph" de F. Pfeiffer. Este anemógrafo proporcionaría un registro aproximada-



Ilustr. V-8 Anemógrafo de Piezifer.

mente lineal con la presión del viento, de manera que la deformación del líquido era proporcional al cuadrado de la velocidad del viento. Las variaciones respecto a este comportamiento eran obvias gracias a la forma de campana de la cámara de presión que desplazaba la pluma sobre el papel de registro.

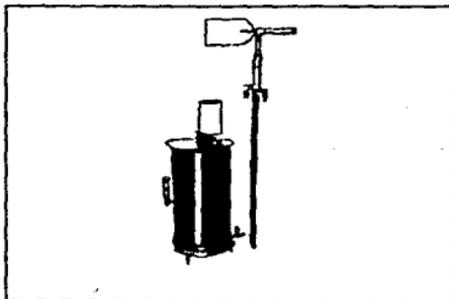
Se ha mencionado de pasada que la presión ejercida por el viento sobre una superficie no es linealmente proporcional a su velocidad. Como los instrumentos de que se ha tratado operaban por presión, es evidente que las escalas usadas en ellos no eran lineales (excepto por el intento de R. Adie). Y como también es evidente que resulta más sencillo trabajar con escalas lineales, debía encontrarse algún medio para linealizar las escalas de los anemómetros. Una solución brillante fue lograda por William Henry Dines en 1890. Manteniendo la comunicación entre el aire exterior y el espacio por encima de un flotador dentro de una cámara al tiempo



Ilustr. V-9 Flotador del anemómetro original de tubo de presión de Dines

que la presión generada por el viento en la cabeza del aparato llegaba al interior del mismo, logró mantener una relación constante entre las presiones dentro y fuera del flotador. La forma de éste, además, es tal que el cambio en su volumen desplazado es proporcional al cuadrado de su desplazamiento lineal desde su posición de equilibrio. Es de notar de la teoría rigurosa de este arreglo se desarrolló apenas en 1936.

El diseño original de Dines sufrió, desde entonces, muchas modificaciones que, en efecto, optimaron su funcionamiento. Participaron en ellas Joseph Baxendall (1903), cuyo sistema de registro demostró ser el más adecuado para esta clase de instrumentos; F. L. Halliwell, quien perfeccionó el sistema mecánico de relación entre los diseños de Dines y Baxendall; J. H. James, que introdujo mejoras también de tipo mecánico en 1918; finalmente, G. L. Taylor quien sugirió también en 1918 la sustitución de la veleta de direccionamiento por un perfil aerodinámico mucho más eficiente. Modificaciones secundarias siguieron realizándose sobre el diseño original hasta 1930 aproximadamente. Desde entonces el aparato casi no se ha modificado, excepto por la adición opcional de dispositivos eléctricos para transmisión de los registros a puntos distantes.



Ilustr. V-10 Anemógrafo de Dines fabricado por Munro (1893)

## ANEMOMETROS DE ROTACION CON EJE HORIZONTAL

Era natural que, si el molino de viento existía en Europa desde el s. XII, su idea fuera utilizada en la fabricación de instrumentos para conocer las características del viento. En 1672-73. Robert Hooke describió un instrumento en el que la fuerza del viento era indicada por el número de vueltas de un molinete que las marcaba en tarjetas gracias a tres perforadores: uno se activaba cada 100 revoluciones, el segundo cada 1000 y el tercero cada 10,000.

El siguiente anemómetro de este tipo, en cambio, no se inspiró en el molino de viento, sino en una rueda de palas. Fue obra del físico ruso Michael Lomonosow, y era la rueda dentro

de una caja estrecha que formaba parte de una veleta. La parte superior de la rueda estaba expuesta al viento y al girar impulsaba a un engrane de un solo diente que a su vez movía uno de 800 dientes que hacía girar uno de 400. Este tenía adosado un tambor sobre el que se arrollaba un cordón que bajaba por el mástil hueco del aparato y que, en otra caja en la parte inferior, hacía girar una rueda con una escala en la que se podía leer la velocidad del viento y, de paso, liberaba el mercurio contenido en un tubo con forma de  $3/4$  de circunferencia. Como todo el conjunto se movía con la veleta, el mercurio caía dentro de una de las treinta y dos cajas individuales que indicaban la dirección del viento. La distribución de velocidad-dirección-tiempo podía obtenerse pesando el mercurio caído en cada caja.

En 1752 se fabricó otro anemómetro del tipo "molino de viento" el que hacía sonar una campana cada seis revoluciones, de manera que la velocidad del viento se conocía contando las campanadas en un periodo determinado. El fabricante fue C. G. Schober.

Fue hasta 1836 cuando apareció otro instrumento digno de mención, si bien poco eficiente aunque se hayan instalado y operado varios de ellos. Diseñado por William Whewell (naturalista, filósofo y matemático), el aparato evidenciaba poca habilidad mecánica al utilizar una rueda de molino muy pequeña y una veleta para encarar el aparato al viento más pequeña aún. El mismo Whewell admitió años después que su anemómetro tenía defectos de diseño que lo hicieron inútil antes o después en cada sitio de instalación. Además, a mediados del s. XIX empezó a manifestarse la definitiva preferencia por los anemómetros de copa para fines



Ilustr. V-11 Anemómetro helicoidal de Dines.

meteorológicos. Sin embargo, es de interés todavía referirse a un diseño de W. H. Dines, cuyo objetivo era lograr un instrumento independiente de la fricción y que, por ende, no requiriera calibración. El aparato, según la descripción del mismo Dines era:

*"...un helicoide fijo al frente, y un pequeño par de velas de tiro variable detrás de una varilla de acero, y justo detrás del helicoide un pequeño ventilador que gira sobre el mismo eje, pero es independiente del helicoide y de las velas. Si la rotación es demasiado rápida, el ventilador gira en la misma dirección que el helicoide y con su movimiento altera el tiro de las velas de modo que el movimiento de éstas es retardado; si, por otro lado, la fricción aumenta, o por cualquier otra causa el movimiento es demasiado lento, el ventilador gira en la misma dirección que el helicoide y la relación se incrementa"*

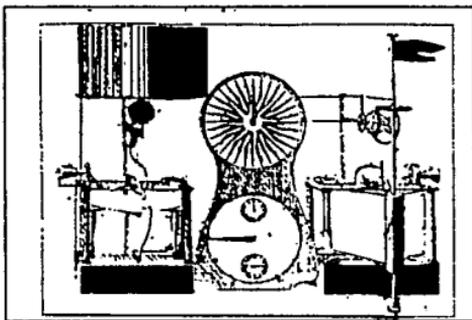
## ANEMOMETROS DE ROTACION CON EJES VERTICALES

Contra lo que podría pensarse, el molino de viento con eje vertical es más antiguo que el que conocemos: los persas lo utilizaban ya en el s. VII, a pesar de lo cual no encontró buena acogida en Europa, excepto en la forma del mecanismo llamado "molino polaco". El primer anemómetro de rotación funcional descrito en imprenta, sin embargo, tenía un eje vertical. Parece haber sido inventado por un fabricante de instrumentos parisino llamado René Grillet, y era un molino de viento horizontal con cuatro velas de lámina unidas por bisagras a dos pares de cruces de madera una encima de la otra. Cada vela podía oscilar tan lejos como quisiera en una dirección, pero una barra que unía las dos cruces evitaba que oscilara en sentido contrario. Por eso, el molino giraba. En la parte inferior de la flecha que atravesaba el techo había un sínfin que hacía girar dos ruedas de 100 y de 101 vueltas cuyos ejes, concéntricos, señalaban en una escala hasta 10,000 giros del molino. Usando una pieza de

relojería se podía medir la velocidad del viento, en tanto que la dirección la indicaba un puntero unido al eje de una veleta y suficientemente largo para señalar un punto sobre una rosa de los vientos que rodeaba a la escala de velocidad.

Quizá la aplicación más famosa de este tipo de molino sea la que realizó el general Louis Jean Pajot d'Ons-en-Bray, jefe de Correos de Luis XV, y que en realidad diseñó y construyó un aparato de dos instrumen-

tos. El anemómetro estaba basado en el mencionado "molino polaco", que consistía en un conjunto exterior de láminas estacionarias que dirigían el viento hacia un conjunto giratorio interior. Este paquete se suponía montado sobre un tejado. Una flecha bajaba hasta un piñón de veintidós dientes que movía un engrane de ochenta y cuatro dientes, en el eje del cual había un sinfín que hacía girar un mecanismo a razón de 1:400 respecto al



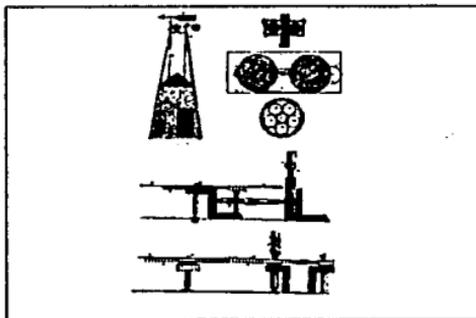
Ilustr. V-12 Anemógrafo de D'Ons-en-Bray.

molino, el cual accionaba una palanca en cada rotación. Una tira de papel ahulado era enrollada entre un carrete y otro controlado por reloj. A cada rotación, la palanca hacía una marca cerca de la parte alta de la banda. Como ésta no se desplazaba uniformemente (ya que se iba arrollando sobre el carrete giratorio), d'Ons-en-Bray dispuso otra palanca que hiciera una marca cada cuarto o cada media hora, según se deseara. El mecanismo para registrar la dirección del viento era similar, excepto porque el papel era mucho más ancho y la marca del tiempo hecha cerca de su extremo. La veleta hacía girar su eje, que movía un puntero sobre la carátula de direcciones a través de un sistema de tres pares de engranajes, y un cilindro con treinta y dos puntas arregladas en una hélice de una vuelta y apoyadas cada una en un

resorte. Según la posición de la veleta, una o dos de esas puntas eran presionadas contra el papel que se movía, trazando una línea horizontal en éste, de manera que la dirección del viento podía determinarse con precisión de  $1/64$  de circunferencia (menos de  $6^\circ$ ). El instrumento era claramente una extravagancia de diseño, al grado que un siglo después se pensaba que no podía haber sido construido. Pero lo fue, y de hecho se le conserva como el instrumento de registro más antiguo y uno de los más importantes del s. XVIII en el Conservatorio Nacional de Artes y Oficios, en París.

El anemómetro de copas fue inventado en 1846 por el astrónomo irlandés Thomas Romney Robinson y modificó por completo el "estado del arte" en cuanto se refería a los anemómetros de rotación, si bien el mismo Robinson admitió que la rueda de copas le había sido sugerida años antes por Richard Lovell Edgeworth, quien había construido en 1793 un molino de viento con un contador. El aparato tenía cuatro aspas ligeras que hacían girar un tornillo sinfín que hacía girar dos engranes, con  $n$  y  $n + 1$  dientes, respectivamente, de modo que un marcador en el primero pasaba un diente del segundo cada  $n$  revoluciones. Este sistema sería después ampliamente aplicado en los Estados Unidos para contar los giros de los anemómetros de copas. Por cierto, las ventajas de éstos son su considerable potencia de torsión, su movimiento relativamente lento en comparación con la velocidad del viento, que no necesitan

encararse al viento y, finalmente, que son fáciles de duplicar con toda precisión. Robinson, además, diseñó su aparato para registrar por separado velocidad y dirección del viento en



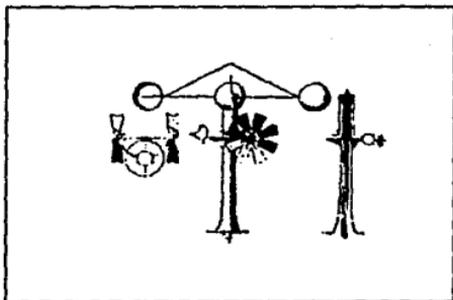
Ilustr. V-13 Anemómetro y veleta registradora de Robinson (1850).

cartas circulares, sobre las que los lápices se movían radialmente por medio de mecanismos de reloj.

Si la idea general de Robinson fue excelente, no lo fue en cambio su estudio de los detalles mecánicos en que se basaba su funcionamiento. Tras algunos experimentos, Robinson concluyó que los centros de los hemisferios que eran las copas se movían, excepto por el efecto de la fricción, a un tercio de la velocidad del viento, y por muchos años las estadísticas en Estados Unidos e Inglaterra fueron manejadas en base a esta relación. Pero en 1872 el Rev. Fenwick Stow publicó sus comparaciones de ocho anemómetros de copa de varios tamaños, y los resultados fueron irreconciliables por completo con la teoría en boga. Y en 1874, tras experimentos mucho más elaborados, F. Dohrandt, de San Petersburgo, probó que la velocidad del viento debía expresarse como una función cuadrática de la tasa de rotación "n" ( $v = a + bn + cn^2$ ), si bien la porción lineal de la misma función era una buena aproximación. Midiendo la "constante" de Robinson en anemómetros de copa fabricados por seis casas distintas, halló valores que oscilaban entre 2.09 y 3.08. Y en 1895 Charles Cheese llegó a la conclusión de que la "constante del anemómetro" no tenía por qué ser independiente de la velocidad del viento. Con todo, el aparato siguió en uso y, por tanto, refinándose con consecutivas aportaciones.

Uno de los más importantes diseñadores que participaron en el perfeccionamiento del anemómetro de copas fue Robert Beckley, en 1856, que introdujo los ejes concéntricos para la veleta y el anemómetro en sí. De paso, modificó los medios de registro para realizarlo sobre tambores giratorios. Con la modificación de James Hicks, quien logró ejes más ligeros para el aparato, se dieron las condiciones para que éste fuera adoptado por el Comité Meteorológico de la Real Sociedad, que se convertiría después en el Consejo Meteorológico y que sería el precursor de la actual Oficina Meteorológica inglesa.

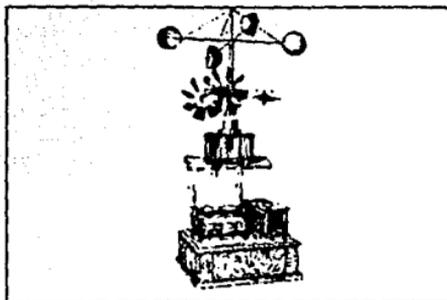
La aparición del anemómetro de copas coincidió con el interés que despertaba por la misma época el electromagnetismo, de manera que era casi obligado aplicar esta nueva ciencia al instrumento en cuestión. Uno de los primeros anemógrafos eléctricos fue instalado en el Observatorio del Colegio Jesuita en Roma por el astrónomo Angelo Secchi, quien hizo que un electroimán moviera un lápiz en escalones durante una hora, después de la cual otro electroimán operado por reloj regresaba el lápiz a su posición original. Simultáneamente, la dirección del viento era registrada por interruptores operados por la veleta del instrumento.



Ilustr. V-14 Anemómetro de Beckley (parte externa)

La ventaja de esta manera de medir el "recorrido" del viento es que la velocidad promedio de éste puede obtenerse de inmediato por inspección simple. Una idea más sencilla es hacer que un interruptor en el anemómetro haga una marca en un papel móvil, como lo hizo Jules Salleron para el Observatorio de Módena. El anemógrafo hacía una marca cada 200 revoluciones.

Un instrumento que fue completamente distinto en concepción a cualquier otro a que nos hayamos referido es el "anemocinégrafo", que permitía indicar o registrar la velocidad instantánea del viento con un anemómetro de copas. Desarrollado por Richard Frères, el anemocinégrafo depende del equilibrio de dos velocidades angulares, en la que la rueda de copas hace girar mecánica o eléctricamente a una velocidad proporcional a la del viento a una rueda dentada que está adosada a un tornillo sinfín. Por otro lado, un plato circular gira a velocidad constante movido por un reloj y arrastra por fricción a otro plato más pequeño normal a su superficie y cuya velocidad de giro depende, evidentemente, de su distancia al centro del plato

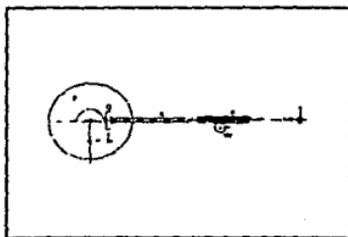


Ilustr. V-15 Versión posterior del anemómetro de Beckley (1867).

mayor. El eje del plato pequeño puede desplazarse longitudinalmente y en él está torneado el sinfín al que se acaba de hacer referencia. Si la rueda dentada movida por el anemómetro gira a velocidad adecuada respecto a la del plato menor -por lo tanto a la de su eje y con él la del sinfín-, el desplazamiento longitudinal de éste se ve compensado por su engranaje con la rueda dentada. Cuando la velocidad no es adecuada,

el eje se desliza hacia el eje del plato mayor o alejándose de él, hasta que la velocidad angular del plato menor equilibra el requerimiento del anemómetro. Agregando al dispositivo un puntero o un lápiz en el extremo libre del eje puede conocerse, en efecto, la velocidad instantánea del viento.

Para terminar con esta clase de instrumentos, las copas se hicieron sucesivamente más pequeñas y ligeras, pero continuaron siendo cuatro por instrumento hasta que en 1926 John Patterson, del Servicio Meteorológico de Canadá, demostró con sus experimentos en túnel de viento que la forma óptima debía contener sólo tres copas.



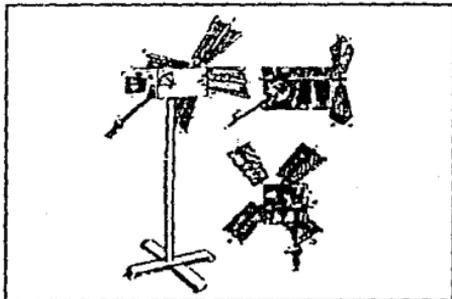
Ilustr. V-16 Anemocinégrafo.

## ANEMOMETROS DE ROTACION RESTRINGIDA ("RETENIDOS")

La característica fundamental de esta clase de instrumentos es que la rotación que el viento debería producir está limitada a una deflexión angular. El primer anemómetro de este tipo fue descrito en 1709 por el filósofo Christian Wolff, profesor de Matemáticas y Física en la Universidad de Halle. En él un molino de cuatro aspas activaba un sinfín que movía una rueda dentada que acarrearba el indicador sobre un cuadrante escalado. La rueda, por otro lado, estaba contrapesada por una barra que a su vez sostenía un peso ajustable. Cuando el viento hacía girar el molino, éste giraba el gusano que hacía girar la rueda sólo hasta que el peso levantado equilibraba el sistema. Cuando el viento se debilitaba y el molino perdía fuerza de torsión, la posición de la rueda dentada no se alteraba, ya que no podía hacer girar el sinfín y las aspas, que simplemente dejaban de moverse. La indicación, pues, sólo podía modificarse cuando el viento era más fuerte y, por tanto, la tendencia a girar del molino superaba a la última registrada. En síntesis, que se trataba de un anemómetro de máxima.

En 1725 Johann Georg Leutmann publicó un pequeño libro en que detallaba sus instrumentos meteorológicos. Uno de ellos era un anemómetro basado en el "molino polaco", cuyo giro era limitado por un cordel que activaba una polea espiral y se enrollaba alrededor de un tambor, cuyo eje

tenía sujeto un apuntador. Este aparato, a diferencia del de Wolff, indicaba la velocidad instantánea del viento. Dejando pasar algunos instrumentos poco importantes, incluyendo uno descrito por Leupold en 1726, el último instrumento objeto de interés fue diseñado en 1880 por



Ilustr. V-17 Anemómetro de Wolff (1709)

Sir G. G. Stockes con el propósito de registrar los valores máximos instantáneos de ráfagas. El aparato estuvo en uso en Holyhead por varios años pero su descripción formal data apenas de 1898. Era activado por una rueda de copas cuyo movimiento era limitado por dos pesos actuando a través de poleas espirales construidas de modo que su radio era proporcional al cuadrado del ángulo de giro y, por lo tanto, éste era linealmente proporcional a la velocidad del viento. Sin embargo, el instrumento no era adecuado para medir vientos ligeros.

No

Exista

Pagina

## VI.- INSTRUMENTOS PARA MEDIR LA DURACION SOLAR.

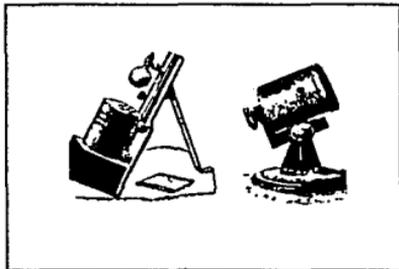
Más que una seria contribución a la teoría meteorológica, el desarrollo de instrumentos para medir la duración e intensidad de los rayos solares fue en un principio un intento de cuantificar la sensación de bienestar que el brillo del sol produce en la gente. Sin embargo, pronto se hizo evidente la necesidad de mantener estadísticas de estas variables para completar las aportaciones que la meteorología puede hacer a las distintas ramas del quehacer humano.

Técnicamente podemos clasificar a los instrumentos desarrollados con este propósito de la siguiente manera:

- Los que producen cambios fotoquímicos por efectos térmicos o solares.
- Los que queman alguna superficie y
- Los que producen un cambio en un termómetro diferencial.

### GRABADORES FOTOGRAFICOS DE LOS RAYOS SOLARES

En enero de 1839, H. Fox Talbot hizo público su proceso de "dibujo fotogénico" en papel, y el método de fotografía en placas metálicas de Mandé Daguerre fue presentado en la Academia de Ciencias por François Arago. Basados en este tipo de adelantos, los instrumentos grabadores fotográficos de rayos solares contenían en su interior ya fuera una placa fotográfica o un papel sensible a la luz. Eran en esencia una cámara (una caja negra, en realidad) dentro de la cual se colocaba el material en el que se iba a grabar la información. (por ejemplo el papel sensible), y se le practicaba una pequeña perforación por



Ilustr. VI-1: Izq. Registrador de luz de sol de McLeod.  
Der. Primer instrumento de James B. Jordan.

la cual la luz entraba. Los rayos solares entraban por este agujero e iban dejando a su paso una línea, a partir de cuya intensidad se podía deducir la potencia con que la luz había incidido sobre la superficie, y dependiendo de cómo se encontrara orientada la cámara, la línea se formaría como una curva o una recta. Autores de dispositivos con esta base fueron el profesor H. McLeod y James B. Jourdan en los 1880's, cada uno de los cuales presentó versiones diversas de sus diseños.

Por lo general la cámara de registro se encontraba orientada de tal forma que por el orificio penetraran los rayos el mayor tiempo posible, y se mantuviera la misma inclinación del sol, para que así se dibujara una línea recta.

Existía el problema de que se tenía que cambiar este papel diariamente, inconveniente

que se procuró solucionar haciendo que el orificio pudiera cambiar de posición en forma ascendente o descendente en la gráfica, y de esta manera se tenían, en un solo papel, diferentes líneas paralelas entre sí que representaban cada una de ellas a uno de los días. De

esta forma se podía dejar el instrumento un mes sin tener la necesidad de cambiar el papel, pues bastaba con desplazar al día siguiente el orificio. En este caso, sobre el papel sensible (ferroprúscico) de color azul que iba siendo marcado por los rayos del sol, se graduaba y se dibujaban escalas que coincidían con el recorrido del sol durante la duración del día. Este dispositivo fue diseñado y construido por Charles F. Marvin de los Estados Unidos en 1888.



Ilustr. VI-2: Instrumento mejorado de Jordan (1888).



Ilustr. VI-3: Registrador doble de luz de sol de Jordan (1888)

## LOS QUE DEJAN UNA SEÑAL EN LA SUPERFICIE POR LA LUZ INCIDIDA

Este tipo de instrumentos se basaban en la posibilidad de concentrar los rayos solares mediante una esfera o lente incrementando la temperatura de una superficie y por ende, provocando una quemadura sobre ésta. Por lo general esta superficie era una semiesfera hueca.



Ilustr. VI-4: Registador fotográfico de Marvin (1888).

en la cual se colocaba de tal forma otra esfera con agua en su interior que al incidir sobre ella los rayos del sol, los enfocaba sobre la superficie de la semiesfera, marcándola. Sobre este tipo de instrumentos, las modificaciones que se fueron dando, básicamente se debieron a que no se necesitaba toda la superficie de esta semiesfera para ir registrando el paso del sol, sino sólo una pequeña porción suya y la de tener la facilidad de poder orientar al instrumento de tal forma que su inclinación fuera igual a la del sol para de esta forma, lograr que el registro fuera una línea recta, la cual es más fácil de manejar y que también se permitía optimar la cantidad de papel sensible y cortarlo en tiras.

Este instrumento fue ideado primeramente por el año de 1646 por Athanasius Kircher, profesor de matemáticas hebreo en el Colegio Romano.

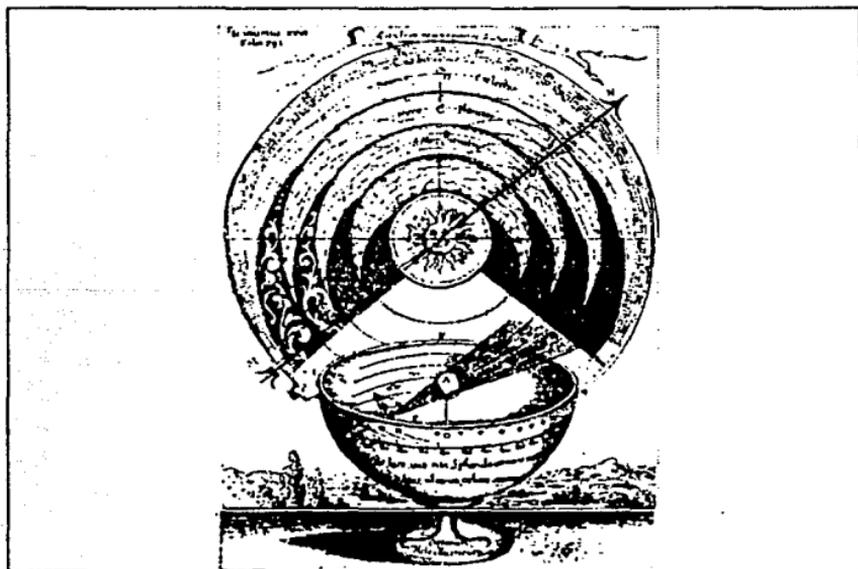
Otros autores de estos instrumentos fueron: J.F. Campbell en 1853, Sir George Stokes en 1880, que era miembro del Consejo Meteorológico, G. M. Whipple y J. Maurer quien posteriormente llegó a ser el director de el Servicio Meteorológico de Suiza.

## LOS DE TERMOMETRO DIFERENCIAL.

Esta tercera clase está basada en el fotómetro de John Leslie, el cual era un termómetro

metro diferencial de aire con un bulbo cubierto de una fina capa de un material absorbente de calor. En este instrumento se colocaba un termómetro de tal forma que al incrementarse la temperatura cerraría un circuito eléctrico indicando que se había alcanzado un límite establecido previamente.

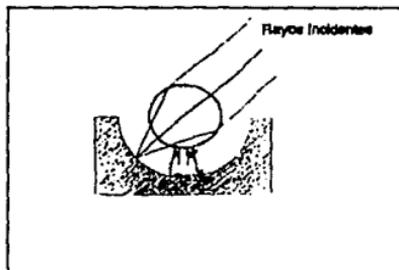
El uso de este principio parece haber sido sugerido por D. T. Maring de la Oficina del Clima de los Estados Unidos en 1891, para registradores de duración solar, y fue descrito dos años después por C. F. Marvin, aunque se tiende a dar a éste el crédito. Dado que la radiación solar es una mezcla de ondas electromagnéticas de distintas frecuencias, las más bajas de las cuales (infrarrojo) son absorbidas casi en su totalidad por superficies negras y reflejadas por superficies blancas, es claro que una superficie negra



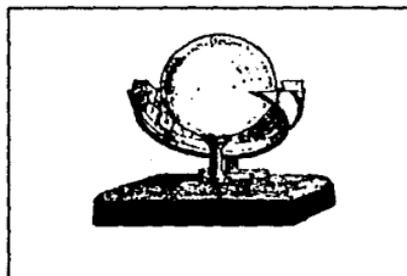
Ilustr. VI-5: Una Propuesta de Kircher (1646)

absorbe mas energía en este nivel (calor) que una blanca; en esto se basa el principio de

funcionamiento del instrumento, el cual tenía en su interior un termómetro diferencial (ilustración VI-11), en el que uno de los bulbos estaba pintado de negro (a) y el otro no (b). Este estaba montado de tal forma que su eje permaneciera paralelo a la tierra. Los dos bulbos estaban unidos por un tubo (c) con dos alambres de platino sellados a través de él en (d). Partes de (b) y (c) estaban llenas con mercurio y el resto con aire. Un escudo exterior protegía al instrumento de corrientes de aire. Al incidir los rayos del sol en esta superficie, incrementaban la temperatura provocando un ascenso en la columna de mercurio, el cual cerraba un circuito eléctrico conectado a una pluma eléctrica, que registraría este incremento.



Ilustr. VI-6: Instrumento original de Campbell (1853)



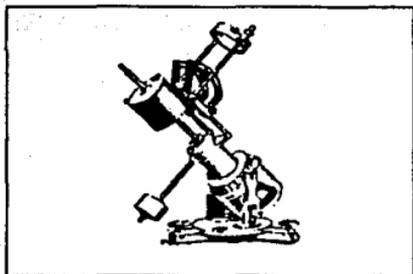
Ilustr. VI-7: Modificación de Sir George Stokes (1880).



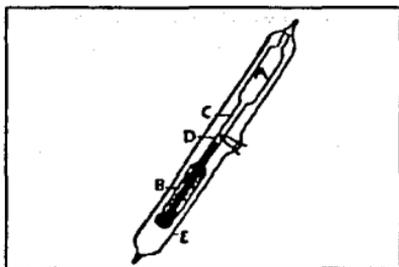
Ilustr. VI-8: Registrador de luz de sol con ajuste de latitud de Campbell y Stokes



Ilustr. VI-9: El registrador de Whipple y Castella.



Ilustr. VI-10: El "Sonnenscheinchronograph" de Maurer.

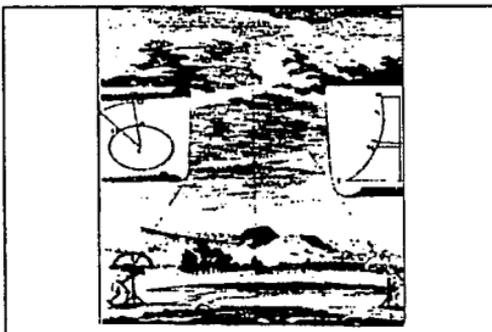


Ilustr. VI-11: El registrador de luz de sol de la oficina del clima de los E. U.

Todos estos instrumentos fueron en su tiempo muy usados. Ya en la actualidad se registra la cantidad de luz que incide en nuestro planeta principalmente a través de satélites artificiales.

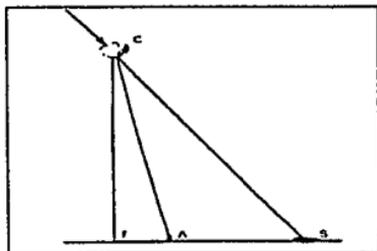
## VII.- ANTECEDENTES EN MEDICIONES DE VELOCIDAD, DIRECCION Y ALTURA DE LAS NUBES Y EL MOVIMIENTO DE LOS ALTOS VIENTOS.

En el siglo XVII y XVIII se inició el estudio del movimiento de las nubes tanto en la velocidad como la dirección que éstas llevaban. Johannes Kepler sabía en su tiempo que la altura de las nubes podía ser determinada mediante dos observadores los cuales, conociendo la distancia a la que se encontraban y el ángulo que formaba la nube con la horizontal en cada caso, podían calcularla por



Ilustr. VII-1: Cálculo de altura de nubes por triangulación directa.

trigonometría sabiendo que en este caso se formaba un triángulo rectángulo (ilustración VII-2). También se podía encontrar la altura de la nube en estudio si el sol permitía distinguir la sombra que proyectaba, calculando la altura también por triangulación.



Ilustr. VII-2: Método de la sombra de Kepler

El uso de una superficie reflejante horizontal fue un método muy atractivo para medir la altura de las nubes. Esto fue propuesto simultáneamente por A. Bravis en Lyon, E. Wartmann en Génova y William Whewell en Cambridge, aunque parece ser que Bravis fue el que desarrolló más este método. La superficie horizontal podía ser un espejo o bien un lago.

La altura se calculaba usando la siguiente

ecuación:

$$H = h \frac{\sin(\theta - \phi)}{-\sin(\theta + \phi)}$$

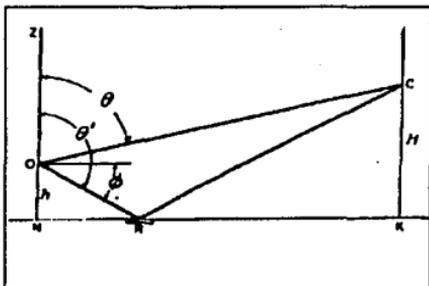
La distancia de la nube mediante esta ecuación:

$$D = 2h \frac{\sin(\theta) \sin(\phi)}{-\sin(\theta + \phi)}$$

Donde  $D = K - N$

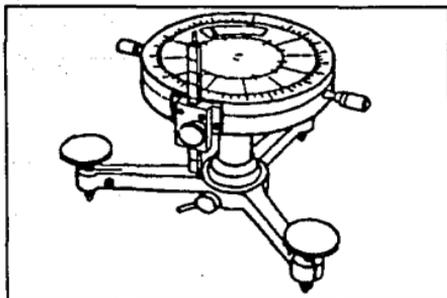
A este tipo de instrumentos, que utilizaban la reflexión para hacer los cálculos se les llamaron Nefoscopios.

El primero en construir uno de estos Nefoscopios fue G. Aimé en 1846, y lo llamó "l'anémomètre par réflexion" (anemómetro de reflexión).



Mostr. VII-3: Uso de un reflector horizontal.

El funcionamiento de este instrumento era el de situar la imagen de la nube en un punto del instrumento mediante una superficie reflejante como un espejo, o bien una película delgada de plata y, de una forma similar (como Kepler lo había hecho) calcular tanto la distancia a la que se encontraba el objetivo como la altura. De esta forma, al observar la trayectoria recorrida por el objetivo y el tiempo en el que le tomaba hacerlo se calculaba la velocidad y la trayectoria.



Ilustr. VII-4: Helioscopio de Fineman

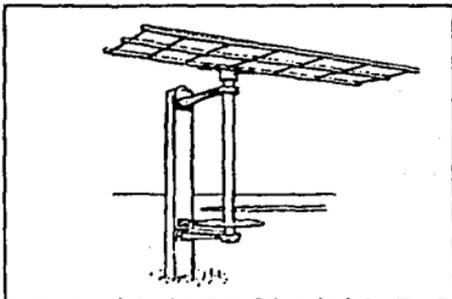
La triangulación mediante el uso de dos estaciones fue posible gracias a la invención del teléfono en los 1870's. El método de triangulación mediante dos estaciones fue puesto en práctica y con mucho éxito por N. Ekholm y K. L. Hagström durante la expedición sueca en 1882 a Spitzbergen.

El uso de la fotografía para determinar mediante triangulación la altura de las nubes (1855) fue una gran idea. Lamentablemente el uso de las cámaras tenía grandes problemas, ya que debían estar paralelas entre sí para hacer el cálculo. En el caso de querer encontrar la velocidad a la que se movía, se necesitaban dos fotografías en la misma posición y se tomaba el tiempo entre una y otra. Al superponer estas fotografías se podía encontrar la distancia recorrida y al tener el tiempo se determinaba la velocidad. Algo muy importante que cabe mencionar es la determinación del rumbo y dirección de la nube ya que de esta forma se puede, indirectamente, saber tanto la velocidad como la dirección del viento a esa altura. Por lo general, para determinar estas variables se usaban estructuras que se orientaban de tal forma que el movimiento de la nube se superponía a la estructura a partir de lo cual se determinaban las características de su desplazamiento.

Estos instrumentos no se podían utilizar en la noche, por lo que algunos científicos pensaron en utilizar lámparas suficientemente potentes como para poder distinguir a la nube. Cleveland Abbe parece ser el primero en sugerir el uso de un rayo de luz de búsqueda para medir la altura de las nubes. Esto fue en 1872, y en 1882 O. Jesse, de Berlín, proponía tener la luz incidiendo directamente en la nube y dos observadores situados sobre una base de 4 Km con instrumentos de medida, o, más económicamente, la dirección del rayo podía ser medida, y también el reflejo visto desde alguna distancia. En 1896 se usó un teodolito y un rayo de luz en el Observatorio Blue Hill en Massachusetts. Esta técnica

ha persistido actualmente con la excepción de el uso de un instrumento especial llamado Clinómetro usado en aeropuertos para medir la elevación angular de el reflejo de la luz.

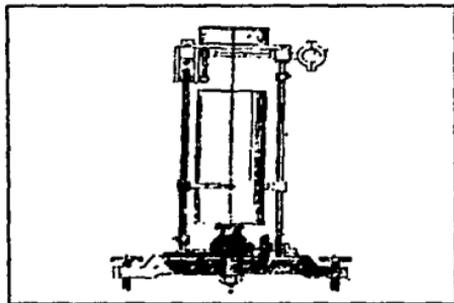
Maurice Laufer y Laurence Foskett crearon un telescopio fotoeléctrico el cual se movía a la par que un rayo vertical modulado de luz y detectaba la base de la nube al recibir un cambio en la intensidad de la luz (actualmente se utilizan rayos láser para este tipo de instrumentos).



Ilustr. VII-6: Nefoscopio de Devit.

En 1931, Vilho Väisälä usó dos instrumentos estereoscópicos para determinar la altura de nubes.

Con la invención de los globos (1783) para uso aeronáutico se introdujo su utilización para estas observaciones. En 1809, un caballero de nombre Wallis, mandó un globo lleno de hidrógeno desde Clapton y observó con un telescopio la forma en que se movía y cambiaba de dirección. De esta forma descubrió que a diferentes alturas existían diferentes corrientes, una sobre otra, por lo que se dio cuenta de lo intrincado que era el cielo. A partir de entonces, el uso de globos para llevar instrumentos empezó a tomarse más en serio, por lo que se empezó a experimentar con diferentes tipos de instrumentos y de diferentes dimensiones. Un



Ilustr. VII-6: El "domógrato" usado por Hermite y Besançon.

ejemplo es el Gustave Hermite y su amigo aeronauta Besançon, que mandaron un globo con un teodolito grabador, el cual utilizaba dos plumas con diferentes tintas, (roja para la altitud y negra para el azimut), las cuales se movían axialmente a lo largo de un tambor vertical. Este tambor se movía mediante un mecanismo de relojería.

Una de las limitaciones más grandes de los globos, es la imposibilidad de observarlos cuando alguna nube los oculta, por lo que en 1924 se agregó un transmisor, el cual enviaba una señal que era rastreada durante 20 minutos. Es entonces que comienza el uso de transmisores para la localización y la transmisión de información.

No

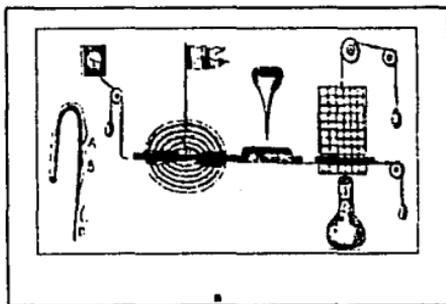
Existe

Página

## VIII.- INSTRUMENTOS DE REGISTRO MULTIPLE: METEOROGRAFOS

El deseo de hacer la vida más fácil ha sido desde siempre el incentivo primario para la investigación y la invención en casi cualquier área del quehacer humano, y dado que ocuparse de leer una y otra vez durante largos períodos un instrumento meteorológico para crear un registro que permitiera facilitar la vida de la gente era necesariamente fastidioso, no es extraño que muy poco después de que se había creado un instrumento surgiera la intención de habilitarlo para "leerse" por sí mismo y registrar sus lecturas, de modo que resultara menos engorroso analizarlas a posteriori. De hecho, los apartados anteriores no son sino la historia de este desarrollo, según se ha dado para cada instrumento particular de la parafernalia meteorológica. Lo que resultaba menos previsible es que prácticamente los primeros intentos por realizar esos registros ya se hayan hecho sobre instrumentos capaces de manipular más de una variable meteorológica a la vez.

Los primeros "meteorógrafos", como se les llamó, fueron creados por Sir Christopher Wren mucho antes de ser Sir. Habiendo trabajado en varios instrumentos individuales durante su juventud (ver apartados anteriores), para 1663 tenía listo un aparato que registraba temperaturas, dirección del viento y precipitación pluvial. Lo interesante de este "reloj del clima" es que utilizaba una sola regla controlada por relojería para todos sus registros. Esta se movía longitudinalmente, arrastrando un lápiz que marcaba sobre un círculo girado por una veleta la dirección del viento. El mismo desplazamiento colocaba un grupo de contenedores bajo la descarga de un embudo para registrar la precipitación y movía una tablilla sobre la cual la

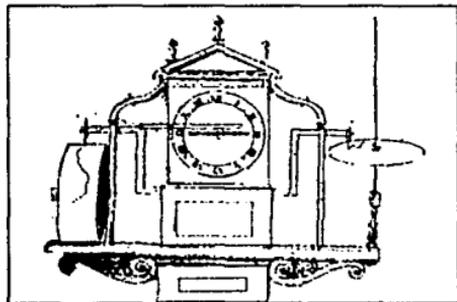


Ilustr. VIII-1: Meteorógrafo de Wren.

El mismo desplazamiento colocaba un grupo de contenedores bajo la descarga de un embudo para registrar la precipitación y movía una tablilla sobre la cual el

termómetro registraba las variaciones de temperatura. El mismo Wren realizó posteriormente varias mejoras a su diseño original y para diciembre del mismo año tenía ya una versión mucho más refinada que presentó a la Real Sociedad por petición del secretario de ésta. En este diseño el movimiento de la regla de tiempo depende de un reloj literalmente, a cuya maquinaria se adosa. El termómetro es reemplazado por uno rotatorio por corrimiento del centro de gravedad (ver el apartado de termometría) que hacía mover un cilindro sobre el cual se indicaba el tiempo longitudinalmente. Finalmente, Wren eliminó el pluviómetro porque, según su informe, consideró más eficiente colocarlo aparte.

Robert Hooke es el siguiente diseñador conocido de meteorógrafos. Impulsado en principio por el trabajo de Wren, ya que comenzó proponiendo mejoras y adiciones a éste, en 1678 pensaba que podía registrarlo todo. El Libro de Actas de la Real Sociedad, en su anotación del 5 de diciembre de ese año incluye el siguiente párrafo:



Ilustr. VIII-2: Tercer meteorógrafo de Wren.

*"El sr. Hooke produjo parte de su nuevo Reloj de clima... que iba a mantener un Recuento de todos los Cambios del clima... es decir los Cuartos y puntos en los cuales el viento soplaría. 2º la fuerza del Viento en ese Cuarto. 3º El calor y el frío del Aire. 4º*

*La Gravedad y Levedad del Aire. 5º la sequedad y humedad del Aire. 6º La Cantidad de Lluvia que caería. 7º La Cantidad de Nieve o Granizo que caerá en el Invierno. 8º los tiempos de brillo del sol. El fue requerido a proceder con todo para terminar dentro de un mes o seis semanas".*

No parece haber descripciones detalladas del funcionamiento de este instrumento, pero por 1689 Nehemiah Grew hizo algún comentario al respecto en su Catálogo de las Colecciones de la Real Sociedad. Según este compilador, el instrumento físico contenía barómetro, termómetro, pluviómetro, anemómetro e higroscopio, cada uno con su dispositivo de registro. Aparentemente, Hooke decidió que no era adecuado agregar el registro de la duración de luz solar en un aparato de por sí complicado. Tan complicado que para realizar las lecturas pertinentes de los registros los artesanos más hábiles tenían que ser ayudados por el inventor en persona, lo que no era, evidentemente, una opción práctica. Esto hizo disminuir el interés por esta clase de instrumentos múltiples, pero en el s. XVIII se encontraron nuevas razones para dejarlos de lado conforme se descubría la importancia de la exposición a la intemperie para algunos de sus elementos, como el termómetro y el higrómetro, además del descubrimiento de la dependencia de la cantidad de lluvia recibida en un pluviómetro con la altura a que estuviera colocado. En síntesis, que un instrumento compuesto era más un adorno estético y una hazaña de diseño que una herramienta práctica para los meteorólogos.

A pesar de lo anterior, todavía durante el s. XVIII y sobre todo en Italia hubo algunos ensayos en el diseño de meteorógrafos. Por ejemplo, Antonio María Vassalli-Eandi, director poco después del observatorio astronómico de Turín, describió un meteorógrafo en 1799 y otro en 1802. El primero de ellos incluía un barómetro de sifón y un termómetro, cada uno de los cuales llevaba un flotador que operaba una palanca de magnificación que a su vez desplazaba un lápiz sobre la superficie de un tambor operado por reloj. El segundo instrumento debía registrar velocidad y dirección del viento (con un plato de presión), temperatura y presión barométrica.

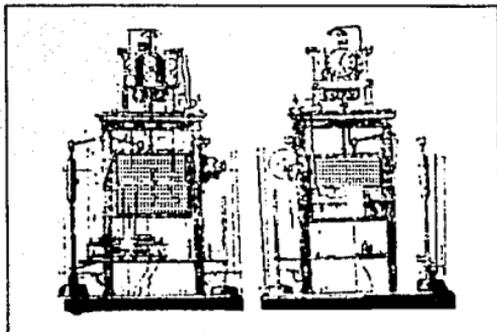
Además de los investigadores, los fabricantes de instrumentos diseñaron y construyeron ocasionalmente esta clase de aparatos, como en el caso de George Dollon, que trabajaba para una importante firma londinense. Este "registrador atmosférico" incluía un barómetro, termómetro

tro, higrómetro, electrómetro, pluviómetro, evaporímetro, anemómetro de plato de presión y veleta. Algunos detalles interesantes de las partes del aparato son:

- El barómetro era uno largo, de sifón, con un flotador casi contrapesado y con un sistema de palancas que daba una magnificación de 3:1.
- La temperatura era registrada por un sistema de diez termómetros similares de mercurio colocados lado a lado sobre un marco. El cambio en el centro de gravedad que provocaba el mercurio en expansión producía un balanceo del conjunto. La idea de este sistema era multiplicar el momento de oscilación sin disminuir la velocidad de respuesta.
- Los indicadores de esos dos instrumentos y del higrómetro terminaban en puntas afiladas que una barra golpeaba contra el papel de registro cada media hora al tiempo que hacía marcas de tiempo en el mismo. El resto de los instrumentos utilizaban lápices.
- El electrómetro pretendía registrar los niveles de campo eléctrico ambiental en condiciones de tormenta, si bien no hay notas acerca de su funcionamiento. Ni siquiera el método de registro está claro.

El aparato fue construido y presentado en una gran exhibición en 1851, pero era simplemente imposible de comercializar.

El siguiente meteorógrafo importante, por cierto mucho mejor que el de Dollon, fue descrito en 1857, en Roma y por parte de Angelo Secchi, Director del Observatorio del Colegio Romano. Su versión final, que data de 1867, todavía se conservaba en el Museo Copernicano



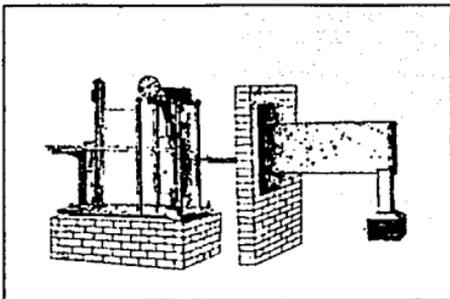
Ilustr. VIII-3: Meteorógrafo de Secchi, vistas frontal y posterior (1867)

de Roma durante la década de los 1960's. Es de notar la altura del aparato (más de tres metros), ya que en su base contenía una cámara para las "celdas de Daniell" que proporcionaban la corriente eléctrica necesaria para sus electroimanes. Disponía, por otra parte, de dos marcos rectangulares separados que llevaban el papel de registro. De ellos, el frontal hacía una carrera completa en dos días y

medio y recibía los registros de presión, los termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo y el tiempo de las precipitaciones, pero no su cantidad, la cual se registraba en un disco de papel por un lápiz movido radialmente a velocidad constante. El marco posterior, por otro lado, hacía su recorrido en diez días y recibía los registros de velocidad y dirección del viento y la temperatura medida por la dilatación relativa de un alambre de latón y una viga de pino. Los únicos instrumentos individuales que no requerían de energía eléctrica eran el barómetro (del tipo de equilibrio) y el termómetro de alambre. Todos los demás realizaban sus registros a través de electroimanes activados cada cierto tiempo o cada vez que se daba alguna condición límite (por ejemplo, cuando un alambre de platino hacía contacto con el mercurio interior del termómetro de bulbo seco).

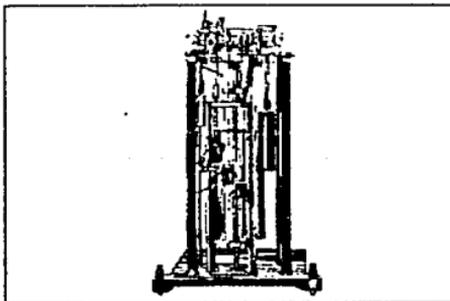
Otro instrumento con cierto éxito fue diseñado y construido por la misma época por A. G. Theorell para la Academia de Ciencias de Estocolmo. Ejemplos del mismo fueron construídos también para la Academia de Copenhage y para el Observatorio de Uppsala. El meteorógrafo de Theorell registraba sólo presión, temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco. Como cada sección utilizaba mercurio para establecer sus niveles, era evidente

la facilidad de usar electroimanes en el registro de esos niveles. Así, una vez cada diez o quince minutos, los carretes que llevaban las plumas recorrían toda la altura del papel de registro corriendo entre alambres de acero sujetos al marco exterior. Cuando la punta de prueba de cada medidor tocaba la superficie del mercurio un electroimán activaba la pluma y la presionaba contra el papel para señalar un punto, al mismo tiempo que un sistema de embrague detenía el movimiento del carrete y lo devolvía después a su posición original.



Ilustr. VIII-4: Meteorógrafo de Theorell (1869)

Varios meteorógrafos más fueron construidos entre 1860 y 1880. G. W. Hough, del Observatorio Dudley, construyó uno para el cuerpo de señales del ejército estadounidense bajo la idea de Theorell, pero con menos elegancia. Uno muy distinto fue construido por Peter Stevenson, fabricante de Edimburgo, cuyo aparato medía y registraba presión, temperatura del aire, temperatura de bulbo húmedo y precipitación, todo de manera muy simple y completamente mecánica. El conjunto completo estaba contenido en una caja cilíndrica de hierro, con el embudo para el pluviómetro en la parte alta. El aparato, por cierto, parece haber estado en funcionamiento por varios años.



Ilustr. VIII-5: Sección de registro del meteorógrafo de Theorell.

Como comentario final, hay que decir que desde entonces los meteorógrafos han perdido interés. Primero, porque empezaron a conocerse los verdaderos requerimientos que la velocidad de cambio de los elementos meteorológicos imponía. Después, porque la introducción en los 1880's de una gama de instrumentos registradores pequeños, ligeros y baratos por parte de la firma parisina de los Hermanos Richard hizo de los grandes y complejos instrumentos apenas algo más que una curiosidad sin posibilidades de competir.

No

Existe

Página

## **IX.- SONDEOS SIN TELEMETRIA EN ALTURAS ELEVADAS**

Como resulta evidente en los apartados anteriores, en los siglos XVII, XVIII y aún en el XIX las observaciones meteorológicas sólo se podían realizar a nivel del suelo, y con mucha suerte a la altura de las montañas, gracias casi únicamente a J.A. Deluc y H. B. de Saussure, meteorólogos de Génova aficionados al montañismo. La invención del globo en 1783, trajo consigo la posibilidad de hacer observaciones ya no a nivel del suelo sino a alturas mayores.

Podemos agrupar a los instrumentos usados en estas observaciones como sigue:

- Instrumentos para sondeo con la intervención del hombre.
- Instrumentos para sondeo sin la intervención del hombre (cometas y globos-sondas).

### **INSTRUMENTOS PARA SONDEO CON LA INTERVENCION DEL HOMBRE**

En el año de 1783 se marca el primer vuelo de globo libre con tripulación humana usando un globo de aire caliente por los hermanos Montgolfier, y también con un globo lleno de hidrógeno. El primero de diciembre de ese mismo año, el físico J. A. C. Charles, y un amigo suyo llamado Mr. Robert ascendieron en un globo de hidrógeno desde su jardín en París y es interesante notar que llevaron consigo un barómetro y un termómetro.

En 1786 el Dr. John Jeffries subió en un globo desde Londres con un aeronauta profesional, Jean Pierre Blanchard, y con un termómetro, un barómetro, un electrómetro, un higrómetro, un reloj y una brújula marina. Es de notar que este viaje fue de gran importancia, en el aspecto de que el uso del globo abría grandes posibilidades para la meteorología y para los científicos.

El primer globo que ascendió con fines puramente meteorológicos, es quizá el hecho por Gay-Lussac y Biot en agosto 27 de 1804. Su principal objetivo era observar el campo magnético de la tierra aunque también llevaron consigo barómetro, termómetro, electrómetro, e higrómetro. Naturalmente, no disponían aún de instrumentos especializados, pero si notaron que era necesario proteger a los termómetros de la luz directa del sol. Tres semanas después, Gay-Lussac arriesgó su vida al subir él solo en el globo y elevarse a una altura de 6636 metros, llevando frascos para tomar muestras de aire a diferentes alturas. Sus observaciones del gradiente de temperatura fueron aceptadas durante muchos años.

A partir de entonces, se diseñaron instrumentos de dimensiones reducidas y fáciles de usar para que uno de los tripulantes pudiera manejarlos sin problemas, al mismo tiempo que otro manejaba el globo, que podía estar lleno de aire caliente, u otro elemento más ligero que el aire. De esta forma, se pudieron registrar las características de la parte más alta del aire, lo que inicialmente sólo podía realizarse desde una elevación natural.

Entre los instrumentos diseñados y fabricados especialmente para su uso por tripulantes de globos están los realizados por J. B. J. Fourier, Patrick Adie (cuyo diseño incluía un barómetro de sifón calibrado de modo que se leyera sólo por un lado). Por la misma época, James Glaisher, con asistencia de Coxwell, hizo veintiocho ascensos sobre varias partes de Inglaterra entre 1862 y 1866, para la Asociación Británica para el Avance de las Ciencias y utilizando un aparato compuesto que incluía termómetros, higrómetros, barómetros e instrumentos adicionales para realizar observaciones acústicas, químicas, magnéticas y eléctricas. Además, sus ascensos le sirvieron para poner a prueba los barómetros aneroides por comparación con los usuales de mercurio.

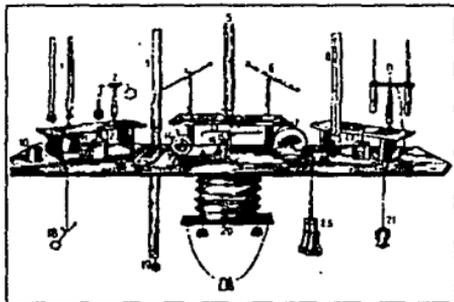


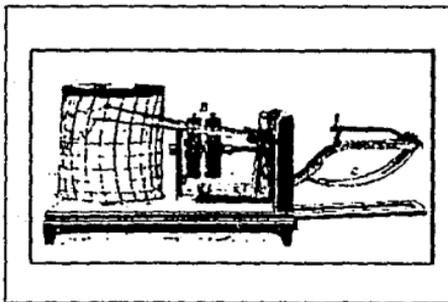
Figura IX-1 Instrumentos para globos de Glaisher

Alrededor de treinta años después de los ascensos de Glaisher se dio en Alemania un importante interés por las observaciones desde globos. Incluso, se formó una sociedad bajo el patrocinio del emperador. Entre 1893 y 1894, se llevaron a cabo 47 ascensos bajo la asesoría científica de Richard Assmann, el que sintetizó sus resultados en 1895.

## INSTRUMENTOS PARA SONDEO SIN INTERVENCIÓN DEL HOMBRE

### COMETAS Y GLOBOS SONDA

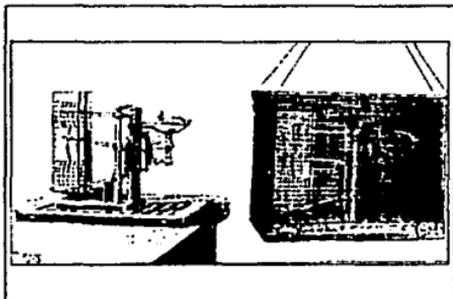
Se pensó en utilizar primero cometas y después globos sin tripulación por la razón de que las observaciones aéreas eran muy costosas en cuanto al peso que tenía que llevar el globo y las lecturas que se tomaban. Es por esto que se empezaron a diseñar meteorógrafos con el fin de poder enviar instrumentos que operaran sin la presencia del hombre, y que registraran por sí solos las variables atmosféricas.



Ilustr. IX-2 Barómetrografo de Richard (1893)

Los primeros intentos de observación de temperaturas al aire libre usando cometas para elevar los instrumentos se dieron en 1749, por parte de Alexander Wilson, profesor de Astronomía de Glasgow. Una aplicación espectacular de esta idea fue puesta en marcha por el Rev. George Fisher durante la expedición del capitán W. E. Parry al Ártico, en el invierno de 1822 a 1823, durante la cual realizó investigaciones sobre la refracción atmosférica y trató de determinar el gradiente de temperatura vertical usando cometas a las que ataba termógrafos excelentes en posición horizontal.

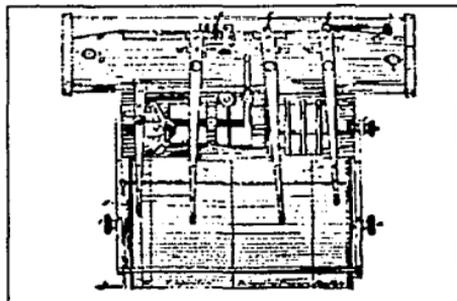
En julio de 1894, William A. Eddie, de Bayonne, N. J., empezó a elevar cometas a mayores alturas que las comunes, usando instrumentos registradores, entre los que estaba el termógrafo de Richard Frères, que pesaba sólo 1.1 kg. En agosto de 1895 se elevó de la misma forma un barotermógrafo y en 1896 un "barotermohigrógrafo" de aluminio, construido también por Richard Frères, en París. Este último pesaba apenas 1.3 kg.



Ilustr. IX-3 Barotermohigrógrafo de Richard (1896)

Otros instrumentos para uso en cometas fueron los de Marvin (1898) y W. H. Dines (1904). En especial, el creado por Marvin ya contaba con un anemómetro con el que podía registrar la velocidad del viento.

El globo se encontraba atado a la tierra por medio de un cable, el cual limitaba mucho la altura máxima que podía alcanzar. Es por esto que el siguiente paso fue el de mandar los globos libremente sin estar atados a la tierra.

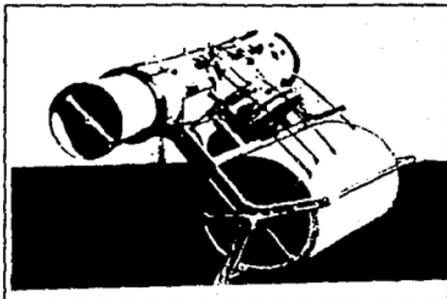


Ilustr. IX-4 Meteorógrafo de Marvin para cometas

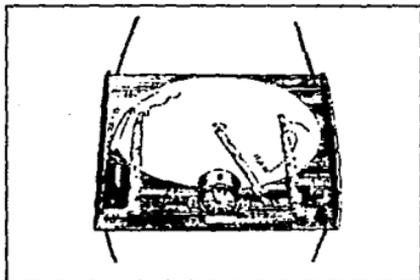
Otra ayuda significativa que se tuvo en estos instrumentos fue gracias a una tinta, creada por Joules Richard, que a temperaturas bajas no se congelaba.

En noviembre 14 de 1892, L. Capazza demostró la posibilidad de usar globos sin tripulación para mandar instrumentos para medir las variables atmosféricas, y envió esta sugerencia a la Academia de Ciencias en París. Muy

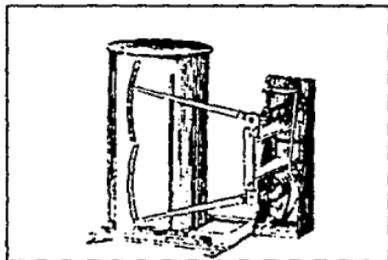
poco tiempo después Gustave Hermite, usando un globo de 4 metros de diámetro, elevó un barómetro de mínima de mercurio. Esto fue el 17 de septiembre de 1892 y podemos decir que es el nacimiento de los globos sonda. Su instrumento regresó intacto pero pesaba 1.2 Kg. Después de esto, fue modificando sus aparatos de tal forma que el peso empezó a disminuir llegando a los 100 g y poco tiempo después a los 35 g. Finalmente, el 14 de noviembre del mismo año, su noveno globo alcanzó una altura de 7600 metros, en donde la temperatura registrada fue de 70 grados centígrados bajo cero. El 10 de diciembre, el aeronauta Besançon y él mandaron una docena de globos y, al recuperarlos, uno de ellos había alcanzando una altura de 9 Km.



Ilustr. IX-5 Meteorógrafo para cometa de Marvin, modificado por Assmann



Ilustr. IX-6 Meteorógrafo de cometa de Dnes

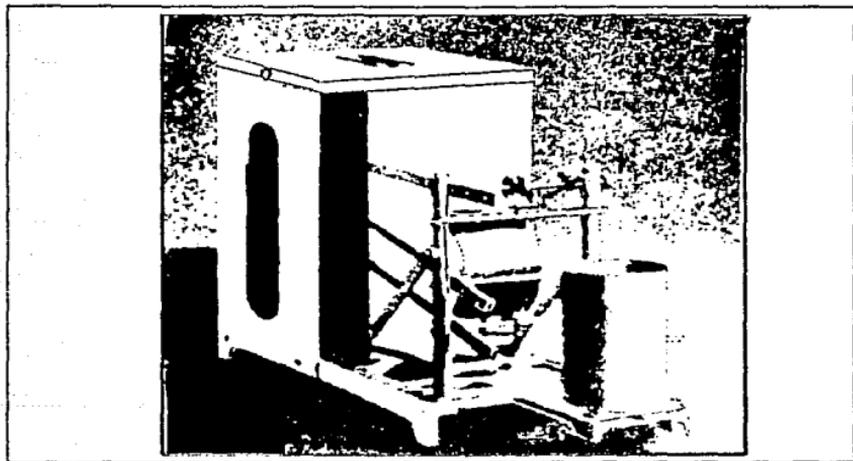


Ilustr. IX-7 Barotermógrafo de Hermite y Besançon (1895)

Se presentó después un cambio, en el que Hermite ya no usó la tinta creada por Joules, sino papel que previamente había ahumado, en el que se trazaban las líneas al rayando la superficie. Esto sucedió en octubre de 1895.

En noviembre 13 y 14 de 1896, Hugo Hergesell del Observatorio de Strasburgo, organizó vuelos simultáneos de globos sin tripulación en Berlín, París, Strasburgo, Munich, Varsovia y San Petersburgo. Este fue el primero de muchos vuelos cooperativos que se hicieron.

Utilizando estos globos y después de muchos datos recabados se encontró que se presentaba una inversión en la temperatura después de los 11.2 kilómetros de altura, esto



Ilustr. IX-8 Meteorógrafo para globo sonda de Hergesell

es, que al ir ascendiendo el globo, la temperatura descendía, pero al llegar a los 11.2 km, la temperatura empezaba a aumentar. En un principio se creyó que el sol afectaba al termómetro y alteraba las condiciones, pero tiempo después se encontró que sí se presentaba esta inversión. A la zona en la que se presenta esta inversión se le conoce como tropopausa, y su descubrimiento es, quizá, la primera aportación de la meteorología a la astronáutica.

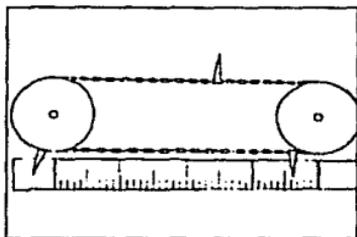
## X.- TELEMETEOROGRAFIA Y RADIOSONDAS

### METEOROGRAFOS DE SUPERFICIE

En un apartado anterior se ha hecho referencia a que, si bien los aparatos compuestos de varios dispositivos de registro meteorológico comenzaron a proponerse casi desde el momento en que se presentó la posibilidad técnica de registrar, lo cierto es que tales aparatos no tuvieron el éxito que hubiera sido de esperar. Un motivo más para este hecho fue, en su momento, que para cuando la técnica se había hecho capaz de fabricar los instrumentos con la precisión y la durabilidad requeridas para funcionar por largo tiempo sin atención humana (lo que era, en resumidas cuentas, su razón de ser) ya los practicantes de la meteorología se habían dado cuenta del poco interés que tenía en realidad saber qué había estado pasando en los sitios y, en cambio, de lo importante que era conocer al momento el estado de las variables de interés en las ubicaciones lejanas. Esto ocurría alrededor de 1850, por la misma época en que el telégrafo eléctrico se hacía cada vez más popular, de manera que era casi obligado aprovechar los adelantos introducidos por el nuevo medio de comunicación en la obtención de las lecturas requeridas en las centrales meteorológicas, cuyo concepto al menos data de esos años.

El primer telemeteorógrafo descrito es el de Charles Wheatstone, en 1843, quien por cierto es uno de los inventores del telégrafo en sí. El instrumento estaba diseñado para transmitir a la estación receptora las lecturas de un barómetro de sifón y los dos termómetros de un psicrómetro e imprimirlas en cifras sobre una banda de papel. Alambres de platino "flotaban" dentro del extremo abierto del barómetro y de los termómetros. Cada media hora estos alambres eran elevados en cinco minutos y vueltos a bajar en uno por un reloj. La apertura del circuito provocaba que un martillo cayera e imprimiera las lecturas en la estación receptora, donde las ruedas de tipos giraban impulsadas por otro reloj en sincronía con el del transmisor. Un instrumento de estos, pero que transmitía sólo temperaturas, fue hecho para un comité de la Asociación Británica que se proponía experimentar con globos cautivos.

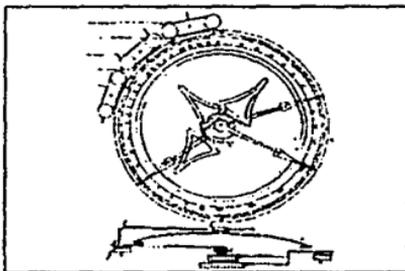
En 1867 Wheatstone inventó otro telémetro, aplicable a cualquier instrumento con un apuntador rotatorio. No contaba con dispositivo de registro, pero cuando el observador requería de una lectura de la estación tejana le bastaba con girar un imán (como al hacer una llamada con un teléfono antiguo). Los pulsos que el imán producía hacían girar un contacto en la estación de lectura al mismo tiempo que un indicador frente al observador. Cuando el contacto alcanzaba la posición del apuntador de la estación el movimiento era interrumpido por un relevador, que devolvía el contacto a la posición inicial hasta la siguiente lectura. El indicador de la estación receptora era devuelto a su lugar a mano.



Ilustr. X-1: Mecanismo de conversión de Von Baumhauer

En 1872 la Sociedad Holandesa de Ciencias en Haarlem ofreció una medalla de oro a quien encontrara un medio satisfactorio de determinar la temperatura, humedad y densidad del aire de la atmósfera a alturas considerables sobre la superficie de la tierra. El medio debía permitir el registro automático de las observaciones o, al menos, su repetición frecuente. Es decir, querían un telemeteorógrafo que pudiera ser utilizado desde un globo cautivo o una cometa. No hubo candidatos y la oferta expiró en enero de 1874, de modo que el secretario de la Sociedad, E. H. von Baumhauer comenzó a desarrollar sus propias ideas, las que

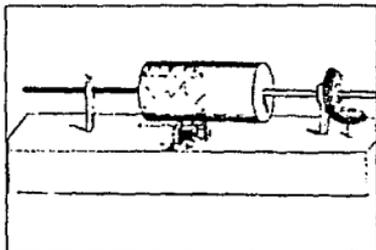
tampoco se llevaron a la práctica por falta de recursos. De todas formas, puede comentarse que en sus diseños debían utilizarse instrumentos que producen movimientos angulares, de manera que se indicaban el barómetro aneróide, el termómetro bimetalico y el higrómetro de cabello. Pero además, von Baumhauer propuso determinar la dirección del viento por medio de una veleta, su velocidad con anemómetro de copas y la precipitación



Ilustr. X-2: Esquema de transmisor de Von Baumhauer.

con pluviómetro de recipiente volcante. Estos tres dispositivos requieren de rotación continua que se transformaba en movimiento lineal a través de un dispositivo que usaba una cadena y tres puntas sujetas a ésta. La distancia entre los centros de las ruedas sobre las que corre la cadena es exactamente igual al diámetro de ellas y a la distancia entre las puntas. Tres sistemas de este tipo (ver ilustraciones X-1 y X-2) están conectadas a la veleta, el anemómetro y el pluviómetro. Hay además tres manecillas movidas por el barómetro, el termómetro y el higrómetro, respectivamente. Los extremos de todas las manecillas en el punto en que tocan el anillo metálico que rodea a la carátula son de ebonita. El minuterio de un reloj común arrastra una lengua de oro alrededor de ese anillo, haciendo contacto todo el tiempo, excepto cuando pasa sobre una de las manecillas o sobre una de las piezas fijas de ebonita colocadas para comprobar el isocronismo entre los relojes de la estación transmisora y la receptora. En ésta, el tambor de registro gira una vez por hora y un electromán mantiene la pluma alejada de su superficie hasta que el circuito se abre (al tocar el minuterio de la estación transmisora alguna manecilla o pieza de ebonita).

El motivo de dar cierto detalle al esquema propuesto por von Baumhauer es que contiene los elementos básicos del sistema de telemetría conocido después como "ciclo de Olland", ya que fue H. Olland, un fabricante de instrumentos de Utrecht quien construyó el primer telemeteorógrafo exitoso bajo este principio.



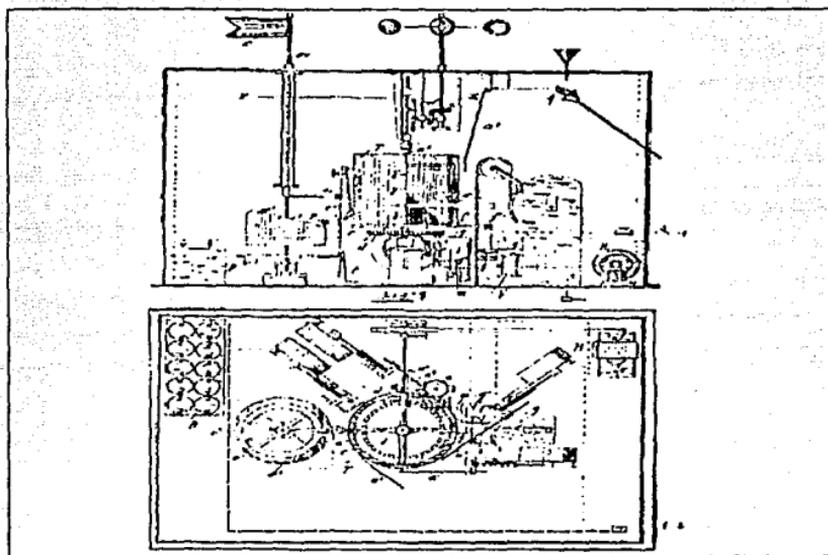
Ilustr. X-3: Receptor de Von Baumhauer

En 1875 Olland empezó la fabricación de un instrumento para enviar las lecturas de un anemómetro y un barómetro de una torre a la Oficina Meteorológica en Utrecht, a una distancia de cerca de 1 km, usando un solo hilo telegráfico. Al conocer a von Baumhauer, sin embargo, éste lo convenció de fabricar un telemeteorógrafo tal como él (von Baumhauer) lo había concebido, y el instrumento tuvo éxito al ser enviado, a la Exhibición de Filadelfia, en 1876. Pero el aparato requería de dos hilos de comunicación, y Olland quería realizar uno de un solo hilo, lo que logró en julio de

1877. Lo interesante del caso es que Olland dio con la idea de sincronizar las dos estaciones por medio de péndulos que se ponían en movimiento cada vez que una lectura era necesaria por uno o dos minutos. El movimiento era iniciado por el único reloj del sistema, en la estación receptora, cada quince minutos. El péndulo de la misma programaba, por medio de relevadores, la secuencia de observaciones para ambas estaciones y, finalmente, el movimiento de los péndulos se detenía hasta la siguiente observación. Lo que se recibía como lecturas en el tambor de registro era un número de líneas irregulares de puntos representando las lecturas de los varios instrumentos, así como un grupo de líneas igualmente espaciadas cuya rectitud o falta de ella evidenciaba el grado de sincronismo logrado.

Olland utilizó un barómetro de balanza en el que se pesaba la cisterna, un anemómetro de copas, una veleta con un complicado sistema de trinquetes y poleas y un termómetro metálico de diseño inusual (el inventado por F. W. C. Krecke). Estos instrumentos funcionaron tan bien que en 1879 se propuso al gobierno de los Países Bajos instalar cuatro de ellos en puntos diversos del reino, pero el proyecto fue rechazado por costoso. Olland, sin embargo, logró tener su aparato funcionando exitosamente en 1895, sobre una línea de 160 km de alambre entre Flushing y Utrecht.

La característica común y más incómoda de los sistemas de von Baumhauer y Olland era la necesidad de un movimiento de reloj perfectamente uniforme, al menos mientras las lecturas eran hechas. Un intento de obviar esta necesidad fue hecho por Luigi Cerebotani y Albert Silbermann, quienes patentaron un sistema de telemeteorografía en 1896. La novedad de su propuesta era el llamado "triángulo respondedor", que consiste en un gran número de barras conductoras colocadas en un tambor de material aislante y cuyas longitudes son graduadas de modo que si el conjunto fuera extendido en un plano se formaría un triángulo rectángulo. Si ahora el tambor gira y el extremo del indicador de un instrumento meteorológico se supone apoyado en él, el número total de contactos por vuelta entre el indicador y las barras de metal dependerá de la posición del indicador. Basta contar los puntos en una impresora de telégrafo Morse en el extremo lejano de una línea telegráfica



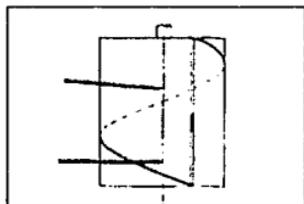
Ilustr. X-4: Telemeteorógrafo de Cerebotani y Silbermann

para tener una indicación del valor del elemento en cuestión. El sistema, por una parte, no depende de la uniformidad en el movimiento del tambor, pero por la otra está limitado por el número de barras de metal que se pueden colocar. En el aparato real había seis instrumentos utilizando este sistema, de modo que la circunferencia del tambor debía ser al menos seis veces la longitud de base del "triángulo respondedor". La presión, la temperatura y la humedad eran transmitidas tal como se ha indicado, pero la velocidad del viento y la precipitación se trataban de manera diferente. Los contactos operados por el anemómetro de copas y por el flujo de agua de lluvia estaban en circuitos conectados a otro grupo de segmentos conductores perpendiculares a las barras del triángulo. Estaba previsto que el tambor tuviera una rotación completa cada vez que una lectura era requerida y no había medio de registro en el transmisor.

El interés por la telemeteorografía, con todo, casi desapareció hacia fines del s. XIX. Sin embargo, esos instrumentos olvidados constituyeron treinta años después una fuente de ideas en el desarrollo temprano de la radiometeorografía, o radiosondeo.

## INTENTOS EN TELEMETRIA DESDE COMETAS

Los meteorógrafos de uso en cometas y globos se hicieron muy populares alrededor de 1914. Durante la Primera Guerra Mundial era evidente el interés de Francia y Alemania por transmitir información desde el cometa o el globo a la tierra a través del hilo del aparato. En Alemania (1917) Herath y Robitzsch encontraron la manera al modificar un meteorógrafo de cometa cambiando el tambor de registro por un cilindro aislante girando a razón de una revolución cada seis minutos. Dentro de él había insertadas dos cintas de metal: una paralela al eje del cilindro y la otra formando una helicoides. Los indicadores de cada instrumento hacían contacto con una cinta dos veces en cada giro.



Ilustr. X.5: Principio del telemeteorógrafo de Herath y Robitzsch (1917)

y cada contacto energizaba el primario de un pequeño transformador de chispa, el secundario del cual estaba conectada en los extremos de una apertura de chispa

en el hilo del cometa, en paralelo con un capacitor, y en la estación receptora un teléfono estaba conectado entre el alambre y la tierra.

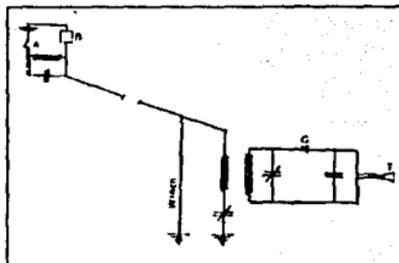
En septiembre del mismo año, en Francia, un joven oficinista llamado Pierre Idrac instaló en un globo cautivo un anemómetro muy sofisticado eléctricamente, pues hacía uso de circuitos sintonizados para la transmisión y la recepción. Un zumbador operado por los contactos de un anemómetro tipo molino de viento controlaba un circuito LC que enviaba señales de radiofrecuencia (RF) a través del hilo del globo al primario de un transformador de radiofrecuencia con sintonizador (el capacitor variable) en serie. El secundario, con su sintonizador en paralelo, estaba adosado a un rectificador y éste a un teléfono por el que se escuchaban las señales rectificadas de RF. Es notable que distintos instrumentos, cada uno

enviando señales en RF distinta, podían colocarse sobre el mismo cable a diferentes alturas.

Alguien escribió en 1920, refiriéndose al trabajo de Idrac:

*"Este método de transmisión es bastante general. Se aplica, con variaciones, a la medición de todos los elementos meteorológicos, y la posibilidad de tener*

*sobre el cable, al mismo tiempo, varios transmisores, lleva a la realización de un verdadero observatorio a gran altura, dando indicaciones a la tierra sobre un solo cable, y en todos los climas, instantánea y continuamente"*



Ilustr. X-6: Uso de circuitos sintonizados de Idrac.

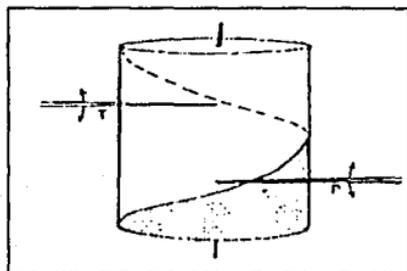
Una sugerencia adicional de Idrac para facilitar la inclusión de nuevos instrumentos en su diseño básico fue usar como termómetro un circuito oscilador de frecuencia variable, usando para ello un termómetro bimetálico que, al deformarse, modificara la capacitancia del dispositivo. La frecuencia resultante podría medirse en tierra con un medidor de longitud de onda, pero Idrac no llegó a realizarlo.

## EL RADIOMETEOROGRAFO O RADIOSONDA

A partir de los trabajos de Idrac, es evidente que después de 1920 sólo hacía falta un sistema operante de radiocomunicación para que la telemeteorografía a partir de globos libres fuera posible, y durante esa década se inició un rápido desarrollo de las técnicas de transmisión por onda corta, principalmente gracias al trabajo de muchos y desconocidos operadores aficionados. Se descubrió que los tubos de vacío permitían transmisiones a distancias sorprendentemente grandes con potencias de transmisor de uno o dos watts. En marzo de 1927 Idrac y Robert Bureau lograron escuchar una transmisión de la estratós-

fera enviada por un transmisor con potencia de cuatro watts. El reporte inmediato de este éxito a la Academia francesa de las Ciencias hizo que este organismo iniciara de inmediato la investigación en el campo de las radiosondas, de manera que en junio de 1929 Bureau reportó la primera ascensión de un dispositivo que transmitía indicaciones de presión y de temperatura. Un barotermógrafo común fue enviado en el paquete y recuperado posteriormente, verificándose que las variaciones entre los dos dispositivos no llegaban a los  $0.7^{\circ}\text{C}$  a cualquier altura. Poco después, en 1931, P. Molchanoff describió su primera radiosonda, si bien pretendía haber empezado su trabajo al respecto en 1922.

Fue Robert Bureau quien exploró por primera vez con cierta profundidad los alcances



Ilustr. X-7: Principio de la primera radiosonda francesa

posibles del radiosondeo en una publicación de 1931. En primer lugar, percibió la posibilidad de varios tipos de radiosondas. En particular, los instrumentos meteorológicos podían modular la señal mecánicamente, o formar parte ellos mismos del circuito del transmisor. La información podía, por otro lado, ser transmitida por interrupciones de señal, o por modulación de la señal de radiofrecuencia por una frecuencia variable de audio, o haciendo

variable la frecuencia de radio de la señal. Por supuesto, cualquier combinación de estas opciones es también posible. Para su primera realización práctica, Bureau utilizó como base un ciclo de tiempo, usando un cilindro parcialmente aislante, parcialmente conductor, distribuido de forma que si la parte de metal se extendía en un plano tomaba la forma de un triángulo. Al principio el cilindro era grado por un molino de viento y después se le acopló un sistema de reloj activado por el propio peso del instrumento. Contactos operados por un termómetro bimetalico y por un barómetro de Bourdon servían para modular la señal y un interruptor auxiliar aseguraba que tres revoluciones del tambor se dedicaran al barómetro y cuatro al termómetro con una vuelta en blanco en medio. Como de todas formas era difícil lograr una rotación uniforme, Bureau unió una rueda dentada al tambor que era una

de las placas del capacitor del circuito LC de transmisión, de manera que una modulación en frecuencia se producía proporcional a la velocidad angular instantánea del cilindro. Este sistema producía registros con un número de "pips" seguidos por un espacio en blanco. La presión o la temperatura eran determinadas contando los "pips". Poco después el mismo Bureau cambió el cilindro por un disco activado por un reloj de resorte.

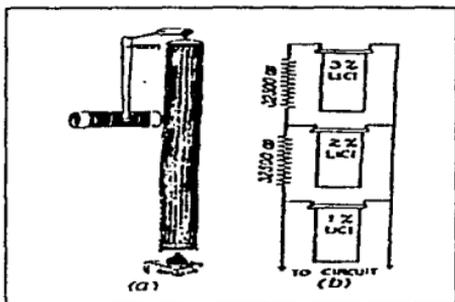
La siguiente radiosonda descrita fue la de Moltchanoff, mencionado de pasada renglones arriba. En este instrumento la temperatura y la presión se transmiten en escalones discretos por un mecanismo de contacto. El indicador del termómetro movía cuatro "peines" con dientes de ancho igual a  $1/3$  de la distancia entre los mismos. Cada "peine" estaba conectado a un interruptor operados por turno, de modo que los "peines" podían identificarse con números del uno al cuatro. Para prevenir ambigüedad si la señal se perdía momentáneamente, un quinto peine de cinco dientes se agregaba, cada uno de sus dientes opuesto a uno faltante en cada uno de los otros, de manera que una señal continua era emitida siempre que el indicador del termómetro estaba en contacto con él. Había un peine separado para la presión, que operaba a través de sus propios interruptores. El instrumento, que era bastante pesado, fue mejorado posteriormente y hecho más ligero y compacto.

Moltchanoff inventó también un meteorógrafo de ciclo de tiempo que estuvo en producción en Alemania. Consistía en una radiosonda que utilizaba las ideas de Olland, con contactos operados por reloj pero provistos de medios de sincronización para que las señales pudieran ser recibidas en un receptor comercial. El instrumento era bastante elaborado y caro y dependía del funcionamiento uniforme del reloj. Sin embargo, dado que el movimiento de un sistema de relojería es discontinuo necesariamente, se hizo necesario proponer mejoras también a este modelo, lo que hicieron L. F. Curtiss, de la Oficina Nacional de Normas, en Washington, y R. C. Jacobsen, del Servicio Meteorológico Canadiense al sustituir el reloj por un pequeño motor eléctrico. Jacobsen, además, incluyó una red sintonizada para regular la velocidad del motor, y su trabajo estuvo en uso por cierto número de años.

Después de varias modificaciones menores sobre los mismos esquemas básicos, la primera verdadera radiosonda (en el sentido de transmitir señales inalámbricas) fue diseñada en Alemania por Paul Duckert, adoptando la idea de Idrac respecto al tipo de instrumentos a usar (capacitores variables por temperatura). De hecho, su primer intento en el campo fue un aparato que transmitía una señal continua de radiofrecuencia variable con la temperatura, en tanto que la presión era indicada a intervalos por pequeñas interrupciones de la señal.

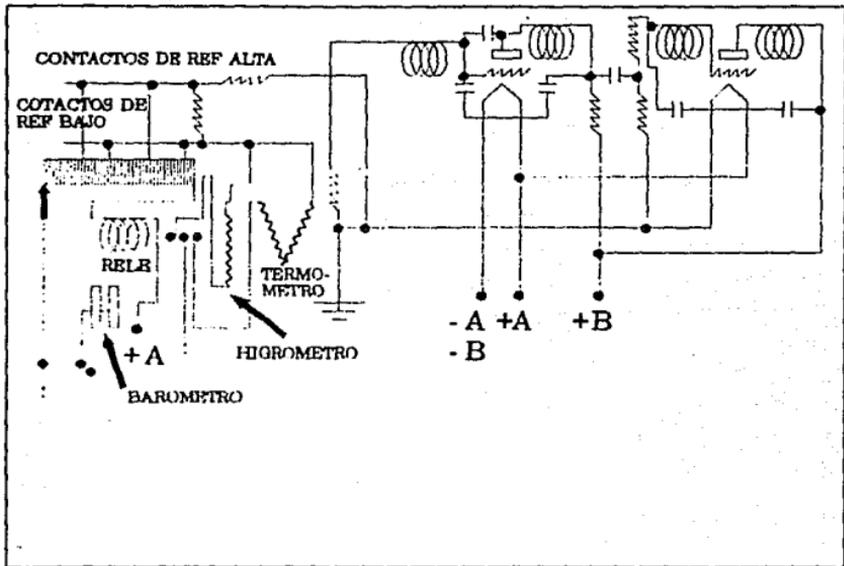
Vilho Väisälä construyó su primer aparato en 1931, el cual medía y transmitía sólo valores de temperatura, transmitiendo bajo el mismo esquema de radiofrecuencia variable, pero con la característica de que el aparato completo pesaba sólo 420 g y de que pudo ser seguido hasta una altura de 7 km. Luego, Väisälä consiguió aplicar el mismo principio a otros dispositivos meteorológicos: higrómetro, anemómetro y barómetro (1932). Este informe es importante además porque en él se establecen los principios de operación para las estaciones automáticas que empezarán a desarrollarse verdaderamente apenas veinticinco años después.

Fue alrededor de 1936 cuando se hizo evidente en los Estados Unidos y en Reino Unido que un desarrollo serio y bien financiado del radiosondeo era casi obligatorio. En los E.U., fue el Departamento de Marina el que solicitó a la Oficina Nacional de Normas (National Bureau of Standards -NBS-) el desarrollo de un sistema eficiente con requerimientos específicos de costo, peso y rangos



Ilustr. X-8: Higrómetros para la radiosonda de la NBS-Navy.

de medición para los instrumentos (aprox. 25 dls/pza., 1 lb., -70 °C a 30 °C, etc.) y, además, debía generar señales útiles para la localización por radio dirección. El diseño fue realizado por Diamond y Asociados en 1937 bajo una serie de directrices técnicas y meteo-



Ilustr. X-9: Circuito de medición y transmisión para la radi-sonda de la NBS-Navy (1940)

rográficas no definidas originalmente. Por ejemplo, se decidió que no podía utilizarse ningún tipo de motor o reloj, ya que, además, los meteorólogos estaban interesados en conseguir registros de temperatura y de humedad como funciones de la presión. Por tanto, los diseñadores proveyeron un mecanismo en el que un barómetro anerode realizaba contactos sucesivos en valores previstos de presión. Para la transmisión, por otro lado, la señal de radiofrecuencia fue modulada a proporciones de unos cuantos cientos de Hertz, y se diseñaron el termómetro y el higrómetro para producir variaciones calibradas dentro de las audiofrecuencias. Esto se logró usando un oscilador RC en el que la resistencia variaba de acuerdo a los cambios en temperatura o humedad. El termómetro era un tubo de vidrio en forma de "V" lleno con un electrolito no congelable y con electrodos en cada extremo que posteriormente fue reemplazado por un resistor sólido sensible a la temperatura: el termistor. El higrómetro era, originalmente, un paquete de cabellos operando un contacto sobre

una bobina resistiva, que fue cambiado en 1938 por un sistema más complejo pero mucho más confiable a bajas temperaturas. Este consistía en un tubo de vidrio endurecido conteniendo un devanado doble de alambre de cobre estañado y sumergido en una solución de Cloruro de Litio (LiCl) en agua. El dispositivo tendía a "envejecer" muy rápidamente y el diseño debió modificarse. Fue necesario entonces sustituir el tubo de vidrio por uno de aluminio revestido de poliestireno rodeado por una bobina doble de alambre de paladio y revestida a su vez por una capa de acetato de polivinilo parcialmente hidrolizado y con una cantidad de LiCl dependiente del rango previsto de mediciones de humedad. Para rangos mayores, bastaba conectar en paralelo un conjunto de unidades con diferentes concentraciones del químico. Tales mejoras se vieron acumuladas en la radiosonda descrita por la NBS en 1940.

Mientras tanto, en el Reino Unido también se trabajaba sobre radiosondas de modulación en audiofrecuencias, fundamentalmente en el Laboratorio Nacional Físico de Inglaterra (NPL). H. A. Thomas, como sus colegas norteamericanos, había llegado a la conclusión de la conveniencia de la modulación en la transmisión, pero él usó para ello dos frecuencias (700 a 1000 Hz para el barómetro y 1400 a 1700 Hz para el termómetro) simultáneamente. Era fácil proveer osciladores locales separados en el receptor y conectarlos de modo que el operador pudiera ajustar cualquiera de los dos para obtener la condición inicial de cero. Además, en lugar de los audioosciladores RC, Thomas utilizó circuitos LC comunes, con la inductancia variable. El método para ello era variar la apertura de aire en el circuito magnético de un inductor con núcleo de hierro. El diseño original incluía sólo un barómetro y un termómetro, pero posteriormente se agregó un higrómetro y su correspondiente audiooscilador. El dispositivo, en todo caso, no parece haber sido suficientemente satisfactorio, y un diseño completamente nuevo fue realizado por E. G. Dymond y otros en Kew, en 1940, si bien sólo llegó a saberse de este aparato después de la guerra. En él, la transmisión continua de la información fue sacrificada en aras de la ligereza. De hecho, los elementos de presión, humedad y temperatura eran sucesivamente conectados al circuito por un interruptor operado por una rueda de copas, lo que significa que sólo se requería un oscilador de audiofrecuencia. Incluso los elementos de medida fueron rediseñados de

manera que el aparato en general probó ser muy satisfactorio, tanto que permanecía en uso hasta los 1960's con sólo algunas mejoras en el circuito transmisor.

Hasta aquí la historia inicial de los instrumentos de telemetría meteorológica. Como resultado de la Segunda Guerra Mundial se proveyeron enormes recursos a los servicios meteorológicos, particularmente en los Estados Unidos, y los requerimientos constantemente mayores de la aviación civil han apresurado, todavía más, el proceso.

No

Exista

Pagina

## XI.- ESTACIONES METEOROLOGICAS

A lo largo de este trabajo, el concepto "estación meteorológica" se ha empleado varias veces, implícita o explícitamente. Por ejemplo, en el apartado de termometría se hace referencia a su aparición en Europa en el s. XVII por orden del Gran Duque de Toscana Fernando II, y en la introducción se comenta la magnitud de la red meteorológica establecida en Asia y demás zonas de dominio de las grandes potencias imperialistas del s. XIX. El contexto en que se presentan estas referencias da una idea bastante aceptable de qué es y qué función desempeña una estación meteorológica, pero faltan todavía muchas cosas por establecer al respecto y eso es lo que se pretende a continuación.

En primer lugar, las estaciones meteorológicas no son de un tipo único. En el presente, y según la definición en el reglamento técnico de la WMO (u OMM, según se piense en inglés o en español), existen seis divisiones con base en la finalidad general de su instalación y toda una serie de subdivisiones fundadas en criterios específicos.

SEGUN SU FINALIDAD GENERAL, las estaciones meteorológicas pueden ser:

- SINOPTICAS, en las que se obtienen datos que establecen el estado de la atmósfera sobre una región amplia en un momento dado y que permiten realizar pronósticos sobre su evolución y comportamiento.
- CLIMATOLOGICAS, que proporcionan datos meteorológicos de consistencia y duración tales que permiten describir el clima de una región.
- AGRICOLAS o agrometeorológicas, cuya información es utilizada en la determinación del efecto del tiempo atmosférico y del clima en los procesos vitales de plantas y animales, lo que permite establecer las condiciones óptimas para su adaptación y explotación.
- ESPECIALES, que están destinadas a la observación de uno o varios fenómenos específicos y que, por tanto, suelen tener carácter temporal.
- AERONAUTICAS, cuya información sobre el comportamiento y evolución del tiempo atmosférico se destina al servicio de la navegación aérea.

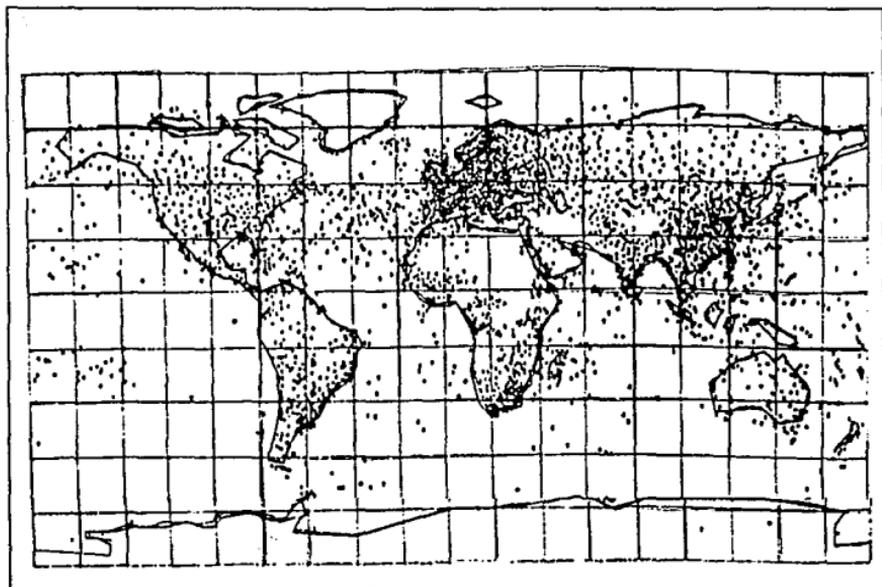
- SATELITES METEOROLOGICOS, a los que se hará posteriormente referencia con cierta extensión y que constituyen en algún sentido una forma extraordinaria de estación sinóptica.

SEGUN LA INFORMACION QUE SUMINISTRAN, pueden ser:

- PRINCIPALES, cuyo objetivo es proporcionar datos de todos los regímenes climáticos y cuya distribución física, equipo utilizado y frecuencia de observación tienden a determinar las condiciones generales del clima en su región.
- ORDINARIAS, cuya información define condiciones climáticas locales o características especiales de uno o varios fenómenos meteorológicos cuya tendencia general fue establecida por las estaciones principales, en relación a las cuales se estudian las variaciones interzonales.
- ADICIONALES, que cubren las necesidades de información específica sobre fenómenos o en áreas no cubiertas por las principales o las ordinarias. Pueden ser transitorias (establecidas para obtener información inmediata y de uso temporal en el fundamento de trabajos y proyectos específicos -de ingeniería hidráulica o de establecimiento de sitios agropecuarios, por ejemplo-) u operacionales (que tienen carácter permanente, al menos tan lejos como las necesidades lo sean -provisión de datos sobre abastecimiento y contaminación de aguas, previsión de crecientes, etcétera-).
- DE REFERENCIA, los datos de las cuales se constituyen en normales climatológicas dadas su homogeneidad y representatividad, para lo cual se establecen en sitios cuyas condiciones (geográficas, hidrológicas, poblacionales) puedan suponerse invariables por periodos promedio de 30 años. En realidad, más que una categoría, las estaciones de referencia constituyen un atributo adicional para las estaciones principales y ordinarias.

Además de los criterios anteriores, existen el referente al nivel de la observación (estaciones de superficie y estaciones de altitud, es decir, globos sonda y satélites) y el asociado con el entorno de la misma (terrestre, aérea y marítima).

Evidentemente, las estaciones sinópticas son las que proporcionan el grueso de la información que, una vez procesada, permitirá la previsión del tiempo atmosférico en el futuro



Ilustr. XI-1: Distribución de las estaciones de la red sinóptica internacional (1989)

inmediato. Son, por tanto, las que constituyen la red internacional que, bajo la dirección de la WMO, contaba en 1988 con 14.000 estaciones de superficie (9.000 terrestres y 5.000 en barcos mercantes seleccionados) con distintos niveles de automatización (partiendo de cero) y en las que se realizan simultáneamente, cada tres horas y los 365 días del año, las mediciones y observaciones definidas internacionalmente. Añádanse los datos obtenidos en los océanos por

boyas automáticas y recogidos por satélite y se tiene el conjunto de datos que circula a través de la red mundial de telecomunicaciones definida y organizada por la WMO.

Paralelamente a las observaciones de superficie, está la red mundial de radiosondeo (globos sonda) que contaba en 1988 con 1500 estaciones. Se efectúan dos radiosondeos diarios (a las 0 H y a las 12 H TIG -Tiempo Internacional de Greenwich-) para observar vientos, temperatura y humedad atmosféricos hasta los 25 km de latitud. Y finalmente, para completar los sistemas mundiales de observación, los satélites meteorológicos de órbita polar en operación que, en general, realizan dos observaciones globales de la Tierra cada 24 horas.

Como es fácil suponer, el equipo utilizado en las estaciones de tipos diversos es de tipos diversos, y hay una diferencia más que apreciable entre los termómetros empleados en una estación terrestre atendida por observadores humanos y los radiómetros de infrarrojo que en un satélite permiten establecer perfiles de temperatura atmosférica referidos a la altitud. Sin embargo, como consecuencia necesaria de la primera parte de este trabajo y como referencia básica respecto a las capacidades de una estación meteorológica moderna, el apartado siguiente describirá con algún detalle el instrumental empleado en una estación meteorológica principal u ordinaria según las normas de la WMO y, en uno posterior, se hará lo mismo con el utilizado en estaciones de altitud para radiosondeo.

## **GENERALIDADES SOBRE EL INSTRUMENTAL METEOROLOGICO EN EL PRESENTE**

También según la WMO, los instrumentos utilizados en una estación meteorológica tienen una clasificación especial, basada en sus características de operación más relevantes. Esta clasificación distingue entre los instrumentos:

- De lectura directa (es decir, que no realizan un registro de sus lecturas).
- Graficadores (que sí realizan ese registro).
- Aparatos compuestos (que miden o registran más de dos variables simultáneamente), los que pueden ser de lectura directa o graficadores.

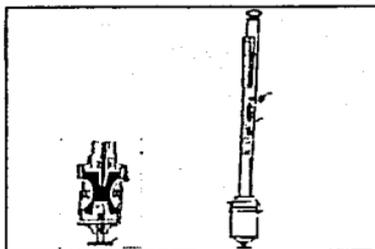
En general, cualquiera de estos dispositivos cuenta con dos elementos esenciales: el sensor (transductor o elemento sensible, que presentará una modificación de sus cualidades físicas o químicas de acuerdo a las condiciones de la variable que censa) y el amplificador-indicador (que incrementa la resolución de las modificaciones físicas del sensor y realiza el señalamiento que establece el valor de la lectura realizada). Los aparatos registradores cuentan además con el elemento registrador, que en la mayor parte de los instrumentos de uso frecuente en las estaciones principales u ordinarias consiste en un tambor accionado por mecanismos de relojería.

## MEDICIONES DE PRESION ATMOSFERICA

Los dispositivos actualmente son de dos tipos principales: los barómetros de mercurio, que utilizan una columna de este metal como indicador; y los barómetros aneroides ("sin líquidos", etimológicamente).

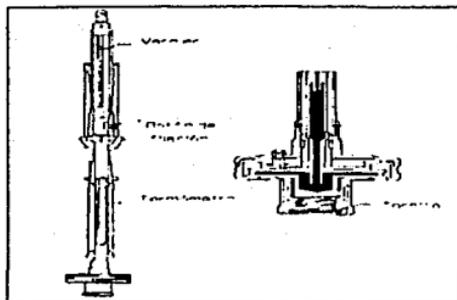
Los barómetros de mercurio, en su forma más simple, son tubos de vidrio de aproximadamente 1 m de longitud y con uno de los extremos sellado, el cual se llena de mercurio y se invierte dentro de un recipiente conteniendo el mismo fluido (en resumidas cuentas, el barómetro de Torricelli). Habitualmente, las estaciones meteorológicas están equipadas con dos tipos de barómetro de mercurio: el de Fortin y el tipo Kew, o de cubeta fija.

El barómetro de Fortin tiene la característica principal de que es necesario ajustar el nivel de mercurio en la cubeta para que su nivel corresponda al cero de la escala. Para lograrlo, se dispone de una punta de marfil afilada cuya extremidad coincide con el plano horizontal que pasa por el cero de la escala, y de un tornillo de ajuste que, al girar, hace variar el nivel del líquido.



Ilustr. XI-2: Barómetro de Fortin.

El barómetro tipo Kew, por otro lado, tiene una escala grabada de manera que compense las variaciones en el nivel de mercurio, de manera que no es necesario ajustarlo.



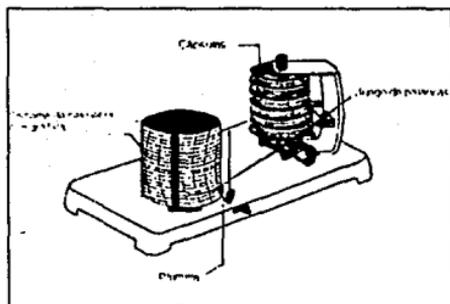
Ilustr. XI-3: Barómetro fijo (de Kew)

Un barómetro aneroides está formado por una cápsula metálica flexible, cerrada herméticamente y en el interior de la cual se ha hecho el vacío (cápsula de Vidie). Si la presión atmosférica aumenta, la cara de la cápsula cede y comprime un resorte; si la presión disminuye, el resorte provoca que la

caja se expanda. Esas variaciones son ampliadas por medio de un sistema de engranes, en el extremo de los cuales se encuentra un indicador que se mueve sobre una escala graduada.

## BAROGRAFO

Es un barómetro registrador en el cual el elemento sensible está constituido por una serie de cápsulas aneroides colocadas una a continuación de la otra, de manera que sus deformaciones se sumen e impriman al brazo registrador un movimiento más poderoso. De todas formas, hay un sistema de palancas que amplifica las deformaciones de las cápsulas.



Ilustr. XI-4: Barógrafo típico

## MEDICIONES DE TEMPERATURA

Los termómetros usados actualmente en las estaciones meteorológicas prácticamente son idénticos a los últimos reseñados en la sección histórica. Así, están en uso los termómetros de "líquido en vidrio", en los que se utilizan mercurio para temperaturas mayores de  $-36^{\circ}\text{C}$  y alcohol etílico para temperaturas inferiores. Los de máxi-

ma son termómetros de mercurio con un estrechamiento cerca del bulbo y colocados horizontalmente. Al aumentar la temperatura, el mercurio dilatado pasa forzado a través del estrechamiento. Al contraerse, el mercurio no tiene fuerza suficiente para pasar de regreso por el canalito y la columna queda cortada indicando la temperatura máxima medida (termómetros de Negretti).

Los termómetros de mínima son de alcohol y tienen un tubo ancho en vez de un capilar, dentro del cual puede moverse un indicador. Si la temperatura baja, el indicador es arrastrado por el alcohol, lo que no ocurre al aumentar la temperatura. También estos instrumentos se colocan horizontalmente (termómetro de Rutherford).

El modelo compuesto, que realiza en el mismo instrumento el registro de máxima y el de mínima también es conocido: es el termómetro de Six, en forma de U y con dos depósitos en los extremos llenos de guayacol, en tanto que los brazos de la U están parcialmente llenos con mercurio. La indicación de máximas y mínimas se realiza también por medio de índices que se desplazan en un solo sentido a menos que el observador quiera regresarlos a su posición original.

Un instrumento interesante es el llamado termómetro de honda, sujeto por un anillo en su parte superior a una cuerda con la que se le hace girar a razón de dos vueltas por segundo, de manera que el bulbo se ponga en contacto con la mayor masa de aire posible. Después de entre treinta y sesenta segundos girando, se realiza la lectura.

Existen y se utilizan además termómetros basados en el principio del termopar, termómetros bimetalógicos (de deformación), termómetros de resistencia (por variación de resistencia de un hilo de platino con la temperatura) y termómetros de termistencias (o termistores, cuya conductividad aumenta con la temperatura). Por cierto, estos últimos suelen utilizarse en los radiosondeos debido a su solidez y pequeño tamaño.

Para terminar, los termógrafos (que grafican la temperatura como una función del tiempo) en uso actualmente son básicamente de dos tipos: los que dependen de un termómetro bimetalógico común y los que dependen de un tipo distinto de termómetro de deformación. Este dispositivo alternativo consiste en un tubo de sección elíptica y material blando lleno de alcohol y curvado. Conforme la temperatura aumenta, la presión del alcohol tiende a enderezar el tubo. En cualquier caso, la deformación del elemento sensor es amplificada y registrada en el tambor de tiempos.

## MEDICIONES DE HUMEDAD (PSICROMETRIA)

La humedad atmosférica es, en principio, la cantidad de vapor de agua que se encuentra en la atmósfera, particularmente en la troposfera, en un momento dado. Su expresión se da de cuatro maneras:

- En términos de su peso por unidad de volumen (humedad absoluta).
- En términos del porcentaje de vapor de agua a determinada temperatura respecto al nivel de saturación -el momento en que el vapor de agua agregado a la atmósfera deja de integrarse a ella y se condensa- (porcentaje de humedad).
- Como complemento del anterior, es decir, cuánto vapor de agua falta en la atmósfera para alcanzar el nivel de saturación a la temperatura del momento (déficit de saturación).
- Utilizando como referencia la temperatura a la que, con el contenido atmosférico actual de humedad, ésta empieza a condensarse (punto de rocío).

Los instrumentos utilizados en las estaciones meteorológicas terrestres para la medición de humedad atmosférica son, como buena parte de los instrumentos reseñados hasta ahora, básicamente idénticos a los descritos en la sección histórica.

## HIGROMETRO

Mide el contenido de humedad en el aire en base al alargamiento de un cuerpo higroscópico (cabello humano, usualmente, que ha sido tratado hirviéndolo con sosa cáustica). El aparato en sí consta de un indicador que se mueve sobre una escala de humedad relativa y que está en equilibrio entre la acción de un pequeño peso y la fuerza elástica del haz de cabellos.

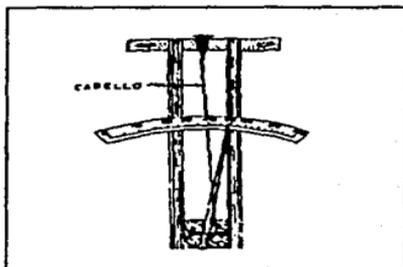
## PSICROMETRO

Que se basa en la diferencia de las temperaturas marcadas por dos termómetros idénticos de mercurio, uno de los cuales tiene el bulbo húmedo al estar envuelto en muselina en contacto con un recipiente de agua. Este último marcará una temperatura menor a la del termómetro seco, más entre menor sea el porcentaje de humedad atmosférica.

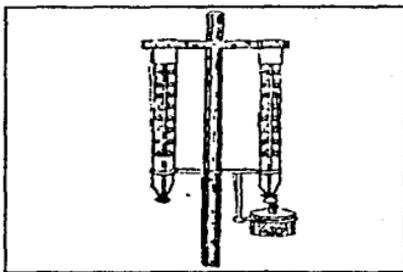
Además, sigue en uso el higrógrafo de cabello, que es fundamentalmente un higrómetro unido a un elemento registrador que incluye un tambor activado por un mecanismo de relojería y que proporciona un registro continuo de la humedad relativa a lo largo de las horas del día.

## CANTIDAD DE LLUVIA (PLUVIOMETRIA)

Otra vez, los instrumentos en uso son similares a los ya descritos. El pluviómetro está formado básicamente de dos partes: el cilindro receptor y una probeta graduada para realizar las mediciones. El cilindro tiene alrededor de 200 cm<sup>2</sup> de superficie y su boca debe estar colocada a una altura de 1.2 m del suelo. El aparato registrador usual, por otro lado, es el pluviógrafo de Hellman. En éste, la lluvia recolectada se dirige a una cámara en la que se mueve un flotador con una pluma que marca sobre un tambor que gira a razón de una vuelta/día y en el que están indicadas las horas. La marca máxima es de 10 mm y al alcanzarla la cámara se vacía por medio de un sifón. El com-



Ilustr. XI-5: Higrómetro de cabello



Ilustr. XI-6: Psicrómetro simple

portamiento del trazo del pluviógrafo permite, además de conocer la cantidad de lluvia caída, determinar la intensidad de las precipitaciones que se presentaron y los períodos en que sucedieron.

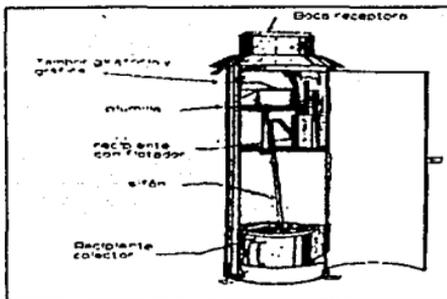
## EVAPORACION

La evaporación del agua precipitada en cualquiera de sus formas (lluvia, granizo

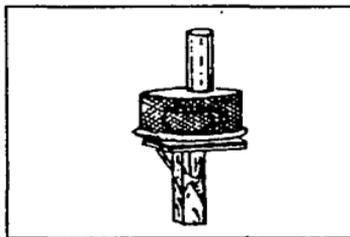
o nieve) o agregada al ambiente por corrientes superficiales o subterráneas está influida por otros elementos meteorológicos, como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad de éste, la presión barométrica y la fuerza y continuidad de los vientos.

Los aparatos en uso para la medición de esta variable son también conceptualmente antiguos. El tanque evaporímetro, por ejemplo, no es más que un cilindro ancho y bajo que se llena de agua y se deja expuesto a la intemperie, midiendo la evaporación en términos de los milímetros de agua perdidos en el tanque entre una lectura y otra.

Una versión ligeramente más sofisticada es el tanque Summerland, que es un tanque evaporímetro pequeño y encerrado en una jaula de malla de alambre para protegerlo de los animales. La jaula tiene una cubierta circular que impide que el agua de lluvia caiga dentro del tanque, que está en contacto con un depósito desde el cual fluye el agua controlada por una válvula flotante, de manera que el nivel en el tanque



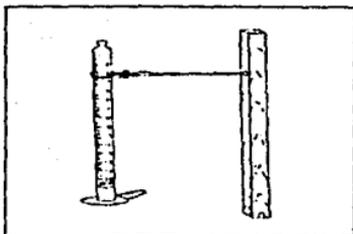
Ilustr. XI-7: Pluviógrafo de Helimann



Ilustr. XI-8: Tanque Summerland

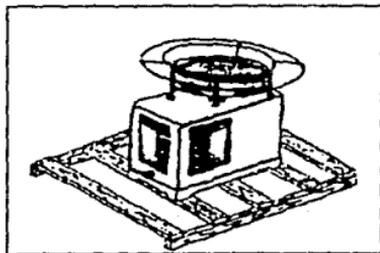
sea constante. La evaporación se mide por la variación en el nivel del depósito secundario.

El evaporímetro de tipo Piche sí es distinto a los anteriores, ya que consiste de una probeta graduada y llena de agua con la boca cubierta por un disco de papel secante e invertida, de modo que el papel está siempre húmedo. La evaporación se mide sobre las graduaciones de la probeta. El papel secante tiende a contaminarse, lo que altera la homogeneidad de su humidificación. Sin embargo, como es muy barato, puede cambiarse con la frecuencia que sea requerida.



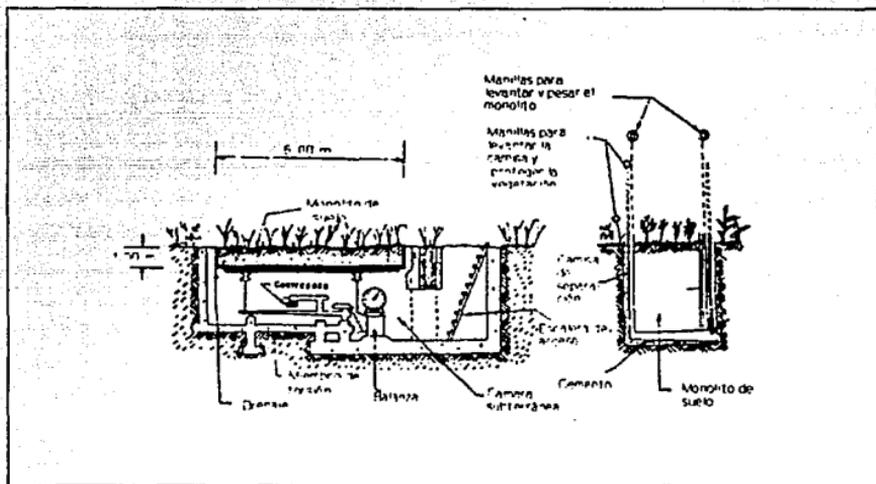
Ilustr. XI-9: Evaporímetro tipo Piche

El evaporígrafo proporciona un registro continuo de la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo. Es en esencia una balanza que pesa el agua que hay en su platillo, el que está protegido contra los animales y el agua de lluvia. La disminución de peso en el plato causada por la evaporación del agua en él activa un sistema de palancas que realiza el registro en un diagrama que puede abarcar hasta una semana completa.



Ilustr. XI-10: Evaporígrafo

Los instrumentos descritos aquí tienen, hasta ahora, la característica de limitarse a indicar la evaporación originada en el suelo de su región. Un instrumento más cercano a la realidad debe considerar también las pérdidas de humedad debidas a la transpiración de los vegetales del área. Esta clase de instrumentos se llaman "lisímetros", y son estructuras diseñadas de modo que permiten contener un volumen de suelo con una



Ilustr. XI-11: Lisímetro de Pruitt y Angus

población vegetal típica. Pueden clasificarse, según su sistema de medición:

- Drenaje (entradas y salidas volumétricas).
- Sistemas de control de humedad.
- De pesada (mecanismos hidráulicos y electrónicos).

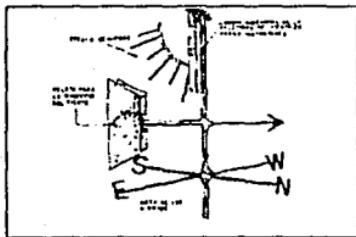
En general, se puede establecer que un lisímetro es tan simple como una caja enterrada en el suelo y conteniendo algún dispositivo para medir la humedad, o tan complejo como un sistema de flotación con líquidos pesados o con sistemas electrónicos con registros automáticos. Un ejemplo se muestra en la ilustración XI-11.

## VIENTO

Las características del viento son fundamentalmente dos: dirección y velocidad. La dirección solía registrarse con una veleta y la velocidad a través de anemómetros. Actualmente, sin embargo, el término "veleta" se refiere a un instrumento que posee una rosa de los vientos, una flecha que indica la dirección y lo que en la sección histórica se identificó como un anemómetro de oscilación (una lámina oscilante cuyo extremo libre es movido por el viento sobre una escala que indica la velocidad).

El "recorrido del viento" es un concepto que se detalló con anterioridad: es la distancia que las masas de aire recorren al moverse con la velocidad del viento durante un período determinado. Esta

variable se mide todavía con un anemómetro totalizador de copas (tres copas horizontales que giran alrededor de un eje vertical y que al girar activan un contador de vueltas que registra en kilómetros y metros el recorrido del viento) y permite, en todo caso, conocer la velocidad promedio del viento por relación al recorrido y al intervalo de tiempo de que se trate.

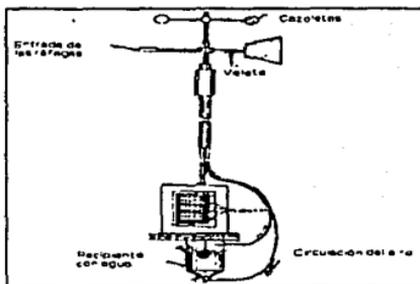


Ilustr. XI-12: Veleta con anemómetro de plato oscilante.

Los anemógrafos mecánicos en uso actualmente son una combinación de veleta y anemómetro totalizador acoplados a sistemas de graficación a través de engranes. Imágenes e información más detallada se presentaron en el apartado correspondiente de la sección histórica.

Los anemocinemógrafos son aparatos un tanto más sofisticados, pues incluyen las prestaciones de los anemógrafos comunes y la capacidad de registrar la fuerza de las ráfagas

que se presentan en un lapso determinado. Consta principalmente de un tubo de presión (ver sección histórica) unido a una veleta para asegurar su orientación al viento. El extremo del tubo de presión llega a un recipiente con agua donde se encuentra un flotador cuyos movimientos son registrados en una gráfica.



Ilustr. XI-13: Anemocienógrafo

### MEDICIONES DE RADIACION

La actinometría comprende el estudio y medida de la intensidad de las radiaciones en general, y de las radiaciones solares en particular. En el caso del estudio meteorológico, resulta de interés tanto la radiación recibida por la superficie terrestre como la reflejada en la misma. La proporción de la radiación reflejada respecto a la recibida se denomina "albedo" y resulta de importancia para establecer lo que se conoce como "radiación neta" o "balance de energía" y que permite prever el efecto de la insolación global en el sistema termogaseoso que es la atmósfera.

Existe una cantidad apreciable de instrumentos para mediciones de radiación, que pueden agruparse de la siguiente forma:

- Pirheliómetros, que miden la radiación solar directa que incide sobre una superficie perpendicularmente a ésta.
- Piranómetros, que miden tanto la radiación solar directa como la difusa proveniente de todo el cielo sobre una superficie horizontal terrestre. Se les conoce también como "solarímetros" o "actinógrafos".
- Heliógrafos, que miden solamente la duración de la insolación (horas de brillo solar). Existen dos tipos generales: los que aprovechan el calor del sol y los que funcionan por impresión de película sensible.

- Pirgeómetros, que miden sólo la intensidad de la radiación infrarroja.
- Pirradiómetros, que miden la radiación solar y la infrarroja proveniente de todo el hemisferio.
- Radiómetros netos, que realizan todas las mediciones requeridas para establecer el balance de energía radiante.

Los pirheliómetros son los más precisos de los instrumentos dedicados a medir radiación, por lo que suelen utilizarse como calibradores estándar. Dado que son costosos, sólo se encuentran, en general, en laboratorios de investigaciones especiales. Gómez y Arteaga ("Elementos básicos para el manejo de instrumental meteorológico") citan dos pirheliómetros de uso frecuente en la actualidad, que son:

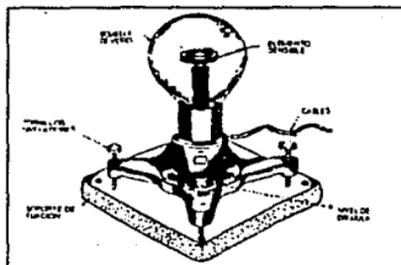
- Pirheliómetro de Abbot, que es fundamentalmente un cilindro metálico en cuyo fondo se coloca un disco macizo de plata que contiene el bulbo de un termómetro ordinario. La variación en la temperatura del disco relacionada con su masa y con el calor específico de la plata proporciona, al margen de los efectos de absorción del cilindro en sí y del termómetro, la cantidad de energía que se ha recibido. Es de notar la necesidad de mantener el eje del tubo paralelo a la dirección de incidencia de los rayos solares, lo que puede lograrse manualmente o a través de algún dispositivo automático de control.
- Pirheliómetro de Gorczyński, que mide las diferencias de potencial generadas por un par termoeléctrico consistente en dos placas contiguas de metal sobre las que incide la luz solar. Los pares comúnmente utilizados son de cobre-constantan, hierro-constantan, cromoníquel-níquel y cobre-hierro.

Los piranómetros, por otro lado, tienen características comunes a todos los modelos en uso, las que se derivan de las necesidades propias de la medición que realizan. Por ejemplo, el elemento sensible está protegido por una cubierta de vidrio o de cuarzo a fin de mantenerlo limpio y seco. Esta cubierta, además, tiene la característica de ser transparente sólo a las longitudes de onda generadas por el Sol (entre 0.3 y 3 micras, si bien las cubiertas de vidrio de color funcionan entre las 0.35 y 2.8 micras y las de cuarzo entre 0.25 y 4 micras).

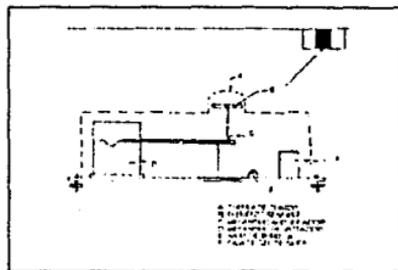
La superficie receptora tiene en general dos sensores: uno ennegrecido, que absorbe gran parte de la radiación incidente y uno blanqueado que refleja la mayor parte de ella.

Los piranómetros descritos por Gómez y Arteaga (ibid) son:

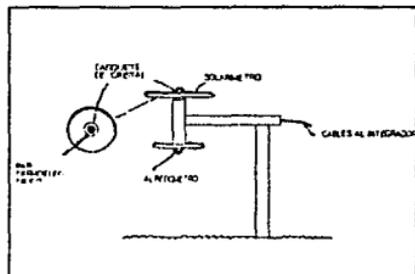
- Piranómetro de Eppley, en el que el elemento sensible consta de dos anillos concéntricos de plata delgados y planos. El exterior está cubierto de blanco (óxido de magnesio) y el interior de negro. La diferencia de temperatura entre los dos anillos se determina por un número grande (16 ó 50, según la precisión requerida) de termopares cuyos componen-



Ilustr. XI-14: Piranómetro de Eppley



Ilustr. XI-15: Piranómetro bimetalico de Robitzsch



Ilustr. XI-16: Solarímetro y albedómetro.

tes están en buen contacto térmico con la parte inferior de los anillos. El conjunto de receptores está dentro de una bombilla de vidrio llena de aire seco y con las características ópticas comentadas.

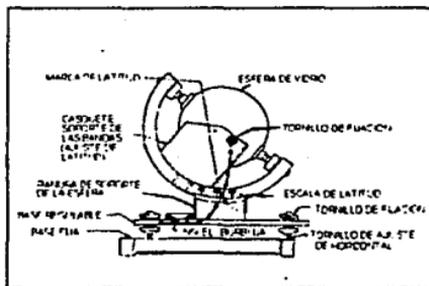
- Piranómetro bimetalico de Robitzsch, que presenta una cúpula de cuarzo que cubre al elemento sensible, formado por tres láminas bimetalicas paralelas entre

sí, la central negra y las exteriores blancas. Las diferencias de deformación son amplificadas por un juego de palancas en cuyo extremo está la pluma registradora. El tambor de registro gira por un mecanismo de relojería. El aparato sólo es útil en la determinación de totales diarios, ya que tiene tiempos de respuesta del orden de quince minutos para el 98% de respuesta final. Dentro del contenedor, además, hay una caja de gel de silicio que absorbe la humedad que pudiera concentrarse dentro.

El solarímetro y albedómetro es una forma reducida (y doble) del piranómetro de Eppley: un par termoeléctrico protegido por un casquete de cristal y expuesto a la luz directa del sol transforma el calor producido por ésta en voltajes. La sección del albedómetro es idéntica, excepto porque el sensor está dirigido a tierra, de manera que no recibe la radiación solar directa, sino la reflejada.

Los heliógrafos utilizados actualmente funcionan virtualmente de la misma forma que los reseñados en la sección histórica: el calor del sol o la radiación de onda más corta radiada por él se utilizan como generadores de registro, y no es necesario que haya un tambor móvil para realizarlo, ya que su movimiento aparente cubre la necesidad de introducir el tiempo en los registros.

Del primer tipo (registro por temperatura) es el heliógrafo de Campbell-Stokes, que concentra, gracias a una esfera de vidrio, los rayos solares sobre la superficie de una banda de cartulina especial. Esta cartulina es colocada en el interior de un casquete esférico con el diámetro apropiado para que precisamente sobre ella se forme el foco de la esfera de vidrio externa. Este casquete tiene, además de un mecanismo de ajuste dependiente de la



Ilustr. XI-17: Heliógrafo de Campbell-Stokes.

latitud de la región, tres pares de ranuras que permiten poner tres tipos de bandas, según la época del año en que se realicen las mediciones.

Por otro lado, el heliógrafo de Jordan registra la duración de la insolación sobre una gráfica de papel fotosensible. Consta de un cilindro de bronce provisto de una tapa, la que debe quedar dirigida al norte, y montado sobre una base por medio de un perno que permite darle la colocación adecuada de acuerdo a la latitud. El cilindro tiene dos perforaciones, una de las cuales queda orientada al Este y la otra al Oeste, a través de las cuales se impresiona el papel sensible. La gráfica está dividida en horas iguales alrededor de su superficie, así como dos perforaciones que, evidentemente, corresponden con las del cilindro (ya que la gráfica recubre la superficie interna de éste).

#### **APARATOS COMPUESTOS**

Son, evidentemente, aquellos que miden y/o registran simultáneamente dos o más elementos meteorológicos. Los más usuales en las estaciones manuales actualmente son:

- Termobarógrafo, que registra temperaturas y presión atmosférica.
- Termohigrógrafo, que registra temperaturas y humedad relativa simultáneamente.
- Meteorógrafo (no es ninguno de los aparatos históricos reseñados), un instrumento triple que registra continuamente temperatura, presión atmosférica y humedad relativa sobre un tambor de registro común.
- Termohigrómetro, que mide directamente la temperatura, la humedad relativa, humedad absoluta y punto de rocío.
- Polímetro, que está constituido por un higrómetro de cabello y un termómetro común y que permite, aparte de sus mediciones directas, calcular déficit de saturación y punto de rocío.

No

Exista

Pagina

## **XII.- ANTECEDENTES DEL USO DEL RADAR PARA FINES**

### **METEOROLOGICOS**

#### **GENERALIDADES**

La capacidad que tiene el ojo para identificar detalles, colores con sus diversas tonalidades no la tiene el radar que, en cambio, nos permite "ver" lo que existe en algún punto lejano a pesar de que la visibilidad sea pobre o nula, debido a las condiciones meteorológicas reinantes en ese momento (por ejemplo la niebla, neblina, la falta de iluminación, etc.). Gracias a esto es posible identificar si un objeto se encuentra o no en cierta posición a cierta distancia.

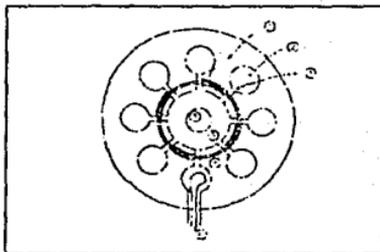
Durante la Segunda Guerra Mundial el uso del radar como instrumento para la detección de vehículos enemigos fue de gran importancia, ya que al saber que existían era posible eliminar el peligro que representaban. Es de notar que, en el mismo periodo en el que el radar fue inventado, se tenía en proceso la realización de la bomba atómica, y que, al final, los dos conceptos tenían finalidades similares.

El significado de "radar" es "radio detección y alcance" (del inglés RAdio Detection And Ranging) y su funcionamiento se basa principalmente en la generación de una señal u onda electromagnética que es radiada al medio ambiente en una dirección; esta señal es reflejada al encontrar un obstáculo y, teniendo en cuenta el tiempo transcurrido entre su emisión y la recepción del reflejo se puede determinar la distancia a la cual se encuentra el objeto en la dirección en la cual se radió esta señal.

Pronto se descubrió que la señal radiada debía ser de alta frecuencia para evitar pérdidas excesivas por transmisión. En un principio se trabajaba en el orden de 200 a 400 Megahertz, usando el principio de la resonancia de circuitos RLC. Con la invención británica del magnetrón se lograron frecuencias de 3000 Megahertz ( Banda S ) y de 10,000 Megahertz ( Banda X: una representación típica del espectro electromagnético se presenta en

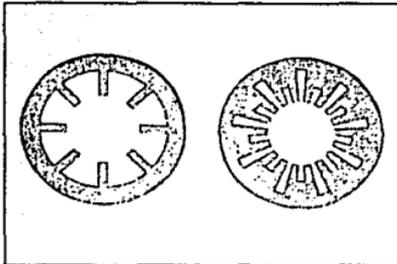
los apéndices). La tardanza del Departamento de Inteligencia del enemigo en descubrir el uso que los Aliados daban al instrumento dio una gran ventaja a éstos hasta 1943.

El magnetrón es un dispositivo por medio del cual es posible alcanzar frecuencias de resonancia extremadamente más altas que con resonadores u osciladores de tipo RLC comunes. Inventado en 1939, el magnetrón clásico consiste de un cuerpo exterior de cobre (el ánodo) en el que se han practicado agujeros y ranuras que tienen un comportamiento conjunto similar al de un arreglo LC. El cátodo es un cilindro interior muy robusto de metal recubierto de una capa de óxido y que debe soportar el calentamiento y la desintegración que provoca un bombardeo constante de electrones. Entre el cátodo y el ánodo hay un espacio en el que interactúan el campo eléctrico generado por ellos y un campo magnético estático perpendicular al plano transversal de esa región. Dicha interacción fuerza a los electrones disponibles en el entorno a entregar su energía al campo de radiofrecuencia que se genera dentro de las cavidades del cátodo. La señal se obtiene conectando un acoplador o directamente una guía de ondas a una de esas cavidades.



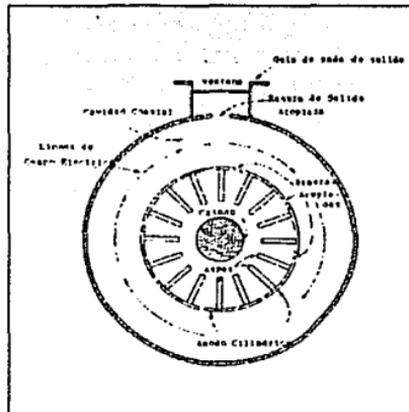
Ilustr. XII-1: Magnetrón de cavidad

Mejoras sustanciales en eficiencia, potencia y vida útil se consiguieron al desarrollarse el magnetrón coaxial, cuyo concepto básico es idéntico al del dispositivo clásico, pero el espacio de interacción entre los campos se traslada alrededor del ánodo, que ahora es un conjunto cilíndrico de pares de barras con dirección radial. El cátodo sigue siendo un cilindro sólido y la señal de RF se obtiene de una ranura de salida con el conector apropiado para la guía de ondas que se utilice.



Ilustr. XII-2: Tipos distintos de magnetrones de cavidad

Al usar el radar con microondas (una aportación del magnetrón) se encontró que las tormentas y masas nubosas producían ecos muy fuertes que no aparecían, en cambio, al usar frecuencias del orden de 200 a 400 Mhz. Esto dio origen a investigaciones al respecto que llevaron a la determinación precisa de las frecuencias de trabajo convenientes para el estudio de fenómenos meteorológicos de ese tipo.



Ilustr. XII-3: Magnetrón coaxial.

También se descubrieron accidentalmente los que se llamarían luego "ductos atmosféricos", que debieron el nombre a que, gracias a las condiciones reinantes en ese momento, la señal se veía impulsada a mayores distancias al rebotar entre dos capas atmosféricas que se comportaban como espejos, alcanzando distancias hasta de 400 km cuando en realidad el radar había sido diseñado para sólo 32 km de rango.

Una aportación más del radar a la Meteorología fue el descubrimiento de un estrato atmosférico a los 11 km de altura que se hacía observable al usar radares de 3 cm (Banda X) y 11 cm (Banda S) pero que no aparecía al usar radares de 72 cm (Ultra alta frecuencia, UHF). Esta capa es la llamada tropopausa (ver introducción: estructura de la atmósfera), que se comporta como un objeto sólido al usar radares con longitud de onda del orden de 11 cm y es indetectable al usar ondas de 72 cm.

La introducción de antenas giratorias automáticas muy poco después que se iniciara el desarrollo del radar le dio a los investigadores la flexibilidad que la modificación pretendía. Ahora se podía "barrer" el horizonte y se podían detectar a grandes distancias nubes y otro tipo de obstáculos como serían las montañas. Y luego, era más o menos natural empezar a hacer los barridos en forma vertical dando como resultado la identificación de las nubes en sus dimensiones físicas (altura, espesor, etc.) y su ubicación espacial.



Ilustr. XII-4: Ecos producidos por una tormenta

Para poder determinar a qué distancia se encuentra el objeto detectado se utiliza la siguiente ecuación:

$$R = \frac{cT_r}{2} \quad (1)$$

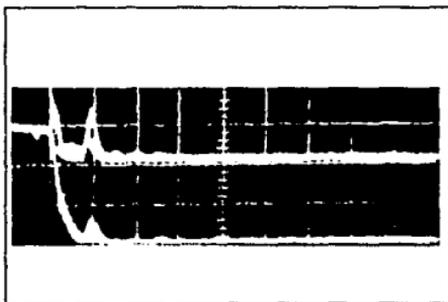
Donde:

$c$  es la velocidad de la luz.

$T_r$  es el tiempo en que tarda la señal en regresar.

El radar, así, tenía una gran utilidad tanto en la localización de objetos como en la determinación de la altura a la que se encontraban y, gracias al efecto Doppler (que se comenta mas adelante), se podía determinar la velocidad relativa con la que se movía.

Para el perfeccionamiento de este instrumento tuvieron que pasar muchos años de investigación e interpretación de los datos adquiridos por los primeros modelos. Entre las primeras deficiencias evidentes cabe mencionar el rango de alcance inicial que no era muy amplio. Estas imperfecciones, sin embargo, dieron lugar a diversos descubrimientos, como los que se han comentado y como el hecho de que, al orientar la antena en una cierta posición se encontró que aparecía una imagen que no debería de existir y sin embargo se presentaba aún observando que el cielo se encontraba despejado. A este tipo de fenómenos se les conoció como "Angeles" y se encontró que eran debidos a las irregularidades en el índice de refracción en esa parte del cielo.



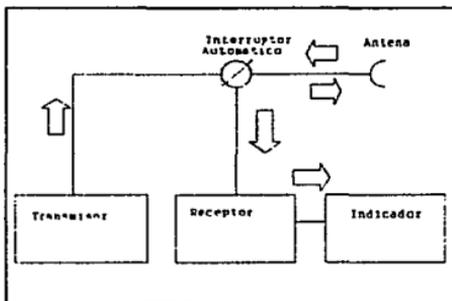
Ilustr. XIII-5: Ecos producidos por los "Angeles"

## OPERACION BASICA

Las partes principales que constituyen el radar son:

- Transmisor
- Receptor
- Indicadores
- Antena
- Switch automático

Básicamente, el funcionamiento se inicia al generarse la señal a transmitir, que es enviada por el transmisor a la antena y de ésta al medio ambiente. Al encontrar un obstáculo, la señal es reflejada y recibida por la misma antena que la transmitió, de donde pasa ahora al receptor y de ahí al indicador. Este indicador puede ser un tubo de rayos catódicos en la cual la información es mostrada, o bien puede ser un medio magnético en el cual puede ser almacenada esta información para después retomarla y analizarla. La función del switch automático es la de desviar la información recibida de la



Ilustr. XII-6: Esquema básico del radar.

antena al módulo del receptor y permitir el paso de la señal generada por el transmisor a la antena. La antena, por sus características de diseño, puede recibir sólo señales con cierta potencia, y dado que la transmisión en su recorrido pierde potencia, se debe establecer el rango de acción del radar por la siguiente ecuación:

$$R_{\max} = \left( \frac{P_i G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

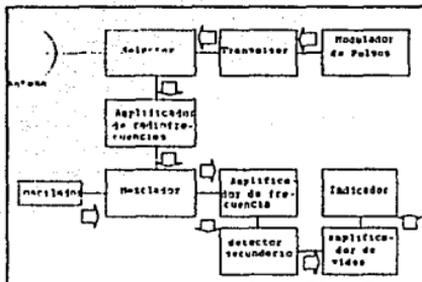
Donde:

- G es la ganancia de la antena
- $P_i$  es la potencia de la señal radiada
- $S_{\min}$  la potencia mínima de recepción
- $\sigma$  sección del radar
- $A_e$  área efectiva de la antena

Estas partes han sido mejoradas actualmente y utilizan componentes mucho más pequeños y sofisticados.

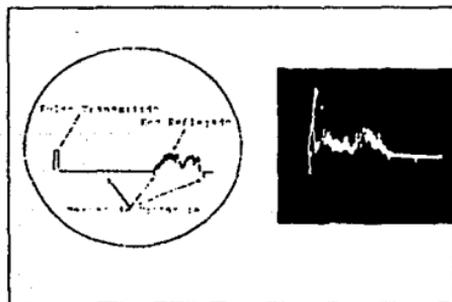
### METODOS DE VISUALIZACION

En cuanto a la presentación de la información, existen dos principales tipos de diagramas para el radar:



Ilustr. XII-7: Diagrama de bloques

- PPI, indicador de posición plana (Plain-Position Indicator, en sus siglas en inglés) es el diagrama en el cual se puede observar en forma radial la distancia a la cual se encuentra el objeto en estudio. Las marcas concéntricas nos indican una distancia ya definida por las características del radar (ilustración XII-9).

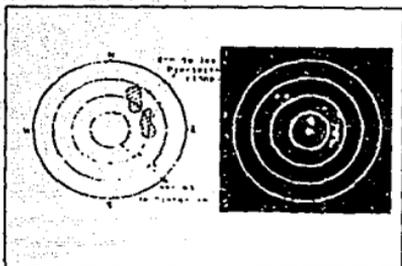


Ilustr. XII-8: Análisis de una señal

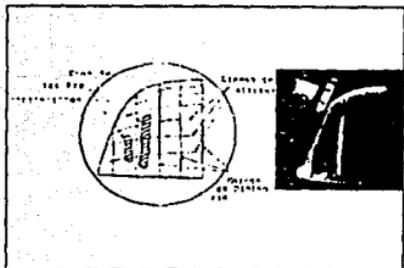
- RHI, indicador de altura (Range-Height Indicator en sus siglas en inglés) es el diagrama que nos muestra el perfil vertical del objeto en estudio, esto es, la altura (XII-10).

Aparte de los diagramas PPI y RHI, existen otras modalidades de representación de la información de radar, menos usuales. Estas son:

- A. Una pantalla de deflexión modulada en el cual la deflexión vertical es proporcional a la fuerza del eco del objeto y las coordenadas horizontales proporcionales a la distancia a la que se encuentra éste.



Ilustr. XII-9: Ecos en formato PPI



Ilustr. XII-10: Ecos en formato RHI

muy similar al de RHI en donde la altura o altitud está dada en las coordenadas verticales.

- B- Una pantalla rectangular de intensidad modulada en donde las coordenadas horizontales son indicadas por el ángulo de azimut (orientación geográfica a partir de 0 grados al norte) del objeto y las verticales por la distancia a la que se encuentra.
- C- Una pantalla rectangular de intensidad modulada en donde también las coordenadas horizontales son indicadas por el ángulo de azimut pero las verticales por el ángulo de elevación.
- D- Similar al de tipo C pero con una estimación de la distancia a la que se encuentra.
- E- Una pantalla rectangular de intensidad modulada en el cual las coordenadas horizontales son de la distancia a la cual se encuentra el objeto y las verticales el ángulo de elevación. Es muy similar al de RHI en donde la altura o altitud está dada en las coordenadas verticales.
- F- Pantalla rectangular en el cual el blanco aparece como un punto en el centro cuando la antena de radar está orientada hacia el objeto. Los errores en la orientación horizontal y vertical son visualizados en las coordenadas horizontales y verticales respectivamente.
- G- Esta pantalla rectangular muestra al objeto lateralmente centralizado cuando la antena está orientada al azimut, y aparecen una especie de alas que se van agrandando conforme el objeto se va alejando.
- H- Este tipo es similar al B modificado para incluir una indicación de la elevación angular. El blanco aparece como 2 puntos espaciados y unidos con una línea brillante cuya pendiente es proporcional al seno del ángulo de elevación del objeto.

- I- Una pantalla en donde el objeto aparece como un círculo completo cuando el radar está orientado hacia él. El radio de este círculo es proporcional a la distancia del objeto; una incorrecta orientación de la antena cambia al círculo por un segmento cuya longitud de arco es inversamente proporcional a la magnitud del error en la orientación de la antena.
- J- Esta es una pantalla tipo A modificado cuya base de tiempos forma un círculo en la pantalla y el objeto aparece como deflexiones radiales de la base de tiempos.
- K- También es una modificación del tipo A en donde el objeto aparece como un par de deflexiones verticales. Cuando el radar está correctamente apuntando hacia el objeto, estas líneas son de la misma altura, y cuando no, la diferencia en la amplitud de la deflexión es un indicador de la dirección y magnitud del error de orientación.
- L- En este caso en el monitor aparecen dos puntos, uno a la izquierda y otro a la derecha de una base de tiempos centrada en el monitor. Ambos puntos son de la misma magnitud cuando la antena está correctamente orientada hacia el objeto. cualquier variación representa el error relativo de orientación y la distancia que existe desde la base de tiempos nos indica la distancia a la cual se encuentra el objeto.
- M- Este es de tipo A modificado en donde la distancia es determinada moviendo un señal de pedestal ajustable a lo largo de la base de tiempos hasta que concidan con la posición horizontal de las deflexiones de la señal del objeto, el control que mueve este pedestal está calibrado en distancia.
- N- En este caso es parecido al de tipo K teniendo una señal de pedestal ajustable como en la de tipo M, para la determinación de la distancia.
- O- Pantalla tipo A modificado con la adición de un elemento para poder determinar la distancia.
- R- Del tipo A también modificado con la base de tiempos expandida cerca del punto en el cual se localiza el objeto para una mejor exactitud en la determinación de la distancia.

## TIPOS DE RADARES

El criterio más evidente para la distinción entre tipos distintos de radar es el uso final a que son destinados. Esto nos lleva a pensar en radares militares y civiles, y dentro de cada uno en radares de localización, de apoyo a la navegación aérea o marítima y, por supuesto, los de uso meteorológico. En un nivel técnico, sin embargo, la distinción es bastante más simple: podemos referirnos a radares convencionales y a radares de efecto Doppler, cada uno de los cuales tiene aplicaciones prácticas distintas y complementarias.

Todos los radares tienen una arquitectura conceptual en común, pero presentan diferencias más o menos evidentes en la forma de generar la onda, en cómo se recibe, en la forma en que se procesa la información, en la forma en que la información es mostrada, y en elementos secundarios que distinguen a un instrumento de otro.

## RADARES CONVENCIONALES

Los radares convencionales, evidentemente, son los primeros radares que se utilizaron. Estos constan de un tubo de rayos catódicos en el cual la información es mostrada al usuario. Originalmente, la antena tenía que ser girada y posicionada manualmente si se quería observar una zona específica de la región. Su alcance no era muy grande, por lo que incluso las primeras mejoras que se dieron se enfocaron tanto a una mayor cobertura en el espacio, como al logro de una mejor definición y fiabilidad en el resultado.

Al trabajar con los radares más antiguos, el gasto de energía eléctrica que se necesitaba para su funcionamiento era muy grande en comparación con el uso práctico que se podía obtener, esto es, que la relación precio contra las dimensiones, alcance y confiabilidad no era buena. Sin embargo, los sucesivos adelantos en las tecnologías y las técnicas de fabricación fueron mejorando dicha relación considerablemente.

El gran avance de la tecnología digital (C.I., transistores) logró que los radares redujeran no sólo su peso y tamaño, sino también sus necesidades de mantenimiento, en tanto que su manejo se facilitó en gran medida. La señal es, evidentemente, recibida de forma analógica, por lo que para su actual procesamiento es necesario digitalizarla, esto es, cambiar su estructura analógica a una digital. De esta manera el procesamiento es más sencillo mediante el uso de microprocesadores y la forma de visualizar esta información también.

La información recibida se puede almacenar en medios magnéticos para que en el momento que se requiera, pueda ser procesada dando mayor prioridad a otro tipo de actividad. La ventaja que trajo el radar digital fue principalmente en que se le podía dar a los tonos de grises (que se usaban en el de rayos catódicos) otro tipo de colores para poder apreciar la información de una manera más clara y atractiva. Esto con el uso de monitores de colores.

Podemos citar algunos ejemplos de radares y sus características.

	ARSR-3	ARSR-8
Banda de frecuencia	L	S
Frecuencia	1250 - 1350 Mhz	2700 - 2900 Mhz
Rango	370 Km	111 Km
Potencia	5 KW	1.4 KW
Potencia promedio	3.6 KW	875 W
Ruido	4 dB	4 dB
Ancho de pulsos	2 $\mu$ s	4.6 $\mu$ s
Frec. de pulsos	310 - 365 Hz	700 - 1200 Hz

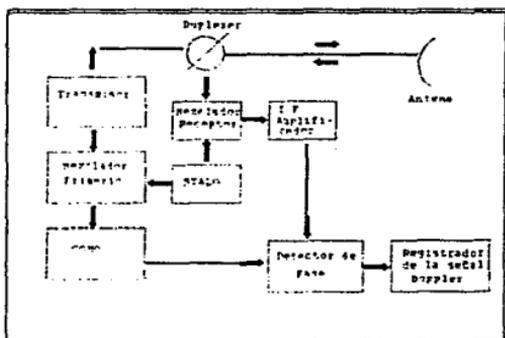
	ARSR-3	ARSR-8
Vel. de rotación de antena	5 rpm	12.8 rpm
Tamaño de antena	12.8 x 6.9 m	4.9 x 2.7 m
Ancho de rayo azimut	1.25°	1.35°
Cobertura de elevación	40°	30°
Ganancia de la antena	34 dB	33 dB
Polarización	horiz., vert. o circ.	vert. o circ.
Velocidad ciega	1200 nudos	800 nudos

## RADARES DE EFECTO DOPPLER

El efecto Doppler se relaciona directamente con el cambio en la fase y la frecuencia de la señal recibida con respecto a la transmitida como se puede apreciar en la ilustración XII-11 y XII-12.

Muchos radares utilizan el efecto Doppler para determinar no sólo la distancia a la que se encuentra un objeto, sino además

calcular la velocidad relativa que lleva el objeto con respecto al radar. Esto nos permite determinar con cierto grado de fiabilidad cuánto tiempo le llevará a este objeto llegar a su destino teniendo como datos tanto su velocidad relativa como la distancia a la que se

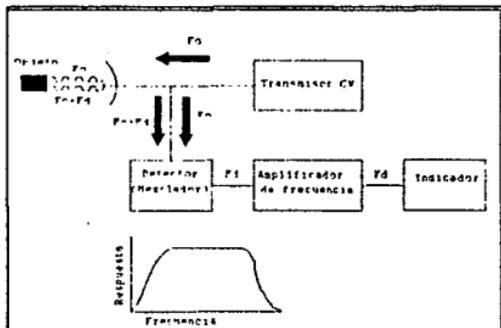


Ilustr. XII-11: Diagrama de bloques de un radar Doppler.

encuentra de su destino. En el caso de una tormenta el tener esta información, puede disminuir grandemente tanto las pérdidas materiales como las humanas que se presentarían en el caso de un desastre de esta naturaleza.

Estos radares tienen una configuración similar a los convencionales, cuentan con otros instrumentos y dispositivos con los cuales pueden identificar la variación producida en la fase de la señal debido al rebote de ésta en el objeto a identificar.

Sus partes principales son básicamente idénticas a las del radar convencional, excepto porque las señales recibidas son analizadas especialmente para detectar las modificaciones en fase y frecuencia en que se fundamenta.

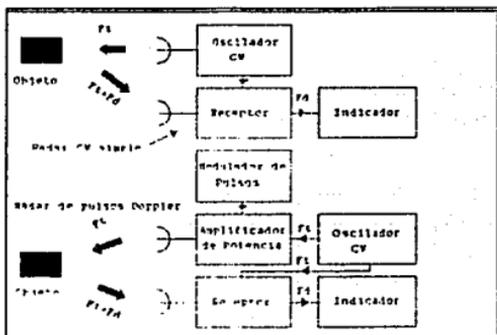


Ilustr. XII-12: Diagrama de un radar CW, con respuesta en frecuencia de su amplificador.

- Oscilador
- Modulador de pulsos
- Receptor
- Transmisor
- Indicador
- Antena
- Switch automático

El oscilador se encarga de generar una señal de cierta frecuencia, que es modulada por el modulador de pulsos y enviada de ahí a la antena. La señal viaja y al regresar su frecuencia ha sido modificada y es comparada con la señal del oscilador, la diferencia

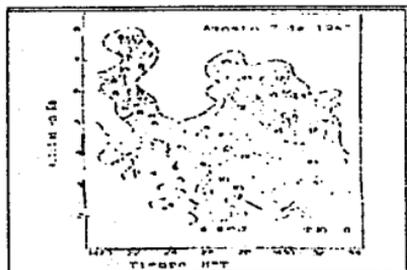
encontrada es proporcional a la velocidad relativa del objeto detectado. En el caso de que el objeto se encontrara detenido, la frecuencia de la señal no se vería modificada, en cuyo caso la velocidad relativa sería de cero. Aún así, la ecuación (1) anotada arriba es usada para determinar la distancia de este objeto.



Ilustr. XII-13: Comparación entre la estructura de un radar CW simple y un radar Doppler

Es preferible mandar señales

por medio de pulsos porque se gasta menos energía que si se estuviera mandando la señal continuamente. El tiempo que pasa entre cada señal mandada al espacio debe de ser ajustado de tal manera que dé tiempo a que la señal llegue a su máximo alcance y, en el caso de que exista un objeto antes de alcanzar este límite regrese antes de mandar nuevamente otro pulso. En el caso de que la señal sea reflejada por un objeto pasando este límite, entonces la señal no llegará con la potencia suficiente como para poderla recibir por la antena.



Ilustr. XII-14: Perfil horizontal de velocidad de viento logrado con radar Doppler



Ilustr. XII-15: Perfil de velocidad de viento contra altura logrado con radar Doppler

El uso del radar es sumamente importante para los aeropuertos, en donde el tener la información de dónde se encuentra un objeto (tanto un avión como una perturbación atmosférica del tipo de masas nubosas o tormentas) permite programar el momento en que puede un avión o no despegar y en qué momento puede aterrizar; y también en caso de ayuda ya que muchas veces la visibilidad en algunas zonas es muy baja y esto puede ocasionar algún percance de considerable magnitud. Un viento de determinadas características puede ocasionar un accidente muy grave, por lo que el uso de radares Doppler con cierta polarización soluciona este problema. Un ejemplo es el Radar Doppler Perfilador de Viento (RDPV).

La antena del RDPV se mueve en forma vertical y de esta manera la información obtenida es el perfil de algún objeto (en nuestro caso el viento) y al ir girando al radar en forma horizontal se tiene la forma del tridimensional de perfiles de viento. La altura que la señal alcanza debe de ser limitada a la tropopausa ya que bajo esta zona es en donde las variables atmosféricas son de mayor interés para nosotros. La manera de procesar esta información no difiere mucho de las demás, sólo en la manera de desplegar la información que debe ser distancia contra altura. Esto es de gran ayuda en los aeropuertos (mencionado con anterioridad) debido a que esta información permite tomar la decisión de si un avión puede o no aterrizar debido a la configuración del viento. También es de gran utilidad en la NASA ya que para los lanzamientos de cohetes esta información es de vital importancia.

En la mayoría de las aplicaciones de los radares, las únicas propiedades que se puede obtener del blanco son la distancia y el ángulo en que se encuentra. Estos son llamados detectores de desvanecimientos o detectores "BLOB", ya que sólo pueden reconocer al objeto en la pantalla como un desvanecimiento y localizarlos en el espacio. Es posible, sin embargo, extraer mas información sobre el blanco. El radar puede reconocer un tipo de blanco de otro, esto es, que puede reconocer la diferencia entre un avión DC-10 de un 747, o que un particular transporte es un tanque y no un camión de refrigeración. Esta capacidad es conocida como Clasificación de blanco.

Esto puede ser determinado por:

- Resolución de alto rango
- Resolución de alto rango con monopolos
- Modulaciones por motores
- Fluctuaciones por sección cruzada
- Apertura sintética del radar
- Apertura sintética inversa del radar
- Polarización
- Clasificación automática de blanco

El detalle de estas clasificaciones requeriría de un capítulo completo. Dado que el tema no está directamente relacionado con este trabajo, se omitirá dicha explicación. Sin embargo, sí corresponde listar los blancos meteorológicos que un radar puede reconocer. A continuación se anotan someramente las variables atmosféricas de utilidad:

- Densidad de precipitación.
- Velocidad y dirección del viento.
- Gradientes de temperatura.
- Tipo de nubosidades dependiendo de su densidad.
- Neblinas.
- Tormentas.
- Tornados.
- Huracanes.
- Perfiles de viento.

Para medir tanto la velocidad como la dirección del viento es necesario que la antena describa un recorrido de forma cónica. Como se puede apreciar en las ilustraciones XII-14 y XII-15, es posible distinguir que existen variaciones en el aire.

## OTROS RADARES

Las siglas NCAR, presentes en la denominación de muchos radares de uso principalmente meteorológico, significan Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (National

Center for Atmospheric Research en inglés). Existen muchos tipos en uso actualmente y de éstos mencionaremos dos de los más típicos a manera de ejemplos.

CP2		
Banda	S	X
Sistema Doppler	sí	no
Ganancia	42.5 ± 0.5	44.5 ± 0.1
POLARIZACION		
Transmisor	horiz. o vert.	horizontal
Receptor	horiz. o vert.	horiz. y vert.
ANTENA		
Forma	parabólica	parabólica
Diámetro	8.5 m	2.4 m
Ganancia (dB)	45.3 ± 0.3	44.5 ± 0.7
TRANSMISOR		
Long. de onda (cm)	10.68	3.20
Frecuencia (MHz)	2809	9375
Potencia pico (KW)	1200	40
Ancho del pulso (µs)	0.2 a 1.5	1.0
Frec. del pulso (Hz)	400 a 1667	400 a 1000

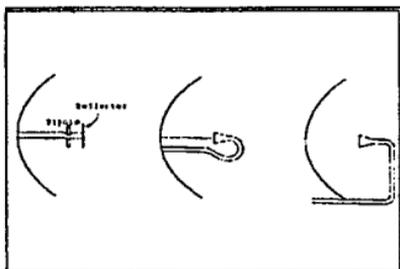
WF-3D		
Tipo	LF	TA
Frecuencia (MHz)	5445	9315
Longitud de onda (cm)	5.59	3.22
Ancho del pulso ( $\mu$ s)	6.0	0.5
Frec. de pulso (pps)	200	1600
Potencia de salida (KW)	70	60
Polarización de antena	Lineal horiz.	Lineal vert.
Ganancia del haz principal (dB)	37	40
Rango máximo (Km)	370.4	92.6
Vel. de rotación (rpm)	4	8

Estos son sólo unos ejemplos de radares de uso meteorológico. Constantemente se ven modificados, por lo que una lista de todos los tipos existentes en el mundo no sería fácil de obtener, aparte del secreto que se guarda en muchos casos (en el área militar por ejemplo).

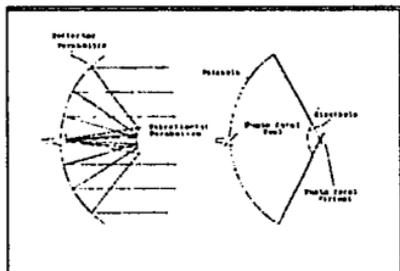
Se pueden obtener gracias al procesamiento digital, gráficas tridimensionales de nubes, perfiles de vientos, huracanes, tornados, variaciones térmicas, etc. Esto se logra al ir modificando el ángulo de elevación y el de posición horizontal. El procesamiento digital se efectúa mediante microprocesadores y microcontroladores los cuales previamente han sido programados con algoritmos (instrucciones matemáticas y series numéricas) de

diferente estructura para poder interpretar en la forma más eficaz posible los datos suministrados. Muchas veces se pueden presentar errores en las observaciones y no debido al ser humano, sino a las variaciones climatológicas que se producen en nuestro planeta. Por ejemplo, suele darse el caso de recibir lecturas erróneas debido a la reflexión, en algunas capas de la atmósfera, de objetos que no se encuentran en la posición determinada por el procesamiento normal. Es por esto que es necesario tener diferentes algoritmos para el procesamiento de estas señales dependiendo de las condiciones en que las lecturas fueron obtenidas. Tales algoritmos, por cierto, ya no pueden limitarse a la identificación digital tradicional de la información obtenida. El análisis de ésta requiere la aplicación de elementos de Inteligencia Artificial, particularmente en el área

de reconocimiento de patrones complejos. El desarrollo en este sentido, por lo menos hasta donde fue posible profundizar en esta investigación, no parece estarse dando demasiada prisa.



Ilustr. XII-16: Tipos de receptores



Ilustr. XII-17: Receptores parabólicos e hiperbólicos

No

Existe

Página

### **XIII.- SATELITES ARTIFICIALES**

Un satélite, astronómicamente, es un cuerpo que gira alrededor de otro mayor siguiendo una ruta determinada por las leyes de la mecánica. Un satélite artificial es exactamente eso, con la salvedad de que el objeto menor ha sido puesto en ruta por un cohete espacial, y de que su permanencia en ella es mucho menos prolongada que la de la Luna en la suya, por ejemplo. La radiación solar, el magnetismo terrestre o la influencia inevitable de nuestro satélite natural sacan paulatinamente al artificial de su estado de equilibrio hasta que vuelve a caer sobre la Tierra, desintegrándose normalmente en las capas bajas de la atmósfera. Evidentemente, los satélites no son simplemente una extensión de las radiosondas del siglo XIX y principios del XX, aunque originalmente se les hayan parecido mucho. Debido a las características del medio que les es propio, los satélites artificiales deben proporcionar energía a los instrumentos que transportan, recibir instrucciones de la Tierra, controlar su propia trayectoria para evitar que se aparte de las especificaciones originales y transmitir los datos recolectados. Hay actualmente una gran cantidad de estos dispositivos girando alrededor de la Tierra (varios miles) con diversos grados de complejidad inherente y con muchas aplicaciones particulares. Sin embargo, hay cuatro campos fundamentales en que su actividad se puede dividir:

- Los satélites científicos estudian la atmósfera, el Sol, las estrellas, el campo magnético terrestre y la superficie terrestre, etc.
- Los satélites meteorológicos proporcionan una visión global de los factores climáticos sobre amplias regiones del planeta.
- Los satélites de comunicaciones, comúnmente con órbitas geoestacionarias (es decir, con desplazamientos sincronizados con la rotación del planeta, de manera que permanezcan constantemente sobre la misma zona) situadas a 36.000 km de altitud. Sirven como retransmisores para todo tipo de comunicación electromagnética.

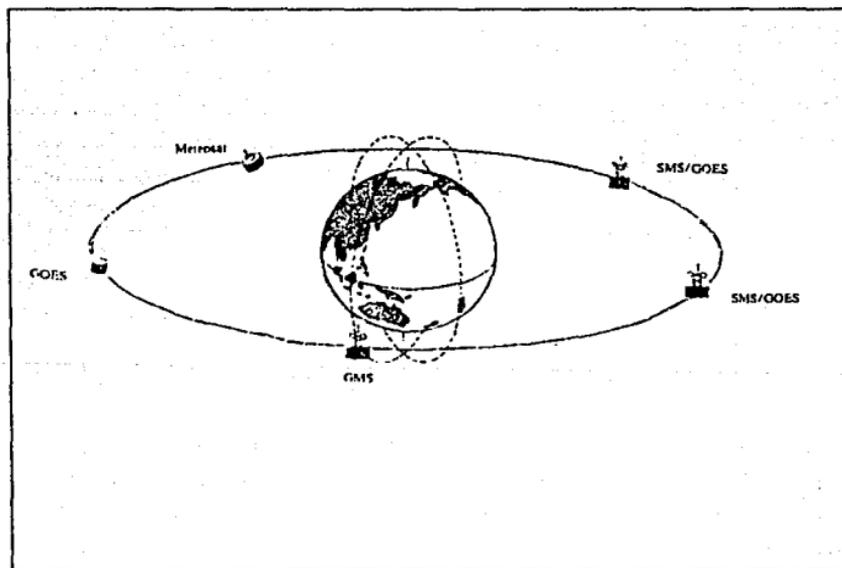
- Los satélites militares, cuyos objetivos precisos son a menudo desconocidos, pero incluyen normalmente vigilancia óptica y electromagnética de los vecinos, y últimamente capacidades apreciables de agresión.

La primera experiencia realizada en astronáutica con éxito apreciable se inició el 4 de octubre de 1957, cuando la entonces Unión Soviética lanzó el Sputnik I, que no era más que una esfera de 58 cm de diámetro y 83.4 kg de peso. Sin embargo, el Sputnik I llevaba un transmisor incorporado y tanto los científicos como los aficionados a la radiocomunicación pudieron escuchar durante casi todo el mes los ingenuos "bip... bip" que enviaba el primer objeto artificial existente fuera de la atmósfera terrestre. Luego, en noviembre del mismo año, se lanzó el Sputnik II, que llevaba a bordo a Laika, la perra que demostró con su experiencia que un organismo vivo podía resistir un lanzamiento y las condiciones ambientales (particularmente la ingravidez) del espacio. Desafortunadamente, entonces no era posible recuperar a Laika. Por otro lado, el primer satélite norteamericano (el Explorer I) fue lanzado el 31 de enero de 1958 y, aunque pesaba sólo 8.3 kg hizo un importante descubrimiento: la existencia de los anillos de radiación de Van Allen.

La primera aplicación práctica de los satélites artificiales estuvo, contra lo que podría pensarse, en la meteorología. Desde su órbita y gracias al enorme horizonte que esta posición le proporcionaba, el TIROS-I hizo posible desde su lanzamiento (en abril de 1960) observar y seguir la formación y el desplazamiento de masas nubosas, comprobando de paso la eficacia de esta clase de dispositivos y de la información que podían recolectar. La meteorología se transformó desde entonces, dando quizá el paso definitivo hacia la cientificación que ha venido experimentando desde que surgió. Considerando que el problema fundamental de la meteorología es conjuntar información ambiental de todo el planeta, lo mismo de los océanos que de los continentes y que hay zonas en la Tierra inaccesibles aún para la instalación de instrumentos de observación, es evidente que los satélites llegaron a cubrir un hueco que de otra manera habría permanecido vacío por mucho tiempo más. En efecto, un satélite en órbita geoestacionaria a 36.000 km de altura puede mantener bajo observación constante alrededor del 30% de la superficie terrestre, y virtualmente todo el

planeta puede fotografiarse con tres satélites en esa órbita y separados entre sí  $120^\circ$ , usando por la noche dispositivos sensibles a la radiación infrarroja y durante el día la luz visible. Aparte de esas imágenes, pueden obtenerse datos acerca de los patrones de formación de nubes, temperaturas en la superficie y en diferentes niveles de la atmósfera, velocidad del viento y humedad atmosférica.

Los satélites que llevan a cabo esta labor son, en realidad, de dos tipos fundamentales: los enviados a una órbita baja (alrededor de 900 km de altura) y próxima a los polos, de



Ilustr. XIII-1: Satélites involucrados en el programa internacional GARP (Global Atmospheric Research Program)

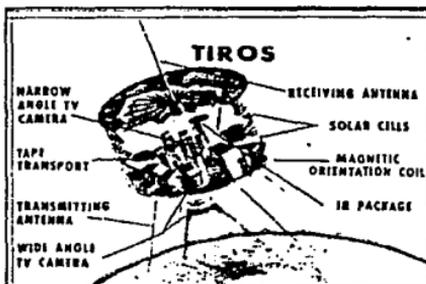
manera que conforme la Tierra gira pueden observarla toda, cada sección durante períodos establecidos, y los localizados en órbitas geoestacionarias, que observan siempre la misma región del planeta.

Por otro lado, el uso de satélites ha hecho posible crear un servicio meteorológico mundial (Global Data Processing System) que opera a niveles internacional, regional y nacional. Los tres centros internacionales están localizados en Washington, Moscú y Melbourne (Australia). Los centros regionales se localizan en áreas estratégicas como el Caribe y Centroamérica. Finalmente, los centros meteorológicos nacionales se ocupan de la consecución y utilización de información local dentro de las fronteras nacionales. Los tres grupos están estrechamente ligados y colaboran para mantener en operación un verdadero sistema global de meteorología, y todo, evidentemente, bajo la reglamentación de la WMO (siglas en inglés de la Organización Meteorológica Mundial). Esta, por cierto, y en colaboración con el Consejo Internacional de Uniones Científicas, lanzó el mayor programa de investigación meteorológica jamás propuesto. La pretensión fundamental de este Programa de Investigación Atmosférica Global (GARP en inglés) era investigar y conjuntar gran cantidad de información acerca de la atmósfera, así como desarrollar y probar instrumentos apropiados para incrementar el conocimiento global en este campo. Así, se utilizaron más de cien estaciones terrestres, naves orientadas a la investigación meteorológica, aeroplanos automáticos y diez satélites en este proyecto que duró once meses (hasta noviembre de 1979) y todos los datos obtenidos fueron enviados a 22 centros por todo el mundo.

Evidentemente, el poder mayor de los satélites artificiales se manifiesta cuando se utilizan computadoras en tierra capaces de manipular la inmensa cantidad de datos que ellos envían. Es esta conjunción la que ha hecho posible incrementar el conocimiento científico acerca de la evolución de los fenómenos meteorológicos, y de paso ampliar la capacidad de predicción fundada en modelos cada vez más confiables (con todo, todavía no demasiado) que constituirá la entrada definitiva e indiscutible de la meteorología en el marco de las verdaderas ciencias.

## LOS PRIMEROS: LA SERIE TIROS

Los primeros satélites meteorológicos que se pusieron en órbita (y los primeros de uso práctico de cualquier clase) fueron los de la serie TIROS (Television and InfraRed Observation Satellite). La forma de todos ellos (diez en total) era fundamentalmente cilíndrica, con algo más de 106 cm de diámetro y 48 cm de alto (56 cm si se incluía la lente colocada en la base). Las paredes del 'cilindro' eran en realidad 18 segmentos planos en los que se montaban las celdas solares. El peso variaba entre los 122 kg del TIROS-1 y los más de 135 de las versiones más avanzadas que incluían nuevos sensores y distintas mejoras.



Ilustr. XIII-2: Estructuras básicas de TIROS

Básicamente, los integrantes de la serie TIROS estaban conformados por los siguientes subsistemas:

- Una estructura, para soportar el equipo.
- Celdas solares y baterías de almacenamiento, para potencia.
- Un subsistema de estabilización, de modo que la dirección a que los sensores se dirigían podía ser determinada.
- Dispositivos de comando y relojes para controlar las funciones del equipo y cuándo debían ser iniciadas.
- Transmisores de localización para rastrear la posición del satélite, y telemetría para proporcionar datos sobre cómo operaban los distintos elementos.

- Dos cámaras para fotografiar los sistemas nubosos y grabadores en cinta para almacenarlas cuando se estuviera fuera de alcance de una estación terrestre de adquisición de datos.
- Radiómetros para medir radiación solar reflejada e infrarroja emitida (calor) por la Tierra y la atmósfera.
- Radiotransmisores y antena para enviar los datos recabados a la Tierra.

Como primer intento práctico en la astronáutica, los satélites TIROS fueron también los que sentaron las bases de los diseños posteriores. En general, las características globales -ya que no las capacidades y los propósitos específicos- de prácticamente todos los satélites construidos luego son muy aproximadas a las de esta primera serie. Por eso se describe a continuación con algún detalle cada uno de estos subsistemas, a fin de establecer desde ahora un marco de referencia que evite sucesivas acotaciones acerca de sistemas fundamentalmente iguales.

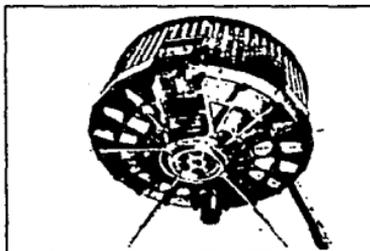
## LA ESTRUCTURA

La carcasa de un satélite debe cumplir con funciones que van más allá de sostener su peso y el de los instrumentos que contiene. Esto, por lo pronto, debe cumplirlo bajo tres condiciones fundamentales:

- 1) Durante la fabricación, verificación y transportación anteriores al lanzamiento.
- 2) Durante los choques, aceleraciones y vibraciones extremas producidas por el lanzamiento en sí.
- 3) Bajo las condiciones de ingravidez espacial.

Un soporte que cubra estos requerimientos debe ser extremadamente firme y preciso, así como extraordinariamente ligero debido a las limitaciones de poder de lanzamiento. No debe vibrar naturalmente a las frecuencias en que las vibraciones producidas por el lanzamiento son especialmente fuertes. La estructura debe distribuir eficientemente el calor de varias fuentes (particularmente la luz solar y el producido por la operación del equipo electromecánico), de manera que ninguna sección del satélite esté excesivamente fría o caliente. En este sentido, la estructura es apoyada por una cubierta que absorbe o emite energía radiante. Además, estas funciones de soporte firme, resistencia a impactos y vibraciones y distribución del calor deben ser cumplidas también por las partes estructurales de cada subsistema o componente del satélite. Finalmente, la estructura debe proveer un medio para sujetar firmemente el satélite al cohete de lanzamiento (o, modernamente, al brazo manipulador del transporte en uso) y, por supuesto, para liberar limpiamente dicha sujeción en el momento preciso.

En el caso de los satélites TIROS, la plancha base estaba reforzada por una serie de varillas que se entrelazaban para afirmar aún más la estructura. La mayor parte del equipo estaba sujeto a las varillas radiales. Un anillo al centro de la armazón de varillas sujetaba el artefacto al cohete de lanzamiento, y la ligereza se logró construyendo la carcasa con una aleación de aluminio. Los lados y la parte superior estaban, evidentemente, unidos directamente a esta plancha base, y soportaban sólo una pequeña fracción del equipo (celdas solares, antena receptora, sensor de sol para indicación de dirección norte y controles de dirección axial). A pesar de ello, la parte superior contaba una estructura de varillas muy similar a la de la plancha base y hay postes que conectan ambos extremos entre cada dos paneles laterales. La posibilidad de oscilación fue evitada gracias a la forma de cilindro aplanado del conjunto, la que produce una distribución de centros de



Ilustr. XIII-3: Vista de la plancha base de la carcasa de TIROS

inercia rotacional mucho mayor en sentido horizontal que vertical. Y sin las limitaciones de diámetro impuestas por el cohete de lanzamiento, dicha forma hubiera sido mucho más acusada.

## UNIDAD DE POTENCIA

TIROS usaba celdas solares como fuente primaria de poder, directamente para manejar el equipo contenido en el satélite, y también para recargar el paquete de baterías de almacenamiento de níquel-cadmio. Estas últimas operaban el satélite durante las porciones "nocturnas" de su órbita y durante los cortos períodos de gran disipación de energía, como la toma de fotografías y la transmisión de datos.

TIROS contaba con 9120 celdas solares montadas en los lados y la cubierta superior para alimentar el equipo, y 140 más sólo para mantener información acerca de cuánta potencia estaba siendo utilizada. Cada celda era de 1 x 2 cm y tenían inicialmente una eficiencia de aprox. 7.5% de la energía solar recibida. Estaban ensambladas en paquetes de cinco que eran a su vez combinados en módulos de ochenta celdas. Los paquetes estaban conectados en arreglos de circuitos serie y paralelo apropiados para producir los voltajes y corrientes requeridos. Para el caso de que un paquete de celdas fallara, lo que provocaría una derivación de poder hacia su región, había diodos colocados en los puntos apropiados que actuarían como válvulas de seguridad. A partir de los 115 módulos de fotoceldas, muchas conexiones separadas van a las baterías y, a través de un circuito de derivación, directamente a los equipos. De esta forma, toda la potencia posible estaba disponible todo el tiempo, incluso si algunas celdas fallaban. Otra vez, había protección implantada por bancos de diodos.

Según la cantidad de luz, los módulos de fotoceldas podían producir en conjunto hasta 37 volts y 25 watts en exceso de los requerimientos mínimos. El promedio de potencia disipada, en todo caso, fluctuaba entre los 16 y los 21 watts. Esta energía llegaba a los equipos del satélite a través de un regulador de voltaje, y a tres separados bancos de

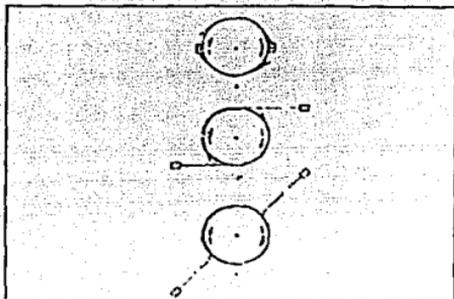
baterías que aseguraban, en caso de falla, que no todo el satélite quedaría inutilizado. Por cierto, este sistema fue uno de los mayores problemas de diseño e implantación en toda la etapa previa al lanzamiento del TIROS-I. A veces, las fotoceldas producían mucha energía, pero había poco equipo funcionando para utilizarla, de manera que las baterías tendían a cargarse muy rápidamente y a provocar temperaturas excesivas dentro de sus compartimentos sellados, lo que las desgastaba e inutilizaba en muy poco tiempo. El problema fue resuelto usando reguladores y sensores de temperatura que, bajo determinadas condiciones de ésta y de presión en los compartimientos de las baterías, reducían la intensidad de carga al mínimo.

La mayor parte de los dispositivos de TIROS usaban la potencia directamente tomada de las fotoceldas o las baterías, sin necesidad de regulación adicional para mantener el voltaje debajo de 33 volts, pero los relojes requerían de valores de 13 volts  $\pm$  1%, en tanto que las cámaras de TV y algunos otros subsistemas requerían reducciones a 24.5 volts  $\pm$  1%.

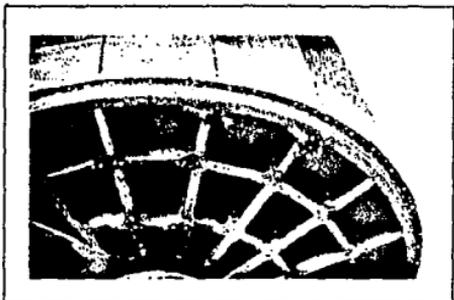
## ESTABILIZACION Y CONTROL

Es evidente que la utilidad de un satélite meteorológico depende fundamentalmente de saber hacia dónde está mirando en un momento dado. No es posible basarse en señales terrestres porque las nubes podrían ocultarlas y, sin embargo, tales marcas son muy útiles para confirmar la validez de las localizaciones obtenidas por otros medios.

Idealmente, es claro que un satélite meteorológico debería tener su base siempre paralela a la superficie terrestre bajo él. Pero cuando se desarrolló TIROS no había forma de incluir un sistema de autodireccionamiento que cupiera dentro de la capacidad de carga de los cohetes de lanzamiento. La alternativa a la estabilización hacia la tierra era la estabilización en el espacio (espacio como sistema de coordenadas, no espacio sideral), de manera que el eje del satélite estuviera constantemente apuntando a un punto determinado en él. Como cualquier objeto que gira sobre su propio eje tiende a mantener esta condición



Ilustr. XIII-4: Dispositivo de reducción de velocidad angular (yo-yo)



Ilustr. XIII-5: Retrocohetes de recuperación de velocidad angular

(es el principio del giroscopio) la aplicación era bastante evidente. Y la rotación era proporcionada por un grupo de pequeños cohetes perpendiculares al cuerpo de la tercera sección del cohete de lanzamiento precisamente antes de su separación de la segunda etapa. Así, el satélite era puesto en su órbita definitiva girando a cerca de 120 rpm. Esta velocidad angular, sin embargo, era excesiva para la resolución de las cámaras y los sensores de radiación, que sólo podían realizar un confuso barrido de sus objetivos. Por ende, dicha velocidad era reducida hasta un 90% gracias a un dispositivo llamado Yo-Yo. Dos pesos unidos a largos cables arrollados alrededor de la base del satélite son liberados poco después de la puesta en órbita. Conforme se extienden -y terminan flotando en

el espacio- el dispositivo reduce la velocidad angular idealmente a 12 rpm (ley de la conservación del ímpetu angular). Así, el satélite en órbita rotaba presumiblemente con una dirección constante de su eje de rotación, pero la velocidad angular disminuía necesariamente debido al efecto del campo magnético de la Tierra y su interacción con los campos producidos por su propia operación. Después de algunos meses, la velocidad de giro llegaba al límite deseable de 9 rpm, por debajo de la cual el aparato podía oscilar y los sensores de radiación barrer la Tierra muy lentamente para su velocidad en órbita, lo que produciría vacíos en los flujos de datos. Para obviar el inconveniente, TIROS tenía varios pares de pequeños cohetes sólidos montados sobre -y apuntando a lo largo de- el perímetro de la base. Cuando dos de estos cohetes se activaban simultáneamente en puntos diametralmen-

te opuestos de la base para prevenir disturbios en la dirección del eje, la velocidad angular aumentaba en aproximadamente 3 rpm. Esta activación era efectuada por una señal de control radiada desde tierra y llegó a tener éxito incluso un año después del lanzamiento del satélite (el caso del TIROS VI). Como sólo un par de cohetes era activado en cada ocasión, era también posible repetir el ciclo de disminución-recuperación de velocidad varias veces a lo largo de la vida útil del aparato.

Como a pesar de todo las oscilaciones no podían ser eliminadas totalmente por el giroscopio, se agregaron otros métodos para asegurar la estabilidad del eje. Estos fueron:

- 1.- Una distribución adecuada de los pesos.
- 2.- Sobre lo mismo, un cuidadoso equilibrio alrededor del eje, el que se conseguía gracias a pruebas previas al lanzamiento y durante las cuales se añadían pequeños pesos en los lugares adecuados. Por supuesto, el punto anterior tendía a asegurar que los pesos requeridos en las pruebas finales fueran muy pequeños.
- 3.- Además, un par de pequeños pesos sobre rieles a lo largo de lados opuestos de la estructura, llamados TEAM (Tuned Energy Absorbing Mass) y que eran liberados durante la puesta en órbita. Estos pesos se movían a lo largo de los rieles absorbiendo y disipando la energía de cualquier oscilación.

Ahora bien, una vez que se tiene asegurada una rotación alrededor de un eje estable el problema es determinar la dirección de ese eje y la posición en el espacio del satélite a fin de localizar el punto al que las cámaras están apuntando en un momento dado. Esta determinación de posición se lograba en los TIROS con un explorador de horizonte que, "mirando" lateralmente fuera del satélite, barre la órbita tal como la ve éste. La idea es localizar los límites entre la tierra y el espacio bajo cualquier condición de iluminación, lo que evidentemente excluye los sistemas ópticos. Pero como la temperatura del espacio exterior

ronda los 4 °K, la de la Tierra no baja nunca de los 220 °K (nubes altas extremadamente frías) y el promedio de ésta ronda los 280 °K, la diferencia es en teoría más que suficiente para que un sensor infrarrojo detecte un cambio tan brusco y con él la posición del horizonte. Pero en la práctica resultó mucho más complicado que eso, ya que los sensores infrarrojos no miden temperaturas, sino energía radiada, y la localización del horizonte debía hacerse a partir de diferencias en los valores medidos de esa energía. Cuando la zona de frontera estaba libre de nubes, el sistema no presentaba problemas, pero una masa nubosa complicaba enormemente distinguir entre ella y un verdadero horizonte. El problema se resolvió en parte mejorando la resolución de estos sensores, pero nunca lo fue por completo, al menos en los TIROS<sup>1</sup>.

Una vez que se dispuso de un sensor de horizonte suficientemente confiable podía ubicarse la dirección de las cámaras y su área cubierta de acuerdo al siguiente proceso:

- Detección de dos sucesivos horizontes espacio-Tierra y Tierra-espacio en una revolución del satélite por el explorador de horizontes.
- Medición del porcentaje de giro en que el explorador está dirigido hacia la Tierra.
- Con ese porcentaje y la altura conocida del satélite, cálculo del ángulo entre el eje de giro de éste y su vertical al terreno. Ese ángulo (ángulo de Nadir) no indicaba por sí mismo hacia dónde apuntaba el satélite respecto a su vertical, pero eso podía determinarse por las variaciones en el ángulo de Nadir confor-

<sup>1</sup> El problema de detección de horizonte se derivaba de las diferencias absolutas de energía infrarroja radiada por el espacio una masa nubosa y la Tierra en sí. El cálculo se basa en las temperaturas Kelvin y es

$$\text{Diferencia nubes-espacio} \quad 220^4 - 4^4 = 24 \times 10^8 \text{ unidades de energía}$$

$$\text{Diferencia nubes-Tierra} \quad 280^4 - 220^4 = 38 \times 10^8 \text{ unidades de energía}$$

Los 60°K de diferencia nubes-Tierra representan una diferencia de energía radiada mayor que la de los 216°K nubes-espacio.

me el satélite se desplazaba en su órbita. A partir de esta información, era posible conocer después la posición del TIROS en cualquier otro punto de su trayectoria, al menos teóricamente.

En la práctica, tales cálculos no fueron siempre todo lo precisos que hubiera sido de desear, de manera que eran completados por observación de las imágenes enviadas, usando puntos terrestres de referencia y ángulos entre el eje de la cámara y el horizonte. Con todo, tales referencias ya debían buscarse sólo dentro de una área determinada al menos aproximadamente por el proceso anterior.

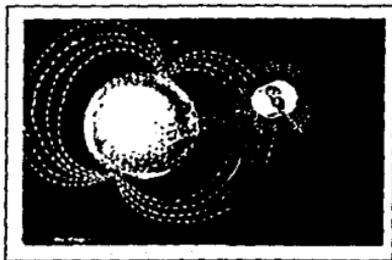
#### DISPOSITIVOS DE COMANDOS Y RELOJES

La selección de las funciones que TIROS podía ejecutar, así como el orden y el tiempo en que debían realizarse estaban dados por el subsistema de comandos y los relojes de cámara asociados. Los órdenes (comandos) eran enviadas por transmisores especiales en cada una de las dos estaciones de comando y adquisición de datos (CDA en inglés), aparte de la instalación especial que permitía sólo inicializar los relojes de cámara desde la estación Minitrack de la NASA en Santiago de Chile. La recepción de las señales era realizada por la única antena, que las dirigía a los dos receptores de comandos, cada uno de los cuales controlaba una cámara y algunos del resto de los subsistemas del satélite. Un decodificador reconocía el comando recibido y lo transfería al subsistema apropiado. La transmisión de comandos se daba en la banda de 148 Mhz, y el reconocimiento de la instrucción dependía del tono o combinación de tonos recibidos y su persistencia.

Las órdenes reconocidas por el satélite eran:

- Encender y calentar los transmisores de televisión.
- Tomar y transmitir directamente imágenes de televisión.

- Reproducir (de los grabadores de cinta) imágenes de video, o datos de radiación en el caso de los TIROS que contaban con sensores de radiación.
- Inicializar, por separado, cada uno de los relojes que determinaban cuándo y dónde se obtendrían las imágenes de video.
- Arrancar los relojes.
- Apagar temporalmente las señales de localización y enviar en cambio datos de verificación de los equipos del satélite.
- Desconectar permanentemente las señales de localización una vez que el satélite dejaba de ser útil.
- Cambiar el estado de la bobina de orientación magnética<sup>2</sup>
- Liberar (si los sistemas automáticos habían fallado) el yo-yo y los pesos TEAM (ver el apartado de estabilización y control). El mismo tono de comando era utilizado para disparar los cohetes de aceleración de giro conforme fuera necesario.



Ilustr. XIII-6: Interacción entre la bobina de control magnético y el campo terrestre

<sup>2</sup> La bobina de orientación magnética es un dispositivo que se agregó a los TIROS a partir del segundo, cuando se hizo evidente el efecto del campo magnético terrestre en la oscilación del eje de rotación. Era una bobina alrededor del cuerpo principal del satélite por la que podían inducirse corrientes controladas de manera que el campo magnético generado por ellas interactuara con el terrestre para minimizar la oscilación.

Los relojes eran contadores de pulsos que arrancaban la cámara conectada a ellos al llegar a los 9000. Los pulsos tenían una frecuencia de 0.5 Hz, pero los contadores podían ser inicializados desde tierra, como ya se comentó. De esta manera era posible programar el inicio de una grabación hasta con cinco horas de antelación, lo que representaba tres órbitas completas.

### SEÑALES DE RASTREO Y TELEMETRIA DE MANTENIMIENTO

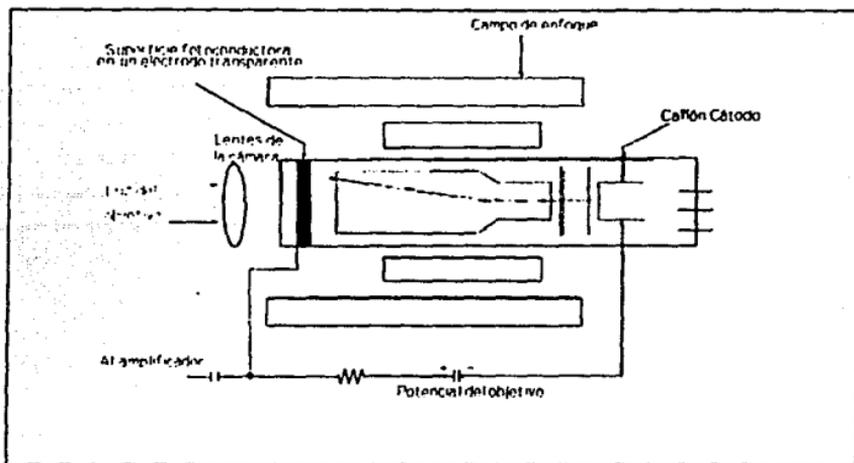
Para que las estaciones terrestres conocieran siempre la posición de un satélite se hacía necesaria la transmisión continua de una señal de radio que permitiera, por un lado, determinar la forma e inclinación exactas de la órbita y, por otro, que la antena de adquisición de datos del satélite estuviera siempre bien orientada.

Dada su importancia, estas señales debían estar en operación incluso en el caso de una falla parcial. Los TIROS llevaban dos transmisores de rastreo que podían ser apagados cuando el satélite dejaba de operar, o bien por señales aleatorias de radio de cualquier origen, provenientes de la Tierra, de modo que también era posible volver a prenderlos cuando era necesario.

Además, las señales de rastreo incluían dos tipos vitales de información: el ángulo de cruce de la Tierra frente a los sensores de horizonte, usado para determinar la posición del eje de giro del satélite, y la "telemetría de mantenimiento", que permitía diagnosticar el funcionamiento de los diferentes sistemas, tomar acciones correctivas o preventivas cuando era necesario y, sobre todo, diseñar mejoras para satélites posteriores, ya del mismo tipo, ya de modelos más avanzados. Este telemantenimiento entregaba también información acerca del estado de las celdas solares y las cargas de baterías, de manera que podía calcularse cuántas imágenes diarias podían programarse sin correr el riesgo de quedarse de pronto sin energía.

## CAMARAS DE TELEVISION Y GRABADORES EN CINTA

Las cámaras de televisión usadas en los satélites TIROS (TV-TIROS, para abreviar)



Ilustr. XIII-7: Esquema de las cámaras Vidicon usadas en los TIROS

eran distintas de las cámaras convencionales de su época. En primer lugar, generaban imágenes fijas, a velocidad máxima de una cada dos segundos (aunque el tiempo promedio entre exposiciones programadas era de diez segundos), lo que permitía un barrido lento sobre la imagen fija.

Por otro lado, las limitaciones de peso y de espacio llevaron a utilizar cámaras VIDICON, menos eficientes pero más pequeñas y resistentes, y con una electrónica muy distinta. El obturador de la cámara se abría durante 1.5 ms. en cuyo lapso se enfocaba la imagen sobre un electrodo transparente, muy delgado y muy eficiente en la conducción de corriente. Este electrodo estaba cubierto por una película de material fotoconductor (aislante en la oscuridad, conductor en la luz) que antes de disparar era "preparado" por un rayo de

electrones que lo recubría de una capa uniforme de éstos, ya que el electrodo tenía una carga fija positiva. Cuando una imagen caía a través del electrodo en el fotoconductor, los electrones sobre éste se drenaban en las áreas brillantes y en proporción al brillo, de modo que en las áreas oscuras los electrones permanecían en su sitio. Este patrón de cargas podía ser almacenado en la película fotoconductor por algunos segundos, de modo que el rastreo de la misma podía hacerse lentamente (en los dos segundos mencionados arriba). El flujo de electrones de rastreo era rechazado en las zonas donde la película había estado oscura y, por tanto, conservaba su carga negativa y no había corriente por el electrodo. La cantidad de electrones que llegaban a éste era, pues, proporcional a la brillantez de la escena, y la corriente generada se amplificaba y transmitía a tierra inmediatamente o se grababa en cinta. Luego, la película fotoconductor era "limpiada" y el proceso volvía a empezar.

La operación en modo directo, es decir, trasmitiendo las imágenes conforme se tomaban, permitía generar una cada diez segundos o cada treinta, a criterio del operador en tierra, en tanto que en el modo remoto (grabándolas) las tomas se daban cada treinta segundos, hasta llegar a treinta y dos, después de lo cual la cámara se apagaba automáticamente.

Es de notar que el proceso completo incluía dos fases de modulación en FM: la primera tomaba la señal de la cámara y la colocaba sobre una portadora de 85 KHz (sub-portadora) que permitía la grabación sobre el sistema de cinta diseñado para TIROS, que sólo giraba cuando había una imagen en proceso de exploración. Esto permitía que la transmisión posterior se hiciera continuamente empezando con la última imagen grabada. Cuando la transmisión era directa, la señal a 85 KHz era aplicada al transmisor de 2 W que la "montaba" sobre una portadora de 235 Mhz.

## SENSORES DE RADIACION

En estricto, las cámaras de TV que constituyeron el corazón de los satélites TIROS forman parte de esta clase de instrumentos. El espectro electromagnético abarca desde longitudes de onda menores que una diezmilésima de micra (rayos gamma) hasta 600 m (onda larga de radio) y está dividido en zonas. La luz visible es radiación electromagnética con longitudes de onda entre tres décimas de micra (violeta) y ocho décimas de micra (rojo), y así se establecen regiones de infrarrojo, microondas y demás que, con todo, tienen límites muy borrosos y subjetivos. A pesar de ello, es interesante que cada tipo (cada longitud) de onda tiene características particulares de penetración a la atmósfera y de reflexión en distintos materiales, de manera que pueden utilizarse para transmitir información sobre distintos fenómenos (ver apéndice correspondiente al espectro electromagnético).

Así, los rayos gamma y los rayos X interesaron a los meteorólogos que deseaban información acerca de las capas más altas de la atmósfera, cuando descubrieron la relación entre ellas y los cambios climáticos (ver introducción y capítulo de radar). Los ultravioleta pueden utilizarse para determinar la cantidad de ozono en la atmósfera superior y para determinar la altura de las nubes. Luego, sigue la luz visible, después de la cual aparece el infrarrojo, que es la forma en que la Tierra y su atmósfera devuelven energía al espacio exterior y que suele utilizarse para medir temperaturas de suelo y aire. Finalmente, las microondas pueden utilizarse también para la medición de temperaturas, así como para determinar composiciones atmosféricas. Las ondas de longitudes mayores son utilizadas en comunicación (de UHF en adelante), si bien todavía es posible incluirlas en la observación meteorológica propiamente dicha si se las aplica en dispositivos del tipo radar.

Ya se comentó que no todos los TIROS dispusieron de sensores de radiación fuera del espectro visible. Los que sí los tuvieron fueron TIROS II al IV y el VII. En estos casos se utilizaron tres tipos principales de sensores: radiómetro de rastreo de 5 canales, radiómetro de ángulo medio de dos canales y el radiómetro omnidireccional de dos canales.

- El radiómetro de 5 canales era el más importante de los tres y realizaba las mediciones siguientes a través de cada canal:

Canal 1:

Longitudes de onda entre 5.9 y 6.7 micras. Permitía medir la temperatura de la parte alta de la capa de vapor de agua atmosférico (en promedio alrededor de 8 Km de altura). A pesar de las variaciones en la distribución del vapor, podía establecerse que lecturas bajas (bajas temperaturas) indicaban fuertes cantidades de vapor extendiéndose hasta grandes altitudes, mientras que lecturas altas indicaban menos vapor y cerca de la superficie.

Canal 2:

Ondas de 8 a 12 micras. Medía temperaturas de superficies nubosas y detectaba capas de nubes en la oscuridad.

Canal 3:

Longitud de onda de 0.2 a 5 micras. Medía la radiación solar reflejada.

Canal 4:

Longitudes de onda de 7 a 30 micras. Medía la salida total de radiaciones de onda larga desde la Tierra y la atmósfera.

Canal 5:

Ondas con longitud de 0.5 a 0.7 micras. Medía radiación solar reflejada en frecuencias visibles para las cámaras de TV, detectando capas nubosas durante el día para apoyar los datos recabados por los otros sensores, en especial cuando las cámaras no estaban operando.

Los cinco canales estaban conectados en paralelo a los sistemas de grabación y transmisión y funcionaban simultáneamente, de manera que era posible registrar las lecturas y transmitir las todas juntas a través de un sistema de multiplexión en frecuencia que, de paso, agregaba al paquete la información referente a la operación del instrumento en sí.

- El radiómetro de ángulo medio fue incluido en los TIROS II al IV. Consistía en dos detectores montados en conos separados, lo que

llevaba el campo de estudio simultáneo a algunos cientos de kilómetros contra los 45 a 50 Km del dispositivo anterior. El campo en este caso coincidía con el de las cámaras de video, de manera que era posible comparar los dos tipos de información. Uno de los detectores era blanco y reflejaba la mayor parte de la radiación solar, respondiendo casi únicamente a radiaciones térmicas de más de 4 micras (usualmente emitidas por la Tierra y la atmósfera). El segundo era negro y respondía a todas las radiaciones entre 0.2 y 40 micras midiendo así la relación de la radiación solar con la radiación térmica emitida. Por diferencia de ambas medidas se establecía el albedo (porción de la energía incidente que se refleja al espacio) y a partir de él la cantidad de energía solar absorbida por la Tierra y su atmósfera.

- El tercer tipo de radiómetro, el omnidireccional, fue desarrollado por el profesor V. Suomi, de la Universidad de Wisconsin, y montado en los TIROS II, IV y VII. Consistía en cuatro hemisferios -dos blancos, dos negros- de alrededor de 4 cm de diámetro. Los pares blanco y negro se montaban en lados opuestos del satélite, sobre estructuras extendidas. Los dos hemisferios blancos y

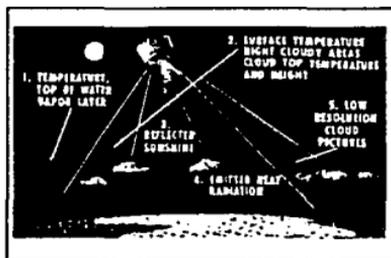


Fig. XIII-8: Radiaciones detectadas por los sensores del TIROS

los dos negros operaban como si fueran esferas negra y blanca únicas colocadas en el lugar del satélite. Medían radiación proveniente de todas direcciones incluyendo la del sol. El cuerpo blanco respondía sólo a radiaciones de onda larga, en tanto que el negro lo hacía a todas las longitudes de onda entre 0.2 y 40 micras. Los sensores eran termistores dentro de cada hemisferio.

### **TRANSMISORES Y ANTENAS**

Como se ha anotado arriba, los TIROS tenían varios tipos de información para enviar a tierra: las señales de rastreo, los datos de horizonte modulados en las anteriores, las imágenes, etc. Los dos primeros, así como la telemetría de mantenimiento, se enviaban por dos transmisores independientes de 30 mW. La señal de video se enviaba por dos transmisores independientes de 2 W en FM. Los dos funcionaban a la misma frecuencia y, si eran necesarios durante la misma órbita, eran operados secuencialmente. Los datos de radiación (cuando había sensores de radiación) se transmitían a través de un único transmisor de 237.8 Mhz que operaba simultáneamente con cualquiera de los dos transmisores de TV. Todos estos dispositivos usaban un sistema común de antenas: las cuatro de varilla única montadas en la parte baja del satélite, ya que la colocada en la parte alta del mismo sólo recibía transmisiones a través de una red demultiplexora para evitar las interferencias entre las distintas señales.

### **ESTACIONES Y PROCEDIMIENTOS DE ADQUISICION DE DATOS**

El rastreo necesario sobre el satélite en órbita era realizado por la red Minitrack de la NASA. Los datos procedentes de las distintas estaciones Minitrack llegaban a la NASA Space Computing Facility, del Centro Goddard de Vuelo Espacial (GSFC en inglés), al noreste de Washington D.C. Las predicciones de localización y posición axial del satélite realizadas por las computadoras del Centro eran enviadas al Centro Nacional de Satélites Climáticos de la Oficina del Clima de los Estados Unidos, la que los usaba para recomendar

las áreas susceptibles de análisis que podían proporcionar los datos más útiles. Estas recomendaciones eran enviadas al Centro de Control Técnico de Tiros (TTCC en inglés), ubicado en las instalaciones del GSFC. El TTCC era evidentemente el Centro encargado de determinar los programas de operación óptima del satélite y enviarlos a las Estaciones de Comando y Adquisición de Datos (CDA), de las que se usaron seis durante el proyecto TIROS. Una de ellas, la de la planta de RCA en Nueva Jersey, donde TIROS fue diseñado y construido, fue fundamentalmente para asesoría de emergencia, diagnóstico de fallas y determinación de remedios. Las otras eran las siguientes:

LOCALIZACIONTIROS

BELMAR, N.J. (SIGNAL CORPS LABORATORY)	I, II
KAENA POINT, HAWAII (USAF FACILITY)	I
POINT MUGU, CALIF (USN FACILITY)	II AL VIII
WALLOPS ISLAND, VIRGINIA (NASA)	III AL IX
FAIRBANKS, ALASKA (NASA)	VI AL X

Una CDA consistía básicamente de:

- Una antena amplia para recibir las señales (comparativamente débiles) del satélite.
- Dispositivos de rastreo para mantener la antena apuntada al satélite.
- Un radiotransmisor para enviar órdenes.
- Radiorreceptores para amplificar y decodificar las señales y datos recibidos.
- La consola de control que permitía generar comandos y procesar, grabar y desplegar los datos recibidos.
- Un equipo de procesamiento para reducir, analizar y transmitir los datos climáticos adquiridos.

- Facilidades de comunicación y terminales para recibir instrucciones y transmitir datos al TTCC y transmitir los datos meteorológicos analizados a la Oficina del Clima.

La organización y funcionamiento detallados de una de esas estaciones eran, como puede suponerse, extremadamente complejos. Desde la detección del satélite dentro del alcance de la estación hasta la transmisión de comandos o la preparación para recibir la información generada por TIROS, los procesos involucraban una enorme cantidad de actividades individuales que no se detallarán aquí.

## SEGUNDA GENERACION: LA SERIE NIMBUS

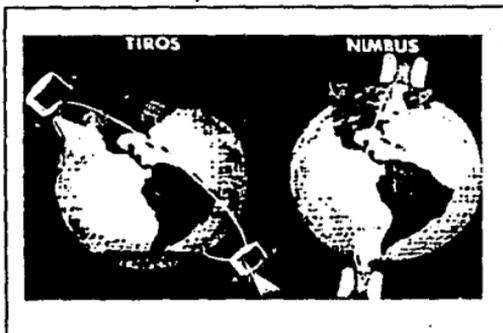
TIROS, a pesar de su enorme utilidad para la meteorología, fue un programa de capacidades limitadas, ya que su área de cobertura estaba, debido a la inclinación de su órbita, restringida a latitudes menores a los  $65^\circ$ . Además, debido a su característica estabilización giroscópica, durante las dos terceras partes de cada recorrido alrededor de la Tierra las cámaras y el resto de los sensores simplemente no apuntaban hacia ella. El reconocimiento de tales deficiencias fue el motivo de que, incluso antes del lanzamiento del TIROS-I, se iniciara el diseño de la que sería la segunda serie de satélites meteorológicos en activo: los Nimbus.

El trabajo sobre el concepto Nimbus se inició a finales de 1959, y sus objetivos incluían:

- Una órbita próxima a los polos para permitir la cobertura de todo el planeta.
- Estabilización referida a tierra, de manera que las cámaras y el resto de los sensores apuntaran siempre hacia ella.

Conforme el diseño se perfeccionaba fueron surgiendo necesidades y conceptos adicionales que forzaron a la incorporación de características no previstas y al ajuste de algunas originales:

- Una órbita retrógrada (este a oeste) inclinada alrededor de  $80^\circ$  respecto al ecuador, lo que permitía que el satélite cruzara sobre él a mediodía y a



Ilustr. XIII-9: Comparación de las coberturas de TIROS y Nimbus.

- medianoche locales en cada órbita. Los Nimbus más modernos permitían elegir cualesquiera otros tiempos locales con doce horas de intervalo, de manera que era posible observar los polos en cada órbita y la Tierra completa dos veces por día.
- Una altura orbital de apenas 1000 km que minimizaba el efecto del cinturón magnético del planeta pero permitía observaciones traslapadas sobre el ecuador.
- Construcción modular que permitía cambios mayores en modelos posteriores sin afectar el diseño global.

La mayor parte de los subsistemas de los modelos Nimbus eran análogos a los de los TIROS, con las mejoras de esperar por la experiencia en el diseño y operación de éstos. Acaso la única verdadera modificación se haya dado en los dispositivos de estabilización, pero a continuación se describen someramente las características generales de los diversos componentes, que son:

## LA ESTRUCTURA

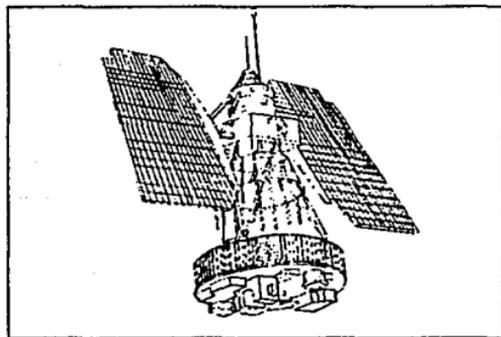
La forma de un satélite Nimbus era completamente distinta de la de los TIROS, aunque evidentemente debía cubrir los requerimientos básicos enumerados para el caso de éstos. La distribución de módulos era aproximadamente la que sigue:

- El anillo sensorial y base de la estructura, en el que estaban montados los sensores meteorológicos, la mayor parte de los sistemas electrónicos (excepto el de control) y las antenas de transmisión. Era un cilindro de 145 cm de diámetro y 33 cm de alto.
- Una estructura separada de torreta que contenía los subsistemas de estabilización y control.
- Uniones entre el anillo sensorial y la sección de controles.

- Dos pantallas solares, cada una de 244 cm por 98 cm girando sobre flechas emergiendo de la sección de control.
- La antena de comandos (receptora) montada en la sección de control.

Evidentemente, para el lanzamiento las pantallas solares eran plegadas dentro del vehículo, pero con ellas abiertas los Nimbus medían alrededor de 335 cm de ancho y 275 de altura. Por otra parte, además de soportar las presiones del lanzamiento y proteger los instrumentos, la estructura estaba diseñada para cubrir otros objetivos:

- Dado que un arreglo de masas separadas que sugieren una distribución "acampanada" del peso tiende a alinear su eje con la vertical (debido al gradiente gravitacional decreciente con la distancia), esta forma general se utilizó para ayudar al sistema de controles a mantener los sensores apuntando constantemente a tierra.
- El espacio libre entre el anillo sensor y la torreta de control, permitía modificar el centro de gravedad de toda la estructura, de manera que el satélite podía ser balanceado sin ninguna dificultad si eso era necesario.



Ilustr. XIII-10: Estructura externa de un Nimbus

- Como las secciones de control y sensorial estaban separadas, era posible considerarlas independientemente al diseñar sistemas de mantenimiento de temperaturas adecuadas. Esto se lograba en general por conducción de calor y por radiación superficial. Pero además había grupos de obturadores que se cerraban para mantener el

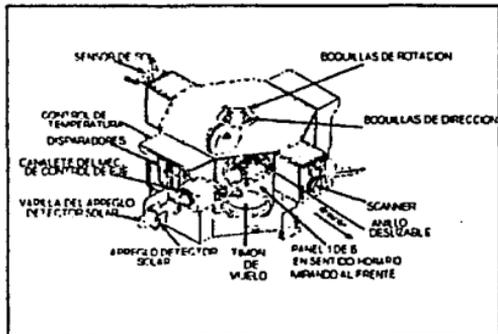
calor cuando esto era necesario, de manera que los sistemas electrónicos podían mantenerse a distancias de  $\pm 5^\circ$  de su temperatura de diseño.

## SUBSISTEMAS DE ESTABILIZACION Y DE CONTROLES

El Subsistema de Controles y Estabilización Nimbus ejecutaba tres funciones básicas:

- Los sensores de horizonte colocados al frente y atrás de la torreta detectaban separaciones de la vertical por parte del eje del satélite. Tales desviaciones se corregían usando timones y boquillas de gas controlados por computadora.
- Unos sensores de sol, y posteriormente un giroscopio, detectaban si el satélite estaba en la dirección correcta sobre la órbita. Si no, otro timón o chorro de gas lo corregía.
- Otros sensores de sol, montados en los canales de las flechas que emergen de la torreta de control, provocaban que un motor girara para mantener las pantallas solares de cara al sol a fin de producir potencia máxima.

Los sensores de horizonte tenían un campo de rastreo muy estrecho, y giraban alrededor del vector de dirección del satélite, produciendo un cono de visión con vértice de 45°. Estos dispositivos reconocían la tierra del espacio por diferencias de temperatura, como los de TIROS. Cuando el aparato estaba correctamente dirigido en

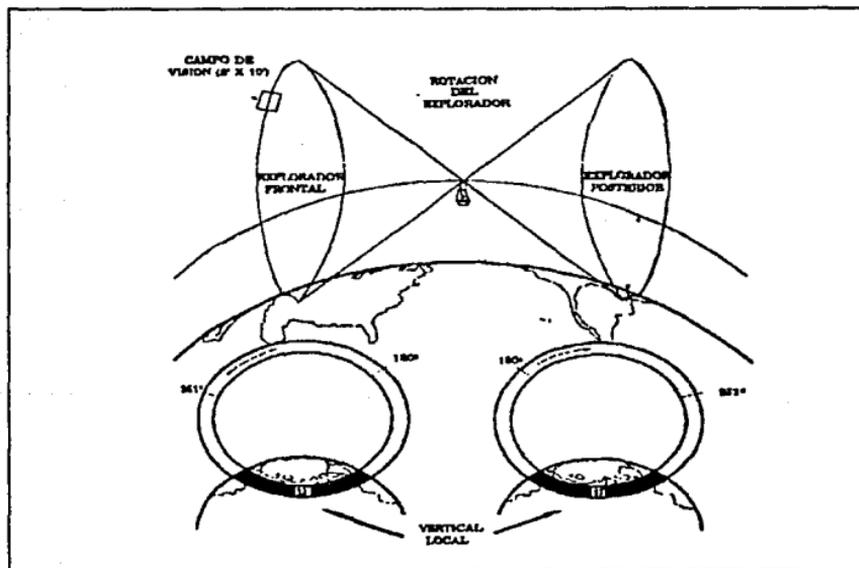


Ilustr. XIII-11: Sistemas de estabilización y control de Nimbus.

vertical, las referencias de vertical de los exploradores estaban exactamente a medio camino entre dos horizontes consecutivos (lo que aseguraba la vertical tangencial a la órbita recorrida) y además tanto el delantero como el trasero "veían" la misma porción de tierra (lo que aseguraba la vertical normal a la órbita). Si cualquiera de estas dos condiciones no se cumplía, entraban en acción los timones de vuelo (para correcciones de 3° o menores) o

los expulsores de gas (para correcciones mayores), consiguiendo la corrección con una precisión de  $\pm 1^\circ$ . Por cierto, el gas usado en estas correcciones era nitrógeno, del que los Nimbus llevaban suficiente para al menos seis meses de "vida estable", incluyendo la orientación inicial, una segunda reorientación que pudiera requerirse y el mantenimiento normal de la posición correcta.

Es evidente que los sistemas que se diseñaron para el control y la estabilización de los Nimbus no eran infalibles. Por ejemplo, aunque la longitud de onda requerida para la



Ilustr. XIII-12: Detección de horizonte (frontal y posterior) para control de eje vertical.

detección de horizontes era ligeramente distinta de la que se utilizó en TIROS a fin de mejorar la resolución de los exploradores, la energía emitida en la nueva banda elegida era

menor, lo que disminuía la precisión de los ajustes. Por otro lado, estaba el problema de mantener el satélite "de cara al sol", por decirlo así. En efecto, una vez que se aseguraba la verticalidad de su eje, era necesario que la posición angular de las pantallas solares fuera la adecuada para que produjeran potencia máxima todo el tiempo que permanecían fuera de la sombra del planeta. Los sensores de luz colocados en los canales de las flechas en que se apoyaban las pantallas proveían información (por diferencia de corrientes generadas) no sólo para girar éstas verticalmente, sino para orientar el satélite completo en la dirección óptima, la que se mantenía, una vez lograda, con la ayuda de un giroscopio. Evidentemente, había necesidad de verificar esa orientación constantemente, ya fuera por respuesta automática de los sistemas o por control terrestre.

### **SUBSISTEMA DE POTENCIA**

Era una versión mejorada del aplicado en los TIROS; producía casi diez veces más potencia y era más eficiente. Sin embargo, las diferencias mayores eran básicamente dos:

- Las celdas estaban montadas en paneles que se orientaban para encarar al sol constantemente.
- Las celdas solares usadas eran eléctricamente opuestas a las de TIROS, minimizando el efecto que sobre éstas se había observado de la radiación producida por ciertas pruebas atómicas (pruebas Starfish) en 1962.

La potencia lograda por las pantallas solares era de 250 W, si bien se logreaban picos de 400 W en plena insolación. Esta energía circulaba por las flechas y cargaba más de 140 baterías de níquel-cadmio, distribuyéndose luego a 24.5 v  $\pm$  2%.

### **SUBSISTEMA DE COMANDO-RELOJ**

Este subsistema combinaba tres funciones en una sola unidad, para ahorrar espacio, peso y energía:

- Servía como un reloj y proporcionaba la hora en cualquier momento. Nimbus difería de TIROS en que los comandos se ejecutaban "a determinada hora" y no "después de cierto tiempo".
- Proporcionaba señales de frecuencias precisas y estables entre 1 Hz y 400 Khz para controlar el funcionamiento de varios dispositivos.
- Aceptaba comandos de tierra, los verificaba, filtraba radioseñales aleatorias, almacenaba las instrucciones legítimas y las ejecutaba en el momento apropiado.

La antena receptora (o de comandos) era una varilla montada sobre un arreglo cónico sobre la torreta de control. Este cono y otras varillas alrededor de la estructura permitían la recepción correcta de los comandos incluso si el satélite estaba desestabilizado. Por cierto, estas señales eran enviadas en la banda de VHF. Una vez captadas eran dirigidas a uno de dos receptores, colocados redundantemente por seguridad y que amplificaban y demodulaban la señal, pasando la instrucción al reloj de comandos.

La sección de comandos del subsistema verificaba la legitimidad de la señal y, en su caso, la almacenaba para ejecutar la instrucción en el momento previsto, que podía presentarse tan pronto como tres segundos después. Los comandos eran recibidos y ejecutados a razón de uno por segundo y podían almacenarse cinco en cualquier momento y hasta por 24 hrs. Existían hasta 128 instrucciones distintas, pero en general éstas se reducían a encender o apagar distintos dispositivos, o a elegir entre unidades redundantes. Los ajustes estaban limitados a unas cuantas funciones, y existían comandos vitales no codificados que se utilizaban en el caso de falla del sistema de comandos primario.

## SUBSISTEMA DE TELEMETRIA DE MANTENIMIENTO

La importancia de este subsistema se comentó con amplitud en la sección anterior, dedicada a los satélites TIROS. En este caso, se anotarán algunas características particulares que adquirió en los modelos Nimbus. Por ejemplo, se proveía información acerca de:

- Temperaturas de los paneles exteriores de la torreta de control.
- Posiciones de los obturadores de control de temperatura.
- Presión y temperatura del nitrógeno.
- Temperaturas y señales de regulación del giroscopio vertical.
- Temperaturas y señales de los detectores de horizonte.
- Señales de los sensores de sol.
- Temperaturas, velocidades y direcciones de los timones de vuelo.
- Operación y estado de las válvulas de gas.
- Señales eléctricas dentro y procedentes de la computadora.

Además, mientras TIROS permitía realizar las lecturas de mantenimiento sólo mientras estaba dentro del alcance de una CDA, los Nimbus podían grabar la información obtenida durante la última órbita y conservarla ahí hasta que se iniciara la siguiente. La transmisión se realizaba a través de Modulación por Pulsos Codificados (PCM).

#### **SUBSISTEMAS DE CAPTACION DE IMAGENES DE VIDEO**

Nimbus llevaba dos subsistemas distintos de cámaras de video. El AVCS (Advanced Vidicon Camera System), en particular, proveía información global para uso del Centro Nacional Meteorológico de los E.U. y para transmisión por parte de las estaciones climáticas regulares en el mundo, en tanto que el otro sistema de cámaras (APT-Automatic Picture Transmission) sólo enviaba imágenes de los patrones nubosos locales a las estaciones climáticas sobre las que pasaba, si éstas estaban equipadas adecuadamente.

## SISTEMA DE CAMARAS VIDICON AVANZADAS (AVCS)

El AVCS consistía en tres cámaras montadas en un arreglo similar a los utilizados en aerofotografía. La cámara central apuntaba verticalmente hacia abajo, en tanto que las otras dos lo hacían a  $35^\circ$  de la vertical. Como cada una tenía un campo de visión de  $37^\circ$ , había un ligero traslape entre ellas y entre órbitas consecutivas. Dada la altura a la que orbitaban los Nimbus y el campo total de visión de este arreglo ( $107^\circ$ ), el horizonte estaba fuera de las imágenes obtenidas, lo que hubiera constituido un serio problema si los sistemas de estabilización vertical hubieran sido menos confiables.

Evidentemente, las imágenes obtenidas eran tripletes que se registraban cada 91 segundos durante la parte insolada de la órbita. Treinta y dos tripletes proveían cobertura completa a lo largo de la media órbita iluminada.

Las Cámaras Vidicon Avanzadas operaban esencialmente igual que las Vidicon usadas en TIROS, con disminución en el diámetro del tubo (una pulgada contra la pulgada y media de las originales), incremento en la resolución (exploración en 800 líneas contra las 500 anteriores) y ángulo de visión muy reducido ( $37^\circ$  contra  $84^\circ$ ). Todas las modificaciones, en resumidas cuentas, tendían a mejorar la resolución de las imágenes. Además, como los Nimbus no rotaban, era posible mantener las exposiciones durante 40 ms, lo que permitía obtener imágenes claras incluso en condiciones de pobre iluminación (cerca de los polos, por ejemplo), y la exploración interior de la imagen obtenida tomaba 6.5 s. El sistema de grabación en cinta era una versión mejorada del usado en TIROS.

Las imágenes de las tres cámaras, el canal de sincronía y cuatro canales del radiómetro Infrarrojo de Alta Resolución (a comentar luego) se enviaban simultáneamente a tierra a través de un transmisor de 1700 Mhz y 5 W de potencia, sobre una banda de 700 Khz, utilizando métodos de multiplexión en frecuencia.

## **SUBSISTEMA DE TRANSMISION AUTOMATICA DE IMAGENES (APT)**

Los pequeños disturbios (del tipo de tormentas individuales) con áreas de influencia muy localizadas y tiempos de permanencia de unas cuantas horas son, evidentemente, de importancia máxima en la zona directamente afectada por ellos. Sin embargo, las cámaras AVCS de Nimbus sólo transmitían la información que colectaban a puntos específicos (las estaciones CDA, el Centro Nacional Meteorológico y alguna estación meteorológica de importancia) donde se realizaba un análisis general cuyos resultados eran, en el mejor de los casos, la única información proveniente de esas imágenes de que disponía la estación regional, con el agravante de que para cuando podía utilizarla ya el fenómeno solía haberse disipado. Pensando en eso se diseñó la Transmisión Automática de Imágenes (APT) de Nimbus, que en lugar de almacenar las tomas para lectura de una estación CDA las transmitía de inmediato para su recepción y uso en cualquier estación que dispusiera del equipo apropiado (muy barato en relación con las necesidades de una CDA en forma) y que estuviera dentro del campo de visión del satélite (un radio de alrededor de 1600 km).

El sistema APT descansaba básicamente en tubos Vidicon virtualmente idénticos a los usados en el AVCS, excepto por la adición de dos capas sensibles a las que las imágenes obtenidas en primer lugar eran transferidas y donde podían permanecer casi indefinidamente, de manera que su barrido podía hacerse tan lentamente que permitía su transmisión sobre bandas estrechas y, por ende, su recepción por equipo relativamente simple.

El problema mayor que este sistema presentó siempre fue la escasa vida útil de los estratos de almacenamiento prolongado, ya que la eliminación de una imagen en preparación para recibir otra los degradaba rápidamente, de manera que podían utilizarse sólo para algunos cientos de tomas. De todas formas, el sistema probó ser útil: la resolución lograda estaba entre los extremos de las AVCS y las cámaras de gran angular de los TIROS.

La secuencia de toma-transmisión de imágenes por el APT comenzaba al entrar el satélite a la porción soleada de su órbita. La secuencia se repetía cada 208 segundos hasta que se entraba de nuevo a la zona de oscuridad, lo que apagaba el sistema. Las estaciones CDA podían, en todo caso, apagarlo temporal o permanentemente.

Como comentario, debido a los retrasos que se presentaron en el lanzamiento del Nimbus I se decidió sustituir uno de los sensores de radiofrecuencias del TIROS VIII por una cámara APT. El resultado, si bien degradado por la característica rotación de TIROS, demostró la aplicabilidad del sistema.

#### **RADIOMETRO INFRARROJO DE ALTA RESOLUCION (HRIR)**

Este dispositivo proporcionó la capacidad de observar las formaciones nubosas durante la porción nocturna de la órbita del satélite. Su respuesta estaba limitada a una banda en que las radiaciones eran aceptablemente detectables tanto para superficie de terreno como para áreas de nubes. Por diferencias de temperatura, el aparato proveía un mapa de áreas claras y nubosas, con alguna indicación de altura para los conglomerados.

Como referencia, recuérdese que en TIROS se utilizó con este propósito la banda de 8-12 micras, pero que los detectores tenían problemas debido a la escasa sensibilidad disponible en tales longitudes de onda. Por eso, en Nimbus se trabajó en bandas entre 3.4 y 4.2 micras, donde se posibilitaban mayores sensibilidades y resoluciones. Por cierto, la resolución prevista para este dispositivo era de poco más de 8 km por línea de rastreo, pero la escasa altitud de Nimbus en general permitió resoluciones ligeramente mejores.

#### **RADIOMETRO INFRARROJO DE RESOLUCION MEDIA (MRIR)**

Correspondía básicamente al radiómetro de cinco canales de los satélites TIROS. Como en éstos, la resolución del MRIR era de algo más de 45 km. Evidentemente, sin embargo, se trataba de un dispositivo afinado a fin de minimizar ruidos y bandas confusas

en la recepción. Por ejemplo, el canal de "ventana" de TIROS funcionaba con una banda de paso de 8 a 12 micras, en tanto que el correspondiente en Nimbus lo hacía entre las 11 y las 12 micras.

### **ESTACIONES DE COMANDOS Y ADQUISICION DE DATOS (ESTACIONES CDA)**

Como cabría esperar, las estaciones CDA del sistema Nimbus eran análogas a las del TIROS, con básicamente las mismas responsabilidades y atributos y cuyos procedimientos tampoco ahora se van a detallar. Sólo como anotación se listan a continuación los componentes fundamentales de una CDA-Nimbus:

- Una antena de adquisición de datos.
- Equipo que permitía el rastreo del satélite por parte de la antena.
- Dispositivos de comando para distintas funciones del satélite.
- Equipo de grabación de los datos recibidos.
- Dispositivos para algún procesamiento de los datos sobre el terreno.
- Facilidades para transmitir los datos o los resultados de su análisis a otras locaciones.

## DESPUES DE NIMBUS

Los satélites de las series TIROS y Nimbus constituyeron el primer acercamiento real a la meteorología espacial. En los apartados anteriores se ha proporcionado con algún detalle información sobre los principios en que sus distintas capacidades se apoyaban porque, en resumidas cuentas, toda la moderna y sofisticada parafernalia que es el equipo de un satélite actual -particularmente de uno destinado a la Meteorología- funciona bajo los mismos conceptos básicos. Las descripciones de los distintos dispositivos sensores, registradores y transmisores no fueron intensivas y no pretendían serlo, pero sí pretendían crear un ambiente y establecer convenciones que facilitaran el avance al repasar rápidamente los distintos programas de astrometeorología que se han desarrollado a partir de los 1960's.

Debe quedar bien establecido que la sección siguiente se refiere exclusivamente a satélites creados con propósitos meteorológicos y por eso se excluyen algunos que, si bien captaban -captan todavía, en algún caso- datos de esa índole, los utilizaban como un medio para cubrir otros objetivos (militares, de navegación, etc.).

## ESSA (ESTADOS UNIDOS, 1966)

ESSA significa Environmental Science Services Administration (Administración de Servicios de las Ciencias Ambientales), y los satélites de esta serie fueron operados por esta Administración a través del Centro Nacional de Satélites (NESC). El nombre original del primero de la serie, sin embargo, era TOS, por TIROS Operational Satellite, ya que el sistema general estaba basado en los conceptos mejorados de TIROS. Hubo nueve satélites ESSA y todos tuvieron aproximadamente

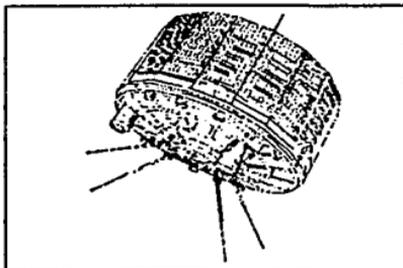
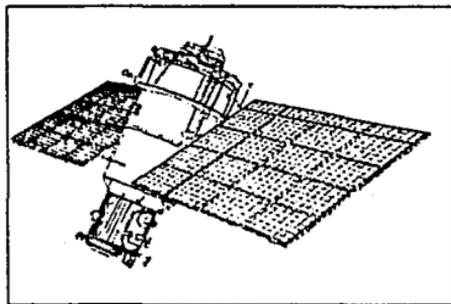


Fig. XIII-13: ESSA-1.

la misma forma: un cilindro facetado, de 107 cm de diámetro y 42 de altura, con los instrumentos sujetos alrededor del borde inferior. Los instrumentos que llevaban variaron: los miembros nones de la serie (1, 3, 5, 7, 9) estaban equipados con sistemas de video AVCS como los descritos para la serie Nimbus. Los miembros pares, en cambio, llevaban sistemas del tipo APT, también como los de Nimbus. Se planeó que hubiera siempre dos satélites en órbita, uno con cada uno de los sistemas. Cada satélite era capaz de proveer cobertura global con 144-156 imágenes cada veinticuatro horas. Los satélites ESSA fueron construídos por RCA Astro-Electronics.

### COSMOS-METEOR (UNION SOVIETICA, 1967)



Ilustr. XIII-14: COSMOS-144

El primer satélite lanzado de esta serie fue el Cosmos-122, que constituyó la prueba definitiva para los sistemas diseñados desde 1966 por el programa Cosmos-Meteor. El primero funcional fue el Cosmos-144, cuyas dimensiones eran, aproximadamente, las de un cilindro de 1.5 m de diámetro y 5 m de largo. Pesaba alrededor de 2000 kg.

Todos estos satélites tenían estabilización en los tres ejes y dos paneles de

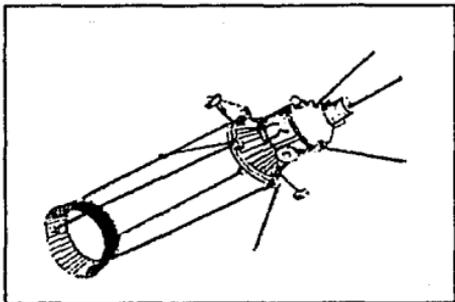
celdas solares permanentemente dirigidas al Sol. Los instrumentos que portaba incluían:

- Dos cámaras de video para observación diurna de una banda de terreno de 1000 km de ancho, con resolución de 1.25 km.
- Una cámara infrarroja operando en la banda de 8 a 12 micras.
- Cuatro instrumentos para medición de radiación emitida por la Tierra en tres bandas (0.3 - 3, 3 - 30 y 8 - 12 micras) sobre una faja de 2500 km de ancho.

Los Cosmos podían, durante una órbita, observar la octava parte de la superficie terrestre y medir el 20% de la radiación emitida. Los datos eran registrados y transmitidos posteriormente a tierra cuando se sobrevolaban las estaciones receptoras.

### **METEOR-1 (UNION SOVIETICA, 1969)**

Los satélites de la serie Meteor-1 tenían la forma de un cilindro de 5 m de largo y de 1.5 m de diámetro. El cuerpo estaba dividido en dos módulos separados: el superior contenía los sistemas de control del satélite y dos paneles solares, mientras el inferior llevaba los instrumentos de observación. El peso total rondaba los 2000 kg, y los instrumentos usados eran los mismos probados en la serie Cosmos-Meteor. Sólo en 1971 se hizo una adición importante: un aparato automático para distribuir las imágenes compatible con los receptores en uso en Occidente.



Нудет. XIII-15: COSMOS-149.

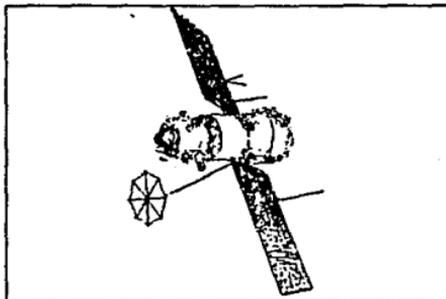
Estaba planeado que hubiera siempre dos satélites operativos en órbita, combinando sus observaciones. Los datos eran transmitidos a las tres oficinas principales del Servicio Hidrometeorológico, situadas en Moscú, Novosibirsk (Siberia) y Khabarovsk. Se lanzaron 30 satélites Meteor-1 entre 1969 y 1980.

### **SERIE ITOS/NOAA (ESTADOS UNIDOS, 1970)**

La serie ITOS fue todavía una versión mejorada de los satélites ESSA. Su primer lanzamiento coincidió con la creación de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

(NOAA) que absorbió a la anterior Administración de Servicios de las Ciencias Ambientales (ESSA) y la nomenclatura de los ITOS cambió a NOAA cuando ya varios de ellos estaban en órbita.

Los satélites ITOS eran estabilizados en tres ejes y dirigidos constantemente a tierra. Su cuerpo tenía una sección central con forma de paralelepípedo de base cuadrada. Medía 1.22 m de altura y 1.09 m de ancho, y pesaba 309 kg. Como exten-



Ilustr. XIII-16: METEOR-1.

siones de la superficie superior, tres paneles solares le daban una envergadura de 4.26 m. ITOS-1 (llamado también TIROS-M) cubría simultáneamente las funciones del par de satélites ESSA lanzados antes que él, de manera que contaba tanto con el sistema APT de transmisión instantánea como con el AVCS de almacenamiento de imágenes. Pero ITOS-1 utilizó también, por primera vez operativamente y no a nivel experimental, un radiómetro de dos canales (SR-Scanning Radiometer) que grababa y transmitía simultáneamente, en tiempo real, los datos colectados. Como este instrumento funcionaba tanto en las áreas insoladas de la órbita como en las sombreadas, el satélite podía observar la Tierra entera en 12 hrs. en lugar de las 24 que requerían todos los modelos anteriores. Además, ITOS-1 llevaba un Monitor de Protones Solares (SPM) para medir el flujo de protones emitidos por el Sol, y un Radiómetro de Plato Plano (FPR) para medición de calor atmosférico.

Después de ITOS-1, que era experimental en buena medida, se puso en funcionamiento el ITOS-A/NOAA-1, idéntico al anterior. Posteriormente, el ITOS-D/NOAA-2 fue lanzado incluyendo en él:

- Radiómetro de Muy Alta Resolución (VHRR) para conseguir imágenes noche y día.
- Radiómetro de Rastreo (SR) de media resolución.

- Radiómetro de Perfil Vertical de Temperaturas (VTPR) para obtener lecturas de temperaturas atmosféricas a diferentes niveles.
- Radiómetro de Plato Plano (FPR) para medir el calor solar.

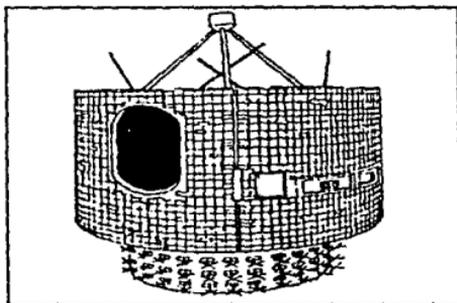
Posteriormente se lanzaron tres satélites más (NOAA-3 al 5), todos del mismo tipo y todos construidos por RCA Astro-Electronics.

### EOLE FR-2 (FRANCIA, 1971)

Este pequeño satélite francés, de 21 cm de diámetro, 58 cm de altura y 82.5 kg de peso fue el primer satélite de aplicación lanzado por el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES). Su propósito era recoger datos observando la presión atmosférica y temperatura registradas por 500 globos estratosféricos a alturas de 12,000 m. El satélite hizo contacto con cada globo, lo localizó y recibió y almacenó los datos recogidos para posteriormente transmitirlos a tierra. La estructura, la antena y los sistemas para regulación de calor, estabilización y provisión de energía fueron suministrados por la compañía Aérospatiale.

### SERIE SMS/GOES (ESTADOS UNIDOS, 1974)

Después de la prueba de diversos instrumentos meteorológicos en los satélites ATS-1 y ATS-3, de órbita geoestacionaria, se lanzó el primer satélite meteorológico con la misma característica. Llamados de origen SMS (Synchronous Meteorological Satellite) y rebautizados después del segundo lanzamiento GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), los integrantes de esta familia eran cilíndricos, con diámetro de 1.9



Watz. XIII-17: SMS-GOES.

m, altura de 2.3 m y peso de 243 kg. Eran estabilizados por rotación (como los TIROS) y su fuente de poder eran 15.000 celdas solares en el perímetro exterior de la estructura que, de paso, mantenían cargadas dos baterías de níquel-cadmio.

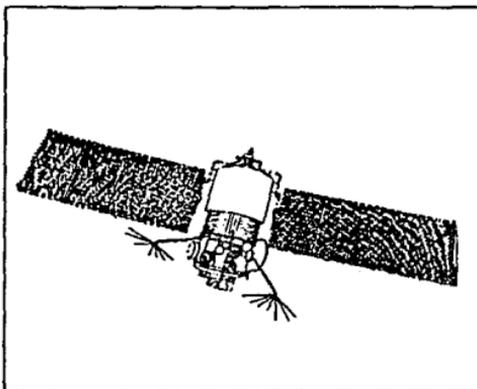
De los instrumentos de observación a bordo, el más importante era el VISSR (siglas en inglés de Radiómetro de Exploración Rotacional Visible e Infrarrojo), que funcionaba, como puede suponerse, tanto en la banda visible como en alguna de infrarrojo, de modo que podía obtener imágenes tanto de día como de noche (recuérdese que estos satélites eran geoestacionarios). Este radiómetro utilizaba como objetivo un telescopio de 4 cm de apertura que le permitía obtener una imagen del hemisferio completo cada 20 minutos, la que era digitalizada y transmitida a razón de 28 Mbps al centro NOAA de Wallops Island, en Virginia. En este centro se almacenaban las imágenes y se las procesaba para retransmitirlas al satélite, que posteriormente las distribuía más lentamente (1.7 Mbps) a través del sistema WEFAX (WEather FAcsimile), que permitía su recepción por parte de estaciones menores. Además, el radiómetro grababa también las lecturas de temperaturas oceánicas.

Otros instrumentos contenidos en los GOES fueron el Sistema Colector de Datos (DCS), que recibía información de unas 1500 estaciones en tierra de todo el mundo, y el Monitor de Ambiente Espacial (SEM), que observaba la actividad solar, midiendo las emisiones de rayos X y campos magnéticos. Los satélites SMS/GOES, fueron construidos por Philco Ford.

#### **SERIE METEOR-2 (UNION SOVIETICA, 1975)**

Los satélites del tipo Meteor-2 tenían básicamente la misma estructura que los Meteor-1, excepto porque llevaban instrumentos nuevos y mejorados. La estabilización en tres ejes disponía de controles más confiables y sistemas de corrección más precisos. Además, la potencia suministrada por los paneles solares se vio incrementada y se instaló un sistema computarizado para el control de los sensores. Las diferencias fundamentales con la serie Meteor-1 eran las siguientes:

- Mayor calidad de la imágenes de video, tanto en resolución como en rango visual e información contenida.
- Aplicación de sensores de televisión para imágenes globales y locales, con datos grabados para una órbita completa.
- Uso de instrumentos infrarrojos digitales para tomar temperaturas a nivel del mar y a diferentes altitudes, produciendo perfiles de temperaturas hasta los 40 km. de altura.



Ilustr. XIII-18: METEOR-2.

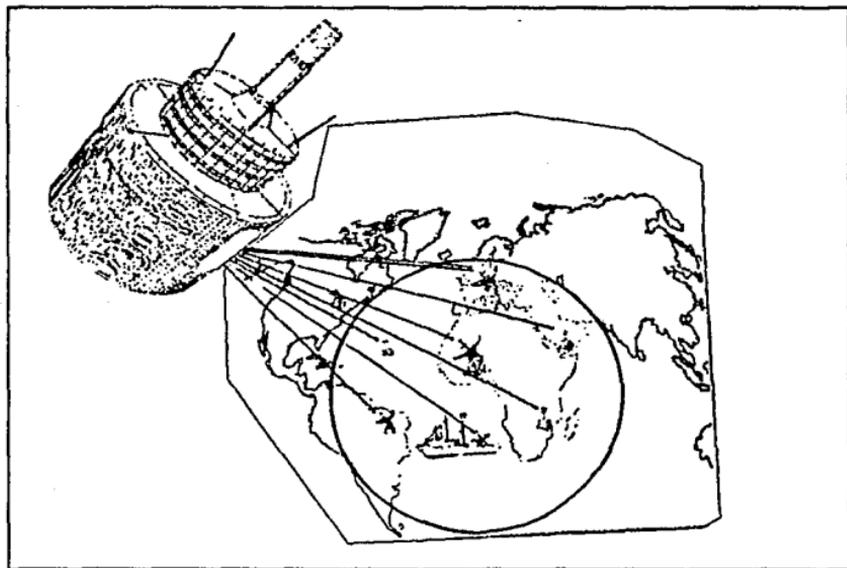
- Uso de sensores para medir la intensidad de radiación emitida por la Tierra.
- Aplicación de dos canales independientes de radio para transmitir a tierra los datos globales acumulados durante cada órbita (en la banda de 460-470 Mhz) y el envío directo de imágenes a estaciones locales (en la banda de 137-138 MHz).

Con los instrumentos anteriores, los Meteor-2 eran capaces de proporcionar dos veces al día información sobre distribución de nubes y capas de nieve, datos globales de distribución de temperaturas, alturas de nubes y temperaturas de superficies oceánicas, así como intensidad de radiación emitida por la Tierra. Además, podían enviar tres veces al día imágenes a las estaciones locales por medio de sistemas análogos a los utilizados en los satélites estadounidenses.

**SERIE METEOSAT (EUROPA, 1977)**

La planificación del sistema Meteosat se inició en 1972, con la participación de los países miembros de la ESA ( Agencia Espacial Europea) cuando todavía se llamaba Organización Europea de Investigación Espacial. El programa proponía dos satélites meteorológicos preoperacionales en órbita geoestacionaria (Meteosat 1 y 2) y tres de aplicación total (European Meteosat Operational -MOP-).

Los satélites Meteosat originales eran también cilíndricos, con diámetro de 2.1 m y altura de 3.2 m. Su peso era de 300 kg y su fuente de poder eran seis paneles solares en el borde de la carcasa. Estaban estabilizados por rotación (100 rpm) con el eje perpendicu-



Ilustr. XIII-19: METEOSAT y su infraestructura prevista.

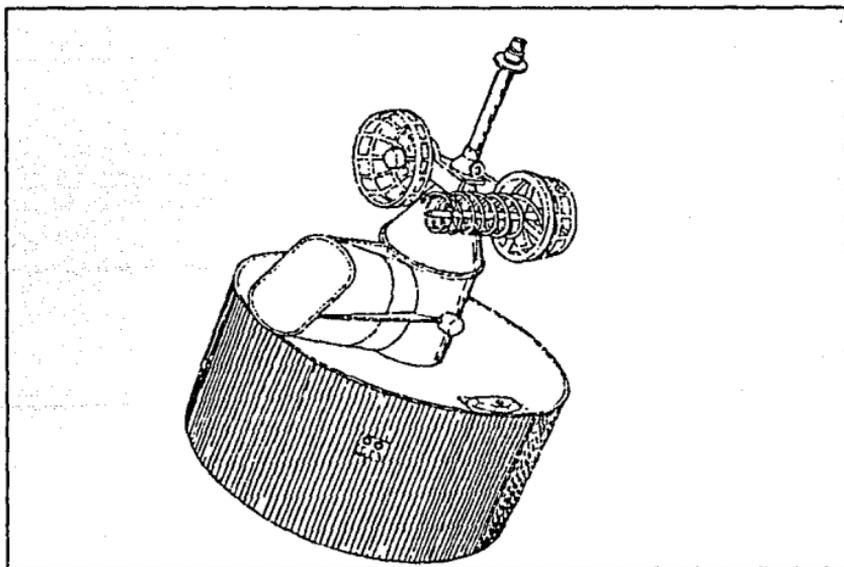
lar al plano de su órbita. Estaban, por otra parte, provistos de un radiómetro de alta resolución que capturaba imágenes en tres bandas: la visible (0.4-1.1 micras) con resolución de 2.5 km; el infrarrojo térmico (10.2-12.5 micras) con resolución de 5 km; y la emisión del vapor de agua (5.7-7.1 micras) con resolución de 5 km. Este radiómetro era una aplicación electroóptica capaz de producir dos imágenes de la Tierra en las tres bandas cada 25 minutos y cuyo principal elemento era un telescopio con objetivo de 40 cm. Los datos eran transmitidos a razón de 166,000 bps. Además, Meteosat contaba también con un sistema WEFAX de transmisión de datos e imágenes, así como un segundo sistema para recepción de datos de estaciones fijas o móviles, marinas o terrestres, automáticas o semiautomáticas. De los datos básicos generados por el radiómetro, por otro lado, era posible deducir la temperatura superficial del océano, la dirección, temperatura y altitud de nubes y la humedad de la Troposfera superior.

El contratista para la construcción de estos satélites fue originalmente la compañía francesa Aérospatiale, pero los posteriores MOP estuvieron a cargo de la multinacional Eumetsat. Por cierto, debe notarse que Meteosat-1 formó parte del Programa de Investigación Atmosférica Global (GARP) de la Organización Meteorológica Mundial (WMO).

En cuanto a las características de los satélites MOP, éstos eran básicamente del mismo tipo que los Meteosat, pero llevaban sistemas mejorados de transmisión de datos y de control en general.

**SERIE GMS/HIMAWARI (JAPON, 1977)**

Los satélites GMS (Geostationary Meteorological Satellite) formaron parte de un programa de la Agencia Nacional (japonesa) de Desarrollo Espacial (NADSA). Eran cilíndricos, con 3.45 m de altura y 2.1 m de diámetro, y pesaban 290 kg. Eran estabilizados por rotación, pero la antena estaba montada en un sistema contrarrotatorio. Las celdas solares del borde



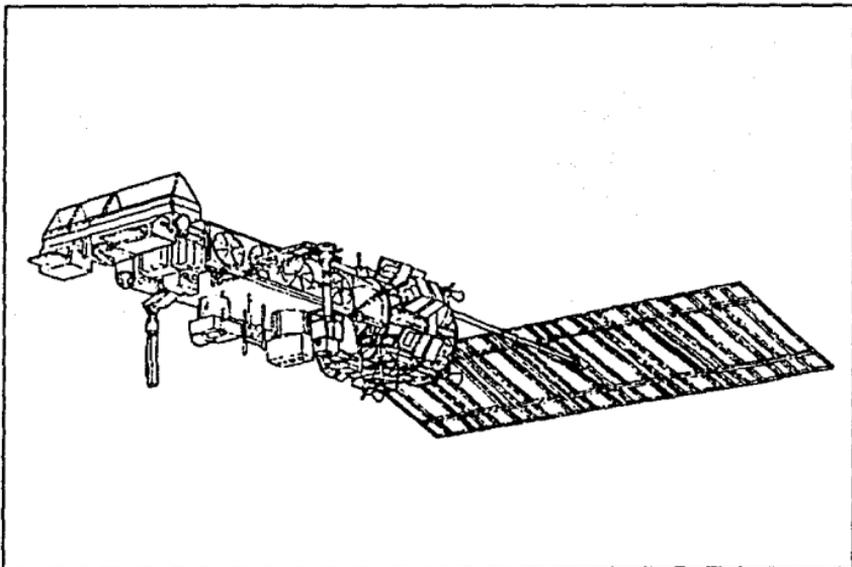
Ilustr. XIII-20 GMS/Himawari

entregaban hasta 225 W. El instrumento principal era un VISSR (Radiómetro de Rastreo Rotacional Visible e Infrarrojo) construido en los E.U. y que funcionaba en cuatro bandas visibles (0.5-0.75 micras) y una en el infrarrojo (10.5-12.5 micras). Las imágenes generadas tenían resolución de 1.25 km en las bandas visibles y de 5 km en la infrarroja. El segundo instrumento en importancia era el SEM (Monitor de Ambiente Espacial) diseñado y construí-

do por la Compañía Eléctrica Nipona para estudiar los efectos de la actividad solar en las telecomunicaciones terrestres. Además, se disponía de un dispositivo para coleccionar datos de estaciones de tierra y de un sistema de distribución de imágenes pretratadas por el Centro de Procesamiento de Datos de la Agencia Meteorológica Japonesa que, junto con NADSA, manejaba los satélites en órbita.

La construcción de los GMS se realizó por la American Hughes Aircraft Company, en colaboración con la japonesa NEC.

#### SERIE TIROS-N/NOAA 6 AL 9 (ESTADOS UNIDOS, 1978)



Ilustr. XIII-21 Versión avanzada del TIROS-N

Esta familia constituyó otra generación de satélites meteorológicos en órbitas próximo-polares. El primero de la serie fue TIROS-N, que tuvo tanto carácter experimental como operativo. La sección central del satélite era de 3.7 m de longitud y 1.9 m de diámetro. La longitud total, con los paneles solares extendidos (que proporcionaban 1260 watts), era de 6.5 m. Su peso era de 744 kg.

El instrumento más importante a bordo era el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR), que proveía imágenes y datos en tiempo real tanto de día como de noche. Tenía cuatro canales con rangos de longitud de onda de 0.55 a 11.5 micras, y obtenía imágenes en las regiones visible e infrarrojo de distribuciones nubosas, así como de temperaturas de superficie del mar e identificando hielo y nieve. La resolución variaba entre 1 y 4 km según el tipo de imagen. TIROS-N llevaba además un grupo de tres instrumentos (HIRS/2, SSU y MSU) llamados en conjunto TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder). El sistema proveía perfiles de temperatura atmosférica entre el nivel del mar y los 250 km de altura, así como contenidos de vapor de agua y ozono. Un SEM, que también formaba parte del equipo, monitoreaba las características de las partículas emitidas por el Sol, midiendo flujos de protones y electrones. Finalmente, se disponía de un Sistema Colector de Datos de estaciones terrestres de cualquier tipo, la posición de las cuales podía determinarse por técnicas de efecto Doppler (ver el apartado de Radar) con precisión de 5 km.

Un agregado interesante al NOAA-8 fue el Sistema de Búsqueda y Rescate (SRS) que recibía datos de transmisores-localizadores de emergencia a bordo de barcos o aviones que permitían identificar y localizar a las víctimas de algún siniestro. El SRS formaba parte de un programa conjunto de los Estados Unidos, Canadá, Francia y la Unión Soviética.

#### **SERIE GOES 4 AL 6 (ESTADOS UNIDOS, 1980)**

El GOES 4 introdujo en realidad una nueva familia de satélites construidos por Hughes Aircraft International. Su forma general seguía siendo cilíndrica, con diámetro de 2.16 m y

altura de 3.5 m y peso de casi 400 kg. Era estabilizado por rotación e incluía múltiples mejoras a los sistemas GOES previos. Por ejemplo, la sustitución del VISSR por el VAS (Sonda Atmosférica por radiómetro de rastreo rotacional Visible e Infrarrojo), que tenía la capacidad añadida de capturar datos concernientes a características atmosféricas como contenidos de vapor de agua y bióxido de carbono, así como temperatura. El sistema de antenas también fue modificado, haciendo más eficiente la transmisión de datos a estaciones terrestres.

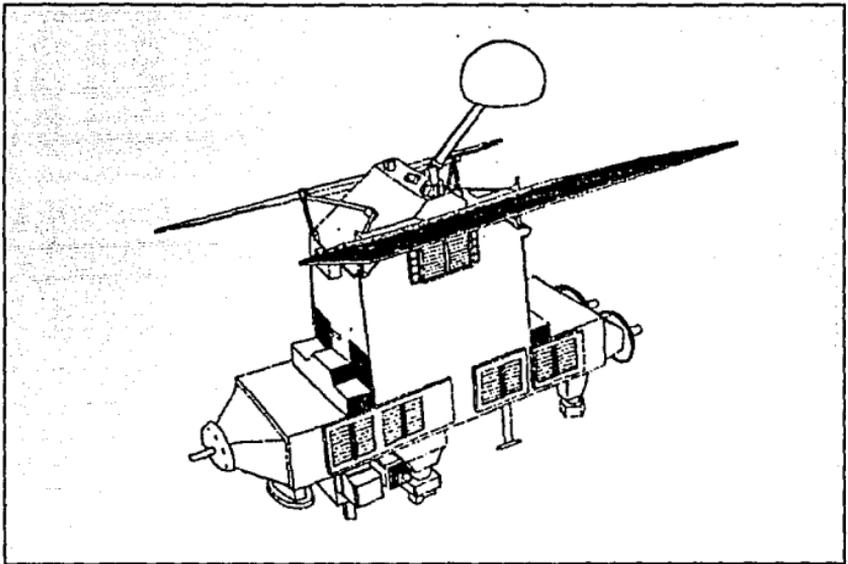
### **SERIE INSAT (INDIA, 1983)**

Los INSAT (Indian National SATellite) fueron construidos por Ford Aerospace para telecomunicaciones y meteorología, bajo contrato con el gobierno hindú. Pesaba 1089 kg y medía, con su "vela" y su panel solar extendido, 19.4 metros. Los instrumentos meteorológicos que transportaba eran:

- Sistema colector de datos ambientales, que los recibía desde 110 estaciones terrestres automáticas.
- VHRR que obtenía imágenes cada media hora en la banda visible (0.55-0.75 micras), con resolución de 2.8 km y en la banda infrarroja (10.5-12.5 micras) con resolución de 11 km. Los datos eran transmitidos a razón de 400 Kbps al Centro de Utilización de Datos Meteorológicos, en Nueva Delhi.

### **ERBS (ESTADOS UNIDOS, 1984)**

El Satélite Estimador ("Presupuestador") de Radiación Terrestre (ERBS en inglés) fue lanzado como parte del programa ERBE (Experimento de Estimación de Radiación Terrestre) para medir la radiación emitida por el planeta. Pesaba 2,304 kg y tenía 1.6 m de largo y 3.8 m de altura. A bordo había tres instrumentos:

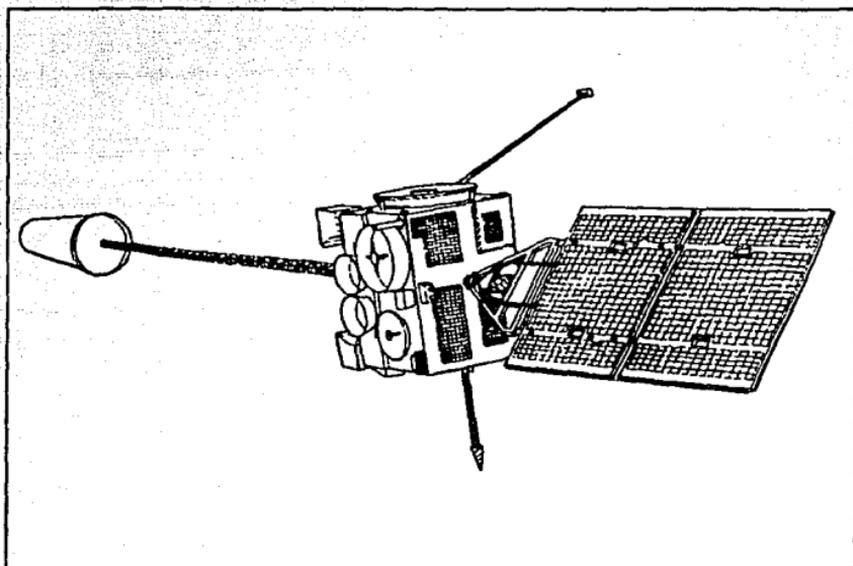


Ilustr. XIII-22 ERBS

- Dos tipos de dispositivos ERBE contruidos por TRW para medir radiación.
- El aparato experimental para medir gas y aerosoles estratosféricos (SAGE II) construido por Ball Aerospace, que también construyó el satélite en sí. SAGE II monitoreaba la distribución vertical de aerosoles estratosféricos, de ozono y de bióxido de carbono.

#### **SERIE GOES I AL M (ESTADOS UNIDOS, 1989)**

Esta serie continuadora de la GOES, pero con características distintas, se inició en efecto en 1989, con el lanzamiento del GOES I (luego GOES 9) y todavía está en desarrollo. Construidos por Ford Aerospace, están diseñados para vidas útiles de cinco años. Estarán estabilizados en tres ejes y por tanto sus objetivos apuntarán constantemente a tierra. Está



Ilustr. XIII-23 GOES-I

previsto que los primeros tres estén equipados con un sistema nuevo de cinco canales para las bandas visible e infrarroja, en las que se obtendrán imágenes y se observarán las características de la atmósfera. Los GOES posteriores, sin embargo, llevarán un magnetómetro y un sensor de rayos X, sistemas de recolección de datos de estaciones marinas y terrestres, así como sistema de búsqueda y rescate (SARSAT).

#### **UARS (ESTADOS UNIDOS, 1989)**

El Satélite de Investigación de la Atmósfera Superior (UARS), lanzado en 1989, está capacitado para obtener datos para estudiar los procesos físicos en la estratosfera, la mesosfera y la baja termosfera. Para ello lleva diez distintos aparatos científicos, de los que no se dispone de información adicional.

TABLA DE SATELITES METEOROLOGICOS

TIPO	ORBITA [1]	ALT.MEDIA [2]	FECHA DE LANZ. INI.	FECHA DE LANZ.FIN.	N. Lb.	PAIS
TIROS	48° - 98°	720 - 890	1º/IV/60	2/VII/65	10	E.U.
Nimbus	99°	950 - 1140	28/IX/64	24/X/78	7	E.U.
ESSA	98°	775 - 1470	3/II/66	26/II/69	9	E.U.
Cosmos	81°	610	28/II/67	1968	5	URSS
Meteor-1	81° - 98°	650	26/III/69	18/VI/80	30	URSS
ITOS/NOAA	102°	1460	23/I/70	29/VII/76	9	E.U.
EOLE FR-2	50°	790	16/IX/71		1	FRA.
SMS/GOES	Geoest.	35,830	17/V/74	16/VI/78	5	E.U.
Meteor-2	81°	875	11/VII/75			URSS
GMS/Himaw.	Geoest.	35,600	14/VII/77	3/IX/84	3	JAP.
Meteosat	Geoest.	35,700	23/XI/77	1990		EURO
TIROS-N [3]	99°	950	13/X/78	12/XII/84	5	E.U.
Bhaskara	51°	530	7/VI/79	20/XI/81	2	IND.
INSAT	Geoest.	35,800	10/IV/82	30/IX/83	2 [4]	IND.
ERBS	57°	609	5/X/84		1	E.U.
GOES [5]	Geoest.	36,000	JUL. 89	DIC. 89		E.U.
UARS	57°	600	1989			E.U.

[1] Se indica, en su caso, el rango de inclinaciones respecto al Ecuador en que los miembros de la serie fueron colocados.

[2] Se indica, en su caso, el rango de alturas medias (apogeo-perigeo) de las órbitas de los miembros de la serie.

[3] Constituyó una serie basada en mejoras importantes de los modelos TIROS más avanzados.

[4] El primero de ellos fue completamente inútil, ya que su sistema de control de altitud falló.

[5] Continuación mejorada de los SMS/GOES.

No

Exista

Pagina

## **SEGUNDO TEMA: EL ESTADO DEL ARTE**

(...)

Mientras las ondas de la luz al beso  
palpiten encendidas,  
mientras el sol las desgarradas nubes  
de fuego y oro vista,  
mientras el aire lleve en su regazo  
perfumes y armonías,  
mientras haya en el mundo primavera  
¡ habrá poesía !

(...)

## **XIV.- GENERALIDADES SOBRE EL "ESTADO DEL ARTE": OTROS INSTRUMENTOS**

### **SISTEMAS DE RADIOSONDEO**

Desde el lanzamiento de la primera radiosonda en 1930 y hasta la aparición de los primeros satélites meteorológicos, los estudios climáticos de áreas extensas dependían por completo de los datos recogidos en la estratosfera por los sistemas acarreados por globos. Incluso ahora, a pesar de las capacidades de los últimos instrumentos espaciales, la red mundial de radiosondeo es una fuente crucial de información en cualquier programa de investigación meteorológica de amplio alcance.

La primera red de radiosondeo (al menos en los EE.UU.) de bajo costo y de amplia cobertura (que se hicieron necesarias cuando el ejército, que se había encargado de proveer datos de la atmósfera media a los investigadores meteorológicos, dejó de hacerlo) fue conocida como Safesonde y usaba señales traducidas de cierto número de estaciones receptoras fijas para lograr lecturas de vientos de eficiencia incomparable en su momento. El problema era que las distancias requeridas hasta las estaciones fijas que debían rastrear a los sistemas y recibir su información no llegaban a los 100 km y, por ende, no permitían que las estaciones recibieran datos acerca de las zonas a las que su cobertura directa no llegaba. La aparición de un sistema de navegación Loran para aeronaves hizo posible, después de muchas investigaciones y ajustes, desechar los sistemas Safesonde en 1984 y sustituirlos por los Sistemas de Sondeo Atmosférico de Encadenamiento cruzado Loran (Cross-chain Loran Atmospheric Sounding System -CLASS-), cuya capacidad mayor es, gracias al nuevo sistema de navegación, rastrear y transmitir a diferentes estaciones Loran simultáneamente, lo que permite la cobertura de áreas marginales de donde los sistemas anteriores no podían obtener datos. El sistema CLASS típico incluye un "trailer" que contiene un aparato integral de inflado y lanzamiento de globos, la electrónica del sistema y espacio de trabajo para el operador. Además, se han fabricado modelos que permiten su uso en barcos. La flexibilidad del diseño permite a los usuarios configurar la electrónica para operar desde una base fija o una móvil.

A pesar de la evidente utilidad de los sistemas CLASS, los programas de investigación durante los 1990's exigirán sistemas de sondeo que, además de proveer información de alta calidad respecto a vientos y termodinámica atmosférica, no estén limitados a funcionar en áreas con cobertura Loran y cuyas frecuencias de transmisión/recepción no estén dentro del rango de interferencia con los radares militares ni los sistemas de perfilación de vientos que operan en frecuencias cercanas (alrededor de 400 Mhz). Ese es el motivo del diseño de los sistemas NEXUS, cuyo desarrollo se inició en 1990 y que deberían estarse probando actualmente en el campo (1992). La característica más importante de este diseño es la flexibilidad en cuanto al establecimiento de parámetros de operación, la que le permite funcionar dentro de un sistema Loran como los actuales o utilizar un sistema de navegación alternativo (OMEGA/VLF). Esto, claro, implica la posibilidad de elegir la frecuencia de operación entre los 1680 Mhz y los actuales 400 Mhz. Además, y a diferencia de los sistemas CLASS, los NEXUS podrán interactuar con instrumentos de radiosondeo propiamente dichos provistos por diferentes fabricantes gracias al agregado de un tablero de interface simple.

#### **INSTRUMENTO DE SONDEO ATMOSFERICO DE BAJO NIVEL (YO-YO)**

La necesidad para la investigación de la propagación de ondas de radar de frecuencia baja sobre zonas de mar abierto de describir una atmósfera bidimensional entre la superficie y los 500 m de altura llevaron al diseño de este instrumento, que puede ascender y descender varias veces al tiempo que es arrastrado por el viento lejos de su punto de lanzamiento (de ahí su denominación).

El instrumento está constituido por cuatro partes principales: un paquete comercial de radiosondeo (un cilindro de 7 cm de diámetro que contiene una radiosonda que opera en los 400 Mhz), un circuito electrónico de control con baterías, un motor eléctrico con hélice para aeromodelismo y un cilindro de cartón de casi 20 cm de diámetro con cables de suspensión aparte del globo de helio correspondiente. Todos los elementos están montados dentro del cilindro de cartón. La circuitería electrónica controla el funcionamiento del

motor, que arranca cuando un interruptor activado por agua que cuelga 3 m debajo del instrumento toca la superficie del mar. Después de un intervalo definido, el motor se detiene. Además, se lleva la cuenta del número de arranques de modo que, al llegar a la cantidad preestablecida, el globo se desinfla y el conjunto caiga al mar. El cilindro grande de cartón, por cierto, está unido al globo a través de un abatelenguas que asegura que el giro inducido por la rotación del motor sea uniforme para la unidad formada por el paquete de instrumentos y el globo, de manera que la separación entre ellos sea constante durante toda la operación.

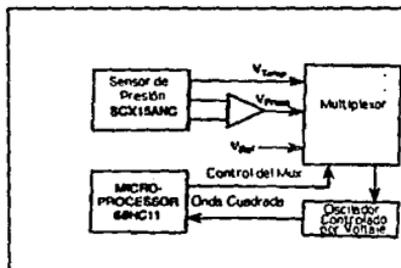
#### **SENSORES DE PRESION PARA USO EN RADIOSONDEO**

Los sensores de presión para radiosondas han sido tradicionalmente elementos aneroide de dos tipos principales: baroswitch V.I.Z o sensores capacitivos Väisälä. El baroswitch utiliza un barómetro aneroide con compensación de temperatura para mover un brazo a lo largo de un conmutador. La liga está diseñada para proveer gran sensibilidad a bajas presiones. El conmutador, además, es un medio para medir no sólo presión, sino para alternar entre canales de telemetría conforme la radiosonda asciende. Su desventaja es su peso, su tamaño y su incompatibilidad con el procesamiento automático de datos. El elemento capacitivo Väisälä, originalmente, movía los platos de un capacitor externo, pero los últimos modelos usan platos internos a la cápsula aneroide, excéntricamente montados al diafragma. Los platos se acercan conforme la presión se incrementa, de modo que también aquí hay mayor sensibilidad a bajas presiones.

Los requerimientos de amplitud de rango, resolución, bajo costo y poco peso que el uso en radiosondas impone para esta clase de sensores limitan enormemente el número de ellos que resultan útiles entre los comerciales existentes. Si bien los dos dispositivos anotados arriba han sido buenas opciones durante años, últimamente ha aparecido un tipo nuevo de sensor de presión que podría aproximarse todavía más a ese ideal: el sensor piezorresistivo de presión en circuito integrado basado en silicón (llamado "sensor de silicón"). De hecho, las características del silicón son ideales para fabricar diafragmas de

sensor de presión: su estructura cristalina lo hace casi perfectamente elástico, su histéresis es despreciable y conserva sus características originales a lo largo del tiempo. Evidentemente, la sensibilidad del sensor depende del grosor de la membrana y las sucesivas mejoras en las técnicas de fabricación han permitido conseguir membranas más delgadas y de características químicas (grados de impureza) mejor controladas.

Una aplicación específica de esta clase de dispositivos se da en el barómetro ERICA, que utiliza el modelo SCX15ANC de Sensym como transductor (este dispositivo es un sensor de silicón que entrega resultados en forma de una diferencial de voltajes proporcional a la presión y de un voltaje proporcional a la temperatura, con fines de compensación) en un sistema digital basado en el microprocesador 68HC11. El circuito consiste en el SCX, un amplificador para su salida proporcional a la presión, un multiplexor que recibe como entradas el voltaje de ajuste por temperatura, la diferencial amplificada y un voltaje de referencia y cuya salida, controlada por el microprocesador, pasa a un convertidor de frecuencia a voltaje de precisión (CFV). La salida del CFV es alimentada al 68HC11 en una de sus entradas de temporizador, y el micro convierte la onda cuadrada que recibe en cuentas de período de alta resolución que son utilizados, en conjunto con coeficientes de calibración, dentro de una ecuación polinomial para calcular la presión. Los coeficientes son escritos en el microprocesador durante el proceso de calibración.

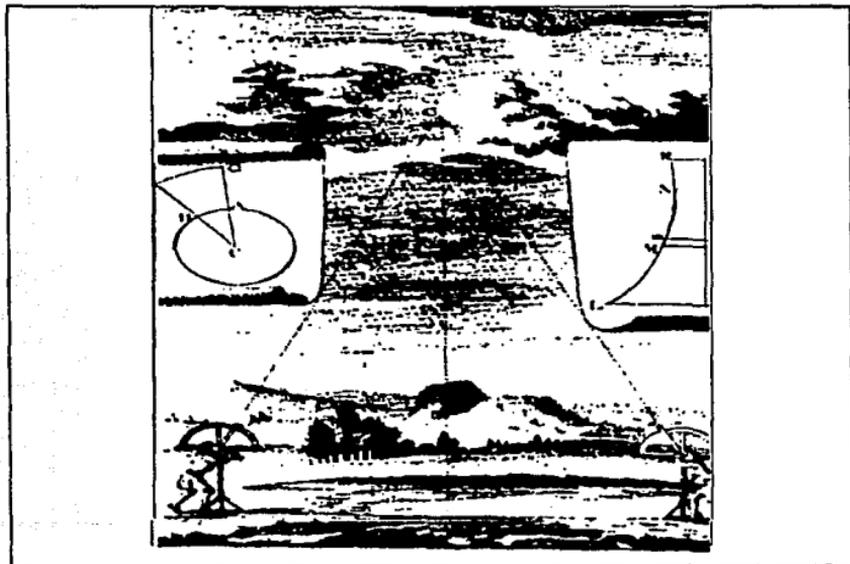


Ilustr. XIV-1 Circuito del sensor de presión.

## CEILOMETROS

La necesidad de medir la altura de las nubes se hizo evidente desde el s. XVI, como se anotó en la sección histórica. Sin embargo, la importancia de tal conocimiento se hizo

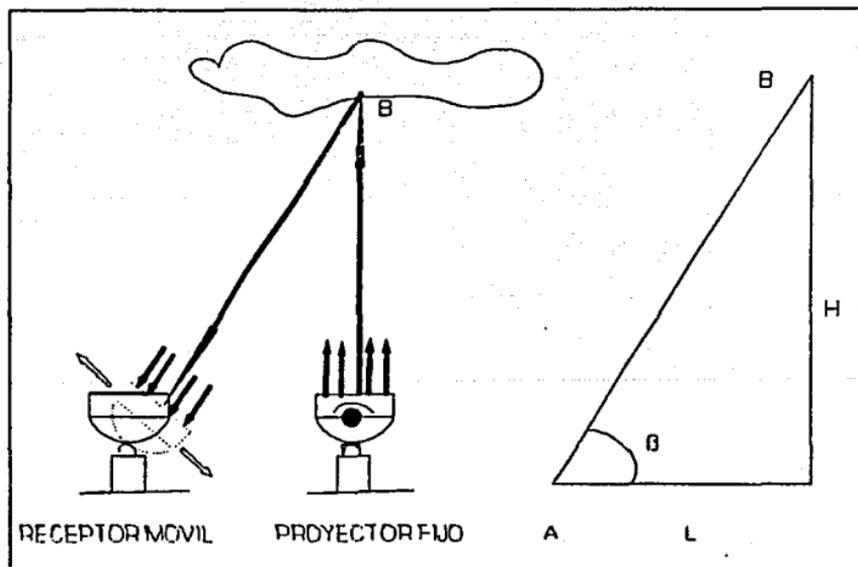
vital con el desarrollo de la aeronáutica, dado que la seguridad de las naves y de la gente que transportan depende, en buena medida, del estado y comportamiento de las masas nubosas sobre los puertos aéreos de partida o de destino.



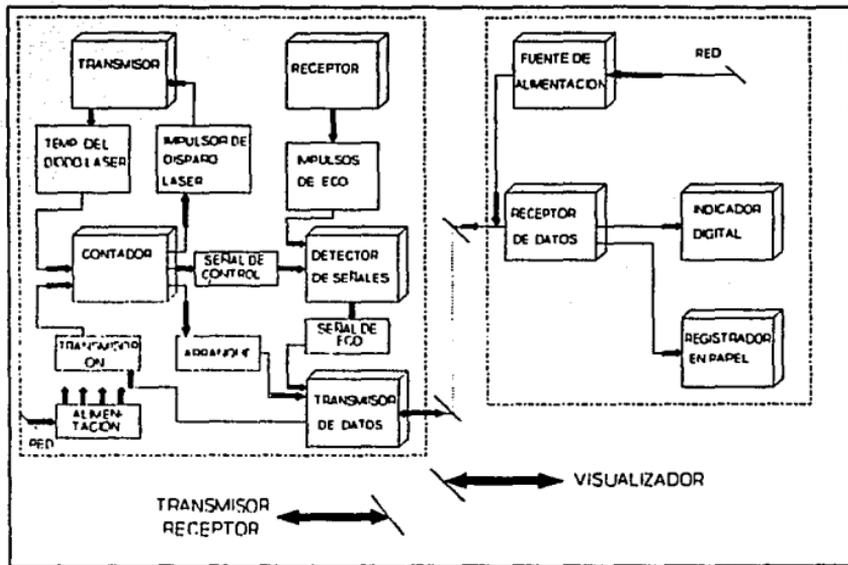
Ilustr. XIV-2 Nefobasimetría antigua

La observación visual desde tierra y con la ayuda de globos proporcionó información suficiente durante algún tiempo, pero conforme las necesidades fueron siendo más elaboradas, la fiabilidad y la precisión de las medidas debieron incrementarse también. Así, se pasó del uso de teodolitos y del análisis de la información proporcionada por los pilotos a sistemas de rastreo óptico que han cumplido su labor por muchos años. Los celómetros de haz giratorio, por ejemplo, funcionan aceptablemente. En ellos, un haz de luz de gran intensidad se proyecta sobre la base de las nubes mientras un rastreador fotoeléctrico explora el área hasta que encuentra la luz reflejada del proyector. La altura de la nube se

calcula por triangulación, si bien el sistema tiene algunos problemas debidos a la dispersión del haz en condiciones meteorológicas adversas, llegando a confundir algunas interferencias (como lluvia o niebla) con las nubes. Desventajas adicionales de éste equipo son la complejidad de su mecánica, lo limitado de su alcance (unos 1500 m) y la necesidad de dos emplazamientos: uno para el receptor y otro para el emisor.



Ilustr. XIV-3 Esquema de funcionamiento del celómetro de proyector de luz.



Huotr. XIV-4 Diagrama de bloques del nefobasímetro láser.

El láser, por otro lado, proporciona una fuente de luz coherente de gran intensidad, y gracias a él surgió una nueva familia de ceilómetros más fiables y exactos, así como más reducidos. La medición de alturas se basa en el conteo del tiempo que tarda un pulso de láser en llegar a la nube y volver al dispositivo. En general, este tipo de instrumentos constan de dos secciones básicas: el transmisor/receptor (transceptor), que se coloca directamente en el sitio de observación, y el visualizador, que incluye un registrador en papel y que puede colocarse a distancias que superan un kilómetro desde el emplazamiento del transceptor, conectado a éste a través de una línea telefónica. El transceptor está contenido en una caja exterior, que sirve de pantalla contra el sol y que posibilita la disipación del exceso de calor generado por éste. Dos ventanillas directamente colocadas sobre los sistemas ópticos de transmisión y de recepción, inclinadas 30°, permiten la emisión/recepción y, al

mismo tiempo, protegen contra la lluvia. El gabinete interior contiene toda la electrónica y la óptica necesarias para la generación del láser, así como dispositivos de protección contra la humedad, las variaciones de temperatura y la acumulación de polvo. La transmisión de la información al visualizador puede realizarse a través de un par telegráfico de 600 ohms de impedancia de entrada. El láser utilizado suele obtenerse de un diodo de AsGa (arseniuro de Galio), que emite un pulso de luz al recibir una corriente mínima de 10 A. El pulso, que dura 50 ns, pasa a través del sistema óptico y sale al exterior como un cilindro de luz de 15 m de longitud. El sistema receptor consiste en un fotodiodo de avalancha, un filtro óptico pasabanda y un sistema de lentes que enfoca el haz reflejado sobre el fotodiodo. La señal resultante es amplificada y convertida en la información que se transmitirá al módulo visualizador, proporcionando lecturas confiables en el rango entre 10 m y 4 km. El ciclo completo de medición lleva 45 s, y pasan 2 s entre el final de uno y el inicio de otro.

## SISTEMAS DE SONDEO RADIO ACUSTICO

El sondeo acústico de la atmósfera se inició en 1946, como un intento de entender los mecanismos que provocaban el desvanecimiento de las señales electromagnéticas de longitudes decimétricas y centimétricas. Gilman y otros reportaron, a partir de este trabajo, una correlación entre el período de los ecos de sodar debidos a inversiones de temperatura y la pérdida de microondas de radio, pero el reporte pasó desapercibido hasta fines de los 1960's, cuando McAllister (1968) se tropezó con problemas similares en radiopropagación y recuperó la idea del sondeo acústico. Además, demostró que los ecos producidos por irregularidades atmosféricas podían ser utilizados en el reconocimiento de inversiones térmicas y ondas de gravedad sobreimpuestas. Los RASS (Radio Acoustic Sounding Systems, o Sistemas de Sondeo Radio Acústico) fueron utilizados para la obtención de perfiles de temperatura atmosférica por primera vez en 1986 por el grupo de Matuura, pero en general se han desarrollado como un sistema auxiliar de los radares Doppler utilizados en la obtención de perfiles de viento, dado que proporcionan una resolución temporal muy elevada en la medición de temperaturas de la baja troposfera. Instrumentos de esta índole, combinados con ceilómetros láser del tipo descrito, han sido instalados y puestos en

operación por la Universidad de Penn State en 1990, obteniendo eficazmente multitud de parámetros asociados con la estabilidad de la baja troposfera y la formación y dinámica de nubes.

## EL SODAR

Una forma particular de RASS la constituye el sodar (SOund Detection And Ranging), cuyos primeros modelos operacionales fueron construidos a principios de los 1970's y cuyas mediciones se basan en la dispersión de sonido provocada por las fluctuaciones térmicas y dinámicas de la atmósfera. Así, un pulso acústico de frecuencia constante es enviado verticalmente para lograr perfiles de estructuras atmosféricas turbulentas a partir del análisis de los ecos recibidos.

Un sistema de sodar simple presenta una sola antena de transmisión-recepción de los pulsos acústicos. Sin embargo, es bastante usual que se disponga de varias de ellas, activadas en secuencia y analizando en cada una el corrimiento en frecuencia que la transmisión sufrió. Las características de ese corrimiento en cada uno de los haces acústicos permiten establecer tridimensionalmente el vector viento y, en su caso, la presencia de frentes atmosféricos, capas térmicas límite en el interior de masas estáticas, inversiones marinas y otra diversidad de fenómenos.

Ya en 1973, Wickerts y Nilsson usaron el sodar para obtener información sobre el área y la altitud de capas de inversión, y el dispositivo fue sucesivamente utilizado en estudios sobre transmisión de microondas por Stilke (1973), Nilsson y Wickerts (1977), Gera y Sarkar (1980), Singal y Gera (1981-82) y Mon y Mayrarge (1983). Fue en un estudio similar por parte de Sylvain y otros, en 1983, cuando el sodar fue explícitamente incorporado al equipo meteorológico de investigación.

El desarrollo del sodar llevó a la creación de diversas modalidades de su sistema: monoestático, biestático, Doppler. Este último, particularmente, ha demostrado su eficacia en la determinación de perfiles verticales de aceleración vertical de las masas atmosféricas (Brown y Hall, 1978; Fiocco, Ciminelli y Mastrantonio, 1986), información que se ha hecho importante en la determinación de las fuerzas convectivas provocadas por la radiación solar y los flujos atmosféricos de calor determinados por ellas. Las aplicaciones, sin embargo, no paran allí. Los RASS en general y los sodares en particular pueden ser (y son) utilizados en estudios de la capa límite atmosférica y turbulencias, en estudios de contaminación, astronomía, interacciones mar-aire, propagación de ondas acústicas y de radio, precipitación pluvial y estudios de terrenos. Especialmente, en los últimos diez años la tecnología de muestreo proporcionada por el sodar ha evolucionado hacia una que permite el modelado de fenómenos como la contaminación del aire.

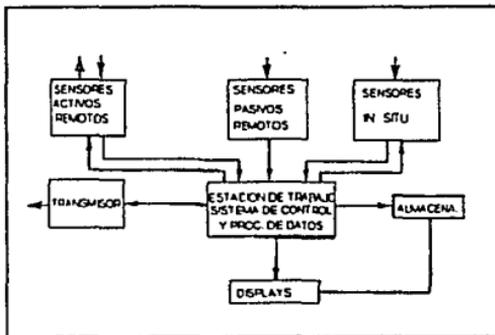
Una novedad interesante en cuanto a sodares se refiere es la pretensión de incorporar sus versiones Doppler a la parafernalia de las estaciones meteorológicas marinas, particularmente de barcos de observación. De hecho, el sodar se había utilizado con éxito en su forma simple desde los 1970's en esta clase de instalaciones, pero sólo en 1991 se presentó un estudio (A. Weill, F. Baudin) que apoya la factibilidad del sodar Doppler marino, pese a los problemas que el ruido de la propia nave, el viento, el movimiento giratorio y oscilatorio de las bases y su aceleración vertical representan.

## SISTEMAS INTEGRADOS DE OBSERVACION METEOROLOGICA

## SISTEMA INTEGRADO DE SONDEO

El llamado Sistema Integrado de Sondeo (ISS por Integrated Sounding System) será un multiinstrumento con base terrestre que incluya tanto elementos de telemetría como de medición "in situ". El concepto completo del ISS está conformado por:

- Perfilador Doppler de vientos UHF/VHF con RASS integrado.
- Radiómetro de microondas (MWR).
- Interferómetro de alta resolución (HIS).
- Radiosondas compatibles con OMEGA/CLASS.
- Estación meteorológica de superficie.

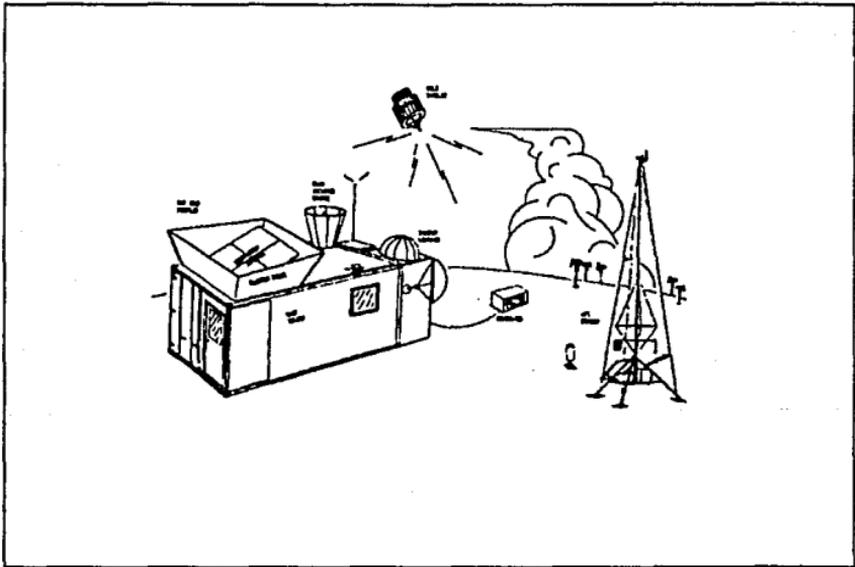


Ilustr. XIV-5 Concepto ISS

El perfilador Doppler y RASS (como se anotó someramente en el apartado dedicado a los RASS, éstos se han desarrollado en la última década hacia una tecnología que puede combinarse con los perfiladores de viento para obtener perfiles de temperatura virtual en la troposfera) que se han propuesto para integrarse son los modelos actualmente en uso. La elección de las frecuencias más eficientes entre las disponibles para su operación se traduce en un compromiso de capacidades: medición de temperaturas hasta a 10 km (a 50 Mhz) o sólo hasta 2 km (915 Mhz); los radares de frecuencias bajas dentro de VHF tienen la ventaja de ser poco afectados por precipitaciones y pueden ser usados en la

detección de la tropopausa, en tanto que los UHF generalmente tienen un rango de visión mucho más limitado pero son mucho más pequeños, más baratos y más fáciles de instalar. De hecho, la opción ideal sería combinar radares a 50 y 915 Mhz para proveer la capacidad de deducir las velocidades de caída de la precipitación y para mediciones de distribución de tamaño de gotas.

El radiómetro de microondas entrega, como productos principales, perfiles de baja



Ilustr. XIV-8 Sistema integrado de sondeo.

resolución vertical de temperatura y cantidades integradas de vapor de agua y líquido en nubes. Funciona en seis canales, de los cuales los dos más bajos son sensibles al vapor de agua y al líquido en nubes y los cuatro superiores lo son a la temperatura (20.6, 31.65,

52.85, 53.85, 55.45 y 58.8 Ghz). La información es obtenida cada dos minutos usando una técnica de recuperación llamada "inversión lineal estadística" que ha demostrado ser tan confiable como la información obtenida de radiosondas.

El interferómetro de alta resolución opera en el infrarrojo, entre los 3.8 y los 16.8 micrómetros en tres bandas. Los datos son procesados por una transformación de Fourier y las medidas se realizan una vez por minuto. Para propósitos de perfilado atmosférico, la información es mediada en intervalos de cinco minutos y, a través del mismo sistema de inversión lineal estadística, pueden obtenerse perfiles de temperatura atmosférica y de temperaturas de condensación.

Las radiosondas propuestas son las comentadas como estándares actuales: los sistemas CLASS compatibles con sistemas de seguimiento OMEGA.

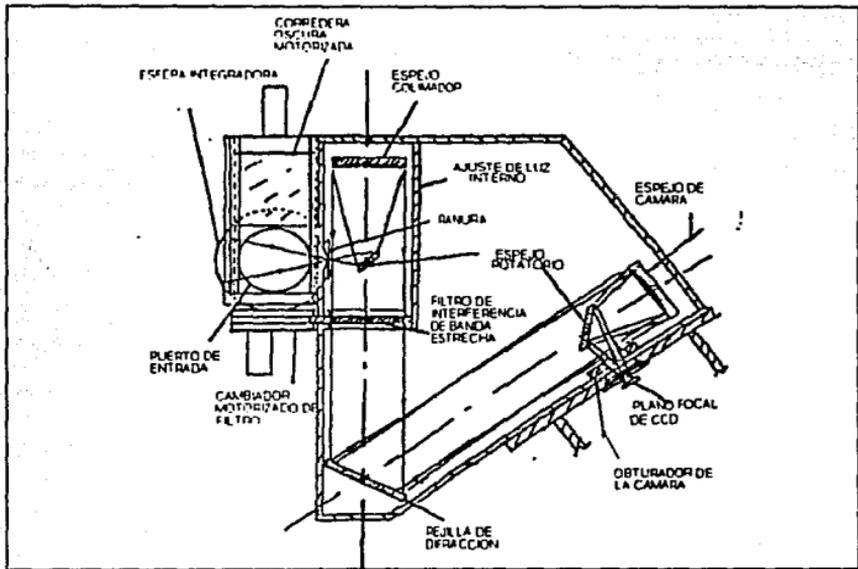
## **SISTEMA DE INSTRUMENTOS PARA MEDICION DE RADIACION UV Y VARIABLES TROPOSFERICAS RELEVANTES**

La radiación ultravioleta en la troposfera juega un papel muy importante en la biología y la fotoquímica atmosférica. Sin embargo, hasta 1991 las observaciones detalladas en tierra de tales radiaciones eran realmente raras y dedicadas exclusivamente a experimentos de corto alcance y de propósito específico. Finalmente, en el 7º Simposium de Instrumentación y Observaciones Meteorológicas de la AMS se presentó un diseño para un sistema de instrumentos altamente automatizado para realizar mediciones detalladas de radiación ultravioleta en tierra y de las propiedades y constituyentes atmosféricos que afectan la magnitud de las irradiaciones medidas.

Las mediciones que el instrumento provee son:

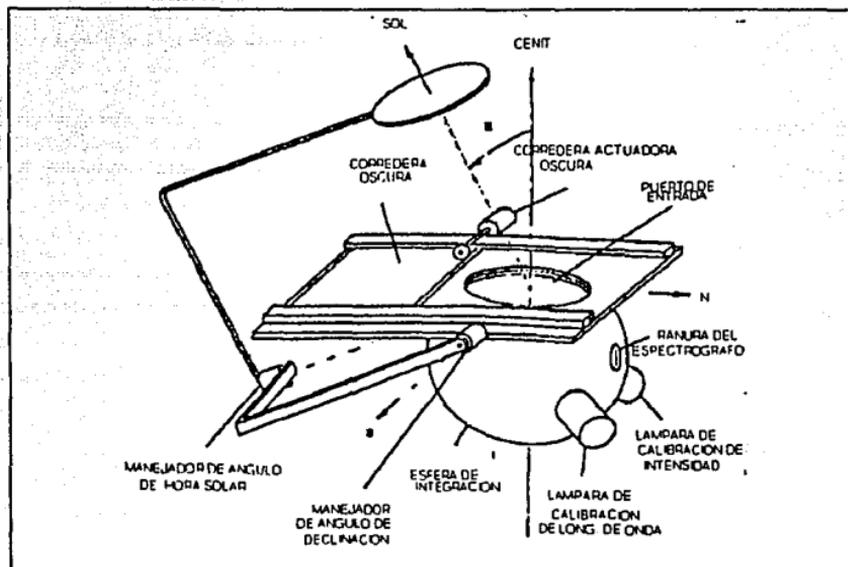
- Irradiación total, difusa y directa de UV solar entre los 290 y los 450 nm.

- Profundidad óptica y distribución de tamaños de aerosoles atmosféricos.
- Cantidades de O<sub>3</sub> (ozono), SO<sub>2</sub> (bióxido de azufre) y NO<sub>3</sub> (bióxido de nitrógeno).
- Proporción de cobertura nubosa.



Ilustr. XIV-7 Espectrógrafo UV

En el instrumento, una esfera con una abertura cenital colecta la luz de un campo de  $2\pi$  esterradianes (un hemisferio). La esfera, además, cuenta con entradas auxiliares para acomodar lámparas de calibración y cuatro fotodetectores calibrados para medición de aerosoles, así como la abertura de entrada para el espectrógrafo. Un arreglo de dispositivos de carga acoplada (CCD) es utilizado para integrar la información espectral obtenida en primera instancia por el espectrógrafo. Estos CCD tienen buena sensibilidad incluso por de-



Ilustr. XIV-8 Aspecto general del front-end del espectrógrafo UV.

bajo de los 250 nm cuando están cubiertos con material convertor de UV (estos materiales son transparentes en longitudes de onda visibles, pero fluorescentes ante el ultravioleta (por debajo de los 400 nm), de manera que convierten las radiaciones de UV a radiación de longitudes de onda más manejables). La abundancia de compuestos ( $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ) y la distribución de tamaño de los aerosoles pueden determinarse calculando la extinción de los rayos directos de sol en cada una de cuatro longitudes de onda discretas (normalmente 368, 500, 778 y 862 nm).

El control general del sistema de instrumentos está basado en una microcomputadora AT con disco duro y una unidad de disco flexible. La computadora puede adaptarse a los tableros de control apropiados para obtener automáticamente espectros y datos de calibración y para almacenar los datos en disco flexible.

## ELEMENTOS EN DESARROLLO PARA USO EN SISTEMAS METEOROLOGICOS

### INSTRUMENTOS MEJORADOS Y SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS PARA BOYAS Y BARCOS

En 1990 surgió en los Estados Unidos el programa IMET (Improved METeorological measurements -Mediciones Meteorológicas Mejoradas-, cuyo objetivo es desarrollar métodos exactos y confiables para realizar mediciones desde boyas y barcos. La tendencia es, desde entonces, utilizar los mejores sensores meteorológicos disponibles, incrementar la resolución de los instrumentos electrónicos, colocar los sensores y su electrónica de control lo más cerca posible unos de otros a fin de minimizar los ruidos, incrementar las frecuencias de muestreo de los sensores digitales y, en general, conseguir configuraciones robustas y confiables para múltiples aplicaciones y con vidas útiles prolongadas. Así, se ha trabajado básicamente alrededor de una filosofía modular, donde los sensores son autónomos e inteligentes, pero fácilmente interconectables para integrar un sistema lógico bien estructurado.

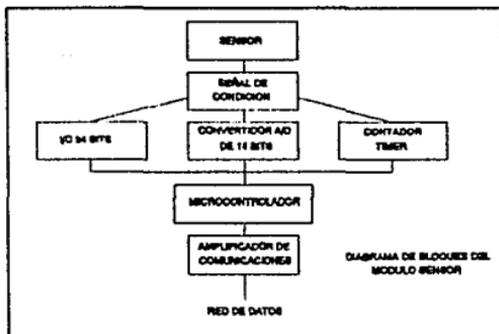
Los instrumentos elegidos para formar parte de los sistemas básicos son:

- Un termómetro de resistencia de platino para mediciones de temperaturas de aire y marinas de superficie (Platinum Resistance Thermometer -PRT-). Fue elegido debido a las características inherentes del alambre de platino que lo forma: coeficiente positivo de temperatura, alta estabilidad por largos períodos e histéresis muy escasa. Como protección contra las variaciones provocadas por la iluminación solar directa se eligió un escudo multiplato contra radiación en el caso del sensor de temperatura atmosférica, mientras el sensor de superficie marina queda alojado en una cámara submarina de aluminio que puede montarse bajo la línea de flotación del barco o la boya.
- Las medidas de humedad relativa se realizan gracias a un sensor Rotronic MP-100F que también se coloca dentro de un escudo contra radiación multiplato.

- La presión atmosférica se mide usando un modelo DB1 de AIR (Atmospheric Instrumentation Research, inc.) que probó ser el más efectivo por su costo que cubre los requerimientos del programa. El sensor, además, queda protegido por un puerto de presión estática contra las variaciones que provocaría la fuerza del viento soplando sobre él.
- La velocidad y dirección del viento son medidas con un modelo 1300 de R. M. Young, que usa una hélice para obtener la velocidad e incluye una veleta para establecer la dirección, así como una brújula modificada y acoplada a un codificador Gray de nueve bits.
- Las radiaciones de onda corta se miden con un Piranómetro Espectral de Precisión Eppley modificado, montado sobre una base de aluminio que proporciona una masa referencia para el instrumento. La radiación de onda larga se obtiene con un Pirgeómetro Infrarrojo de Precisión Eppley, también modificado. Ambos radiómetros residen dentro de cámaras diseñadas para minimizar los errores debidos al movimiento del barco o boya.
- La precipitación se mide con un pluviómetro de sifón modelo 50201 de R. M. Young, el cual usa una técnica de medición capacitiva para determinar el volumen de lluvia depositado dentro de la cámara de colección.

Cada uno de los sensores descritos se adosa a un módulo digital basado en microprocesador y diseñado para funcionar en multitarea, al tiempo que proporciona la flexibilidad

necesaria para añadir módulos sensores conforme sea requerido, ya sea instrumentos existentes actualmente, ya se trate de dispositivos por desarrollar que lo sean sobre una base compatible con este esquema.



Ilustr. XIV-9 Diagrama de bloques del módulo sensor.

En general, cada módulo sensor consta de tres partes: el sensor en sí mismo, su electrónica de control y su interface con el

procesador. Además, cada uno dispone a la entrada de una terminal particular que es un acondicionador de señal (desde un amplificador de precisión para el piranómetro hasta un modelador de pulsos para el anemómetro), en tanto que sus salidas están todas conectadas a una red de cuatro hilos a través de un tablero de poder y de control (dos líneas para cada función). Cada módulo, además, está empaquetado en una caja de plástico resistente al agua y de 11 cm de diámetro con un conector sumergible de cuatro hilos.

Cada paquete autónomo adquiere y procesa datos meteorológicos y los transmite digitalmente a través de una conexión RS-485 hasta un manejador de datos y controlador por comandos. Una interface RS-232, por otro lado, provee conexión simple de laboratorio para actividades de desarrollo. La lógica de cada módulo proporciona alguna o algunas de las siguientes capacidades:

- Cada módulo contiene información única sobre direcciones, identificación y calibración que está disponible por comando.
- Pueden calibrarse los datos con el módulo, resultando en salidas al manejador de datos de unidades calibradas de ingeniería.
- Pueden almacenarse en el módulo factores de calibración que lo acompañen a lo largo de su vida útil.
- Un módulo inteligente puede participar en el proceso de calibración del sensor y guardar internamente los resultados para uso futuro.
- Pueden implementarse algoritmos mientras se realizan mediciones, por ejemplo de cálculos estadísticos, ajuste de curvas o muestreo inteligente basado en cambios de parámetros.

El sistema de adquisición de datos global puede en realidad dividirse en dos sistemas autónomos: uno dedicada al servicio en barcos y el otro al funcionamiento en boyas autónomas. El sistema para barcos dispone, además de los módulos sensores, de un sistema de manejo que es básicamente una computadora personal AT 386, que provee despliegue gráfico en color del comportamiento en tiempo real de las variables en observación. Puede disponerse de la misma información impresa en impresoras láser, al tiempo que queda registrada en cartuchos de disco óptico de 480 Mbytes de capacidad. La computadora funciona bajo Xenix a fin de disponer de la necesaria capacidad de multitarea.

El sistema para boyas, por otro lado, mantiene aproximadamente el mismo paquete de sensores, pero el manejador de datos es un Sistema de Adquisición, Control y Almacenamiento de Bajo Poder (Low Power Acquisition Control Storage System -LOPACS-) disponible comercialmente. Es un sistema con software y hardware compatibles con sistemas PC que funciona bajo DOS y requiere de 0.5 W de potencia disponible. El hardware y el software necesarios pueden desarrollarse sobre equipos PC de escritorio e instalados posteriormente sobre un LOPAC sin ninguna adición. Si bien el sistema carece de recursos de navegación, sí es posible agregarle una liga de radiocontrol que permite la comunicación entre la boya y barcos o aviones. Los datos, por cierto, también se almacenan en disco óptico, en cartuchos de 120 Mbytes.

Una característica adicional del sistema en su conjunto, que se deriva de su relación con sistemas PC, es la posibilidad de desarrollar programas muy complejos para la operación de la boya. Es posible almacenar múltiples programas en el sistema integral de EPROM de que se dispone y ejecutarlos bajo demanda.

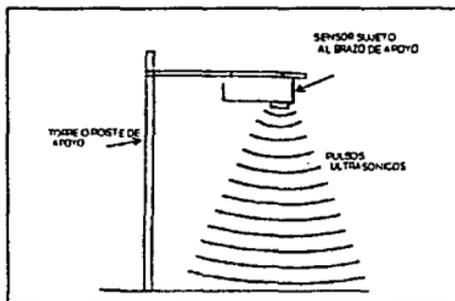
Los sistemas desarrollados por IMET, para terminar, registran los datos meteorológicos originales. Si es necesario, ambos son capaces de muestreos y registros de alta velocidad, al grado de manipular la información proveniente de cualquiera de las redes de telecomunicación existentes en el área de la Meteorología.

## INSTRUMENTOS EN DESARROLLO PARA INCLUSION FUTURA EN SISTEMAS DE OBSERVACION AUTOMATIZADOS DE SUPERFICIE

La automatización de la observaciones de los parámetros críticos en meteorología (presión, temperatura, humedad, etc.) se logró con éxito tras sucesivos intentos que se desarrollaron con especial intensidad a partir de los 1980's. Sin embargo, otras variables menos vitales que, sin embargo, deben observarse, habían quedado hasta los últimos años al margen de dichos esfuerzos y, por ende, incrementando el trabajo de los observadores humanos innecesariamente. Durante 1990, sin embargo, se iniciaron estudios y experimentos para llevar la automatización incluso a esos fenómenos no primordiales. Los instrumentos de este tipo que se describieron durante el Séptimo Symposium Sobre Instrumentación y Observación Meteorológica de la American Meteorological Society (1991) fueron los siguientes:

### PROFUNDIDAD DE NIEVE

Para sustituir el uso de varas de medición de profundidad se desarrolló el Sensor Acústico de Profundidad de Nieve. Sus componentes principales son un transductor de ultrasonido (de Polaroid) y un módulo de extensión de sonar de Texas Instruments. Un microprocesador calcula la distancia del sensor a la superficie de la nieve cronometrando el recorrido de un pulso acústico del transductor a la nieve y de regreso, incluyendo el factor de corrección adecuado para compensar los efectos de la temperatura del aire (lo cual implica la existencia de un sensor de temperatura a la altura del receptor,

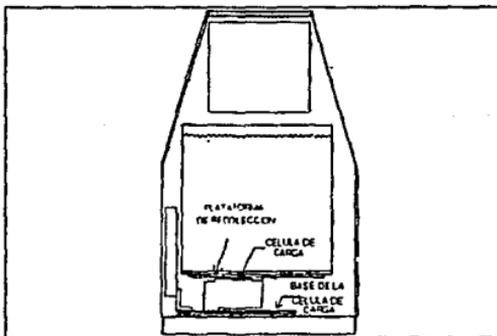


Ilustr. XIV-10 Sensor de profundidad de nieve.

El diseño físico es muy simple: una caja aloja al transductor, al módulo sonar y al microprocesador y está sujeta a un brazo vertical de modo que el transductor apunte al suelo. El transductor de temperatura es de estado sólido y está encajado en un escudo exterior plano en la porción inferior de la caja. Para determinar el origen (o estado de no-nieve) la distancia entre el sensor y el suelo se mide manualmente y se introduce en éste como un número decimal de tres dígitos. El sensor, por cierto, es un instrumento interactivo que puede ser activado en secuencia con otros instrumentos desde un sistema remoto de adquisición de datos. La salida del instrumento es un tren de pulsos donde 1 pulso = 1 mm de nieve, habiendo ajustado previamente este valor de acuerdo con una tabla de temperatura del aire-velocidad del sonido presente en memoria.

#### SENSOR DE AGUA EQUIVALENTE DE PRECIPITACION CONGELADA (FROZEN PRECIPITATION WATER EQUIVALENT SENSOR -FPWES-)

Actualmente, la lectura de agua equivalente de precipitación helada se realiza capturando una porción de granizo o nieve y dejándola derretirse, para medir luego la cantidad de agua resultante del proceso. El FPWES acumula la precipitación helada en un contenedor en el fondo del captador externo (un pluviómetro más o menos común), en el cual hay además un



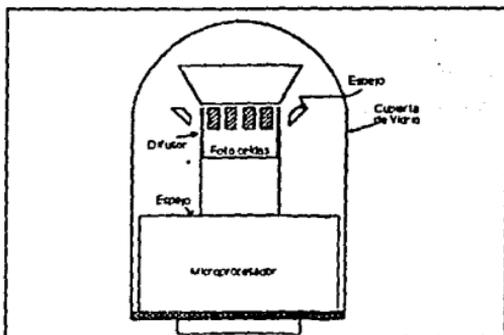
Ilustr. XIV-11 Sensor de agua equivalente de precipitación congelada.

volumen de una solución de glicol de etileno o una mezcla de glicol y metanol para disolver la precipitación sólida y prevenir el congelamiento del contenido captado. La cantidad de "anticongelante" depende de la precipitación esperada y de la temperatura mínima prevista. Una capa de aceite flotando sobre la solución ayuda a prevenir la evaporación de ésta. La medición se realiza pesando la precipitación acumulada con celdas de carga. El instrumento

está manufacturado para captar precipitaciones máximas de 30 pulgadas (aprox. 75 cm) y tiene una resolución de 0.01 pulgadas (0.025 cm).

### INTERRUPTOR DE LUZ DE SOL

Este instrumento, que mide la duración de la luz de día, está constituido por un racimo de ocho celdas solares y de una serie de espejos que, en equipo con un difusor, logran que cada celda responda consistentemente a iluminaciones de ente 30 y 72° respecto a la horizontal. La información que producen las celdas es manipulada por un microprocesador para re-



Ilustr. XIV-12 Interruptor de luz solar.

portar tiempos acumulados de luz de sol. Para comunicarse con el sistema de adquisición de datos a través de una interface RS-232 los reportes son alimentados a través de un convertidor cíclico.

Físicamente, el sensor está encerrado bajo una cubierta sellada de vidrio, excepto por un respiradero en la base. Para prevenir el posible debilitamiento del sello, un pequeño contenedor de desecante se coloca dentro de la cubierta de vidrio, en la parte superior del sensor.

## DETECTOR DE GRANIZADAS

Este sensor, diseñado para discriminar las granizadas de otro tipo de precipitación, realiza su trabajo usando un tablero piezoeléctrico de un pie cuadrado que convierte el impacto de un granizo en una señal eléctrica que es identificada por un microprocesador. El instrumento completo está alojado en una caja de acero inoxidable a prueba de agua, de aproximadamente 1.25 pies cuadrados de área y un pie de altura, incluyendo el transductor. La salida digital consiste en el número de impactos de granizo recibidos y su distribución en grupos de piedras pequeñas, medianas o grandes a lo largo de cada minuto de granizada. Los granizos pequeños tienen diámetros entre 0.1 y 0.25 pulgadas, los medianos entre 0.25 y 1 pulgada y los grandes miden más de 1 pulgada.

## SENSOR INFRARROJO DE AGUA/BIOXIDO DE CARBONO CON FIBRA OPTICA

Los estudios micrometeorológicos han utilizado con amplitud y desde hace tiempo la información relativa a los flujos de calor y de vapor de agua entre el suelo y la atmósfera y entre ésta y las masas de agua, de manera que los instrumentos que permiten la medición de dichos factores se han desarrollado en concordancia con la necesidad. El intercambio de gases entre la tierra cubierta de vegetación y la atmósfera, en cambio, había recibido poca atención y, cuando la recibía, estaba dirigida a analizar la respuesta de los vegetales a los factores externos, como la radiación y los flujos de  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, en los últimos años ha tomado especial interés el conocimiento acerca de cómo las plantas absorben o liberan cantidades de gases y, en este caso, las lecturas simultáneas de flujos de bióxido de carbono y vapor de agua son indicadores valiosos.

La manera obvia de combinar la observación de ambos compuestos es usar un sensor infrarrojo que alterne entre las dos bandas de absorción, y esa era la arquitectura del único sistema comercial disponible para las lecturas simultáneas de vapor de agua y bióxido de carbono en 1991. En ese año, sin embargo, se presentó ante la AMS (American Met. Soc.) un sensor de  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ , también infrarrojo pero construido usando fibras ópticas. La fibra

permite la separación entre las partes ópticas principales y el volumen bajo prueba minimizando la posible distorsión por transmisión.

En el instrumento se utiliza una lámpara comercial cuya luz es enfocada sobre una "rueda de cuchillas" (chopper wheel) de donde pasa a una fibra óptica de 2.5 m que la transporta a una celda de medición abierta de 30 cm de longitud. En el otro extremo de la celda la luz es reenfocada dentro de una segunda fibra que la lleva a una porción diferente de la rueda, en la que hay montados filtros de interferencia óptica. La luz filtrada, finalmente, es enfocada sobre un detector. La señal entra a un tablero electrónico analógico donde se separan las componentes de alta y baja frecuencia. Luego, sigue un tablero digital que muestrea la señal y genera una salida serial que refleja las intensidades de luz en las fibras ópticas respectivas. Se utilizan dos filtros para medir el vapor de agua: uno dentro de una banda de absorción y el otro precisamente fuera de ella, que sirve como referencia. Relacionando las dos señales se consigue una lectura de la concentración de vapor de agua. El mismo procedimiento se aplica al bióxido de carbono. La relación entre los radios de dos filtros cercanos y la concentración debe calibrarse empíricamente. Deben utilizarse longitudes de onda de referencia para compensar desviaciones debidas a impurezas en la óptica externa, corrimiento de la lámpara o del detector, etcétera. La lámpara, por cierto, debería emitir radiación entre 2.3 micras (banda de absorción del agua) y 4.2 micras (banda de absorción del  $\text{CO}_2$ ). No todas la lámparas comerciales emiten con suficiente intensidad en esas bandas, de modo que debe cuidarse ese detalle.

La "rueda de cuchillas", como se comentó arriba, tiene un propósito doble: "rebanar" (muestrear) la luz en su sección exterior, que tiene 125 agujeros de 0.75 mm de diámetro y gira a 60 rps, y la sección interior, con cuatro filtros de interferencia y un espejo. El muestreo de la radiación permite una mayor capacidad de discriminación y una eficiencia mayor en el detector. Los filtros de interferencia están situados en 2.3 micras (referencia para vapor de agua), 2.6 micras (absorción en vapor de agua), 3.9 micras (referencia de  $\text{CO}_2$ ) y 4.2 micras (absorción en  $\text{CO}_2$ ). Tienen una banda de paso típica de 0.1 micras y miden 12.7 mm de diámetro por 3.3 de grosor.

**TERMOMETRO DE CRISTAL DE CUARZO CON FIBRA OPTICA**

Si bien los termómetros de resistencia de platino (conocido como RTD por sus siglas en inglés) y los termopares que se han utilizado en los estudios de flujo de calor cerca de la superficie han funcionado siempre apropiadamente dentro de las especificaciones de la micrometeorología, cubriendo las necesidades de velocidad de respuesta, confiabilidad y resolución, lo cierto es que ambos tipos de dispositivos son incómodamente sensibles a la interferencia electromagnética (que puede provocar corrientes inducidas que afecten las lecturas realizadas), además de pequeñas dificultades relacionadas con el autocalentamiento y el correspondiente falseamiento de los datos. Los termómetros de cuarzo, por otro lado, están libres de esa clase de problemas y, además, conservan la precisión y confiabilidad de los anteriores.

La termometría en cuarzo consiste, básicamente, en monitorear la frecuencia de un oscilador estabilizado por cristal. Tras un tratamiento adecuado, el oscilador presentará su frecuencia de resonancia como una función bien caracterizada de la temperatura. Aprovechando esta característica, se diseñó un sistema de termometría capaz de realizar mediciones sobre un conjunto de puntos ampliamente dispersos, en el cual el sensor se conecta vía fibra óptica con un instrumento de adquisición y procesamiento de datos. La señal obtenida por el receptor del sistema de adquisición es manipulada por un microprocesador y transmitida vía RS-232 a una computadora huésped. La resolución de temperatura y el ancho de banda de medición del sistema pueden ser elegidos entre 0.003 °C y 0.4 Hz y 0.03 °C y 4 Hz, respectivamente. El cristal sensor está contenido en una cápsula protectora de 2 mm de diámetro y 6 mm de largo. La longitud máxima de transmisión a través de la fibra óptica es de 1 km.

## HIGROMETROS DE RESPUESTA RAPIDA (PARA MEDIDAS DE FLUCTUACIONES DE HUMEDAD)

Conocer el comportamiento del flujo de calor entre la atmósfera y la superficie, como se ha comentado más de una vez de manera más o menos explícita, es un factor importante en la determinación de las condiciones de tiempo atmosférico a corto plazo y climáticas a largo. Dentro de ese estudio, se requiere conocer las fluctuaciones que la humedad atmosférica presenta, y es necesario que el instrumento utilizado en la medición de esas variaciones de humedad responda rápida y confiablemente.

Varias tecnologías se han desarrollado con el propósito descrito. El higrómetro Lyman-alpha es el más simple y el más común de los utilizados actualmente en esta clase de sistemas. Mide la absorción de radiación UV por el vapor de agua y tiene una rapidez de respuesta muy adecuada, pero la ruta que la radiación recorre debe ser muy corta (aprox. 1 cm) y esa limitante provoca inconsistencias en el cálculo de los parámetros de interés. Además, esta clase de higrómetros requieren de mantenimiento constante debido a los corrimientos en la calibración provocados por el desgaste de la fuente de radiación y la degradación de la ventana de observación.

Los higrómetros infrarrojos, por otro lado, detectan la humedad a través de mediciones de transmitancia infrarroja a lo largo de una ruta abierta. Los primeros instrumentos de este tipo utilizaban una fuente de radiación de frecuencia única, pero los problemas presentados con corrimientos en la calibración llevaron a utilizar un método diferencial, que requiere de radiaciones de dos longitudes de onda distintas: una localizada en la región de alta absorción en vapor de agua y otra en que dicha absorción es despreciable. A pesar de su eficacia, sin embargo, y dada su complejidad, los higrómetros infrarrojos suelen ser corpulentos y asimétricos, los que provoca distorsiones en el flujo de aire durante las mediciones. Un tipo especial de éstos, sin embargo, llamado M100, fue diseñado a finales de 1990 específicamente para las mediciones de respuesta rápida de humedad requeridas en el modelado de las fluctuaciones y de los flujos de calor. El sensor ha sido pensado para

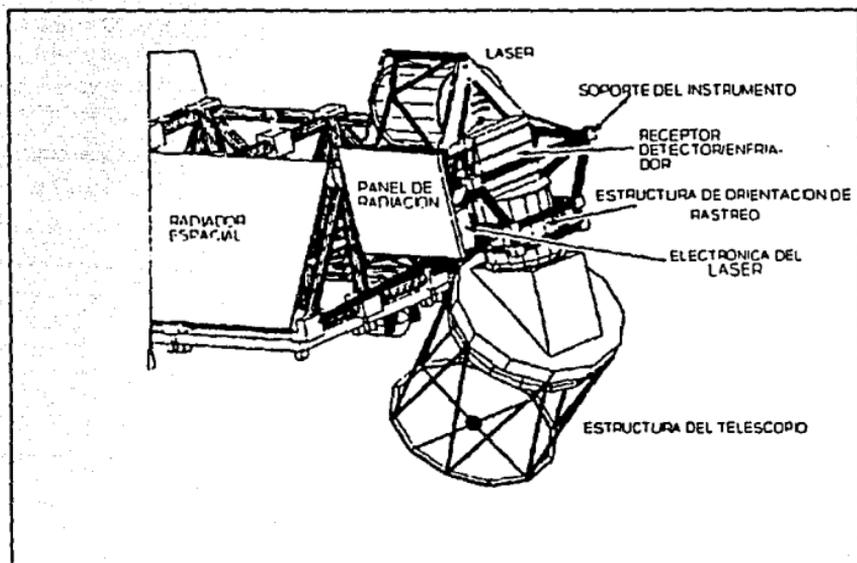
minimizar la distorsión, que puede afectar la precisión de las mediciones, de los volúmenes de aire bajo prueba. Esto se logró montando los circuitos electrónicos no esenciales al sensor en una caja que se puede colocar fuera del área de prueba. Además, el sensor es simétrico verticalmente y no presenta obstrucciones al flujo del aire sobre un arco de 300°, de modo que no provoca distorsiones en él. Esta configuración y la ruta de 15 cm entre los emisores y receptores lo hacen muy conveniente para la medición directa de flujos de vapor de agua.

#### **SONDA LASER DE VIENTO ATMOSFERICO (LASER ATMOSPHERIC WIND SOUNDER -LAWS-)**

La sonda láser de viento atmosférico (LAWS) es un instrumento diseñado para medir vientos a escala global desde el espacio. Los objetivos de su implementación son diversos, e incluyen diagnósticos más eficientes de la dinámica climática global, predicción numérica del tiempo atmosférico mejorada y una mayor comprensión de los ciclos bioquímicos e hidrológicos.

Ya se comentó que LAWS es un sistema planeado para operar desde el espacio, y de hecho está dirigido a instalarse en plataformas espaciales tipo EOS (Earth Observing System, un programa en el que están envueltos las agencias espaciales europea y japonesa) las cuales están en una etapa muy temprana de diseño. A pesar de ello, el diseño de LAWS está listo y es posible proponer las características de su ensamble con la plataforma espacial. Este ensamble, evidentemente, incluye un módulo de soporte, un disipador de calor, un acondicionador de potencia y el correspondiente sistema de control. El instrumento en sí consta de tres subsistemas principales: el subsistema láser, el óptico y el receptor.

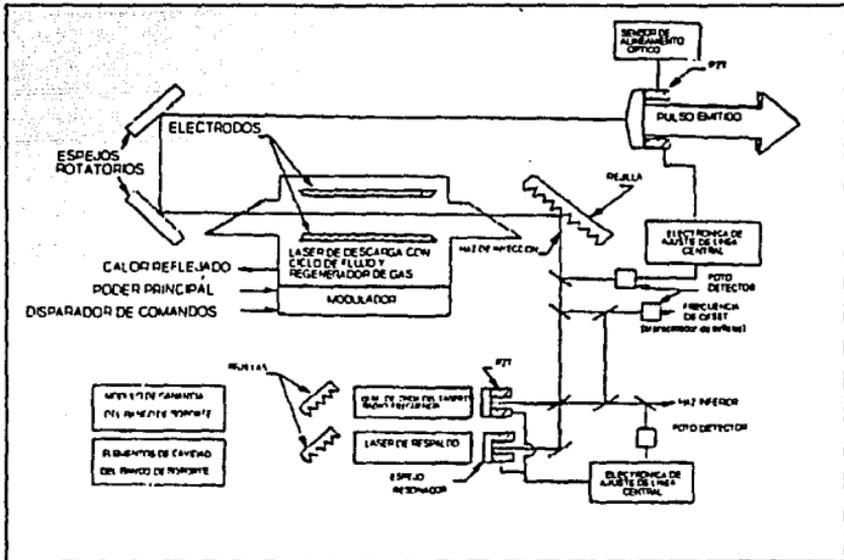
El subsistema del láser está preparado para generar y controlar la frecuencia de dos haces láser de CO<sub>2</sub>, uno para transmisión y el otro de referencia. El láser de transmisión genera un tren continuo de pulsos de tres microsegundos que es transmitido al sistema



Ilustr. XIV-13 Sonda Láser de Viento Atmosférico.

óptico para enviarlo a tierra. La tabla siguiente sintetiza los requerimientos para el subsistema completo:

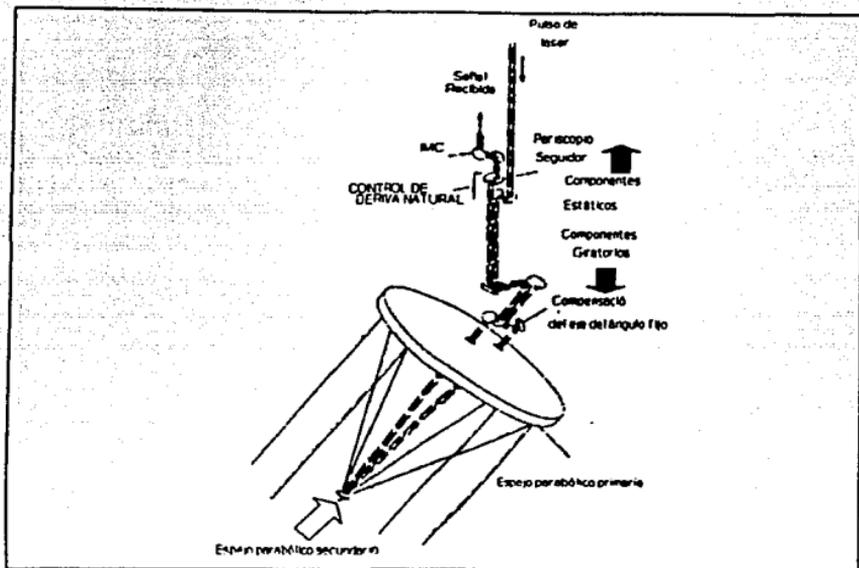
Subsistema de láser	
Longitud de onda	9.11 micras
Energía por pulso	10 joules
Peso	120 kg
potencia	2 kW promedio
Vida útil	10 <sup>9</sup> disparos
Calidad del haz	limitada difracción cercana



Ilustr. XIV-14 Diagrama esquemático del sistema láser de LAWS.

El subsistema óptico es fundamentalmente un conjunto de espejos que conducen el haz de transmisión generado por el subsistema láser hasta el sistema de transmisión propiamente dicho, que está compuesto por dos espejos parabólicos y cofocales.

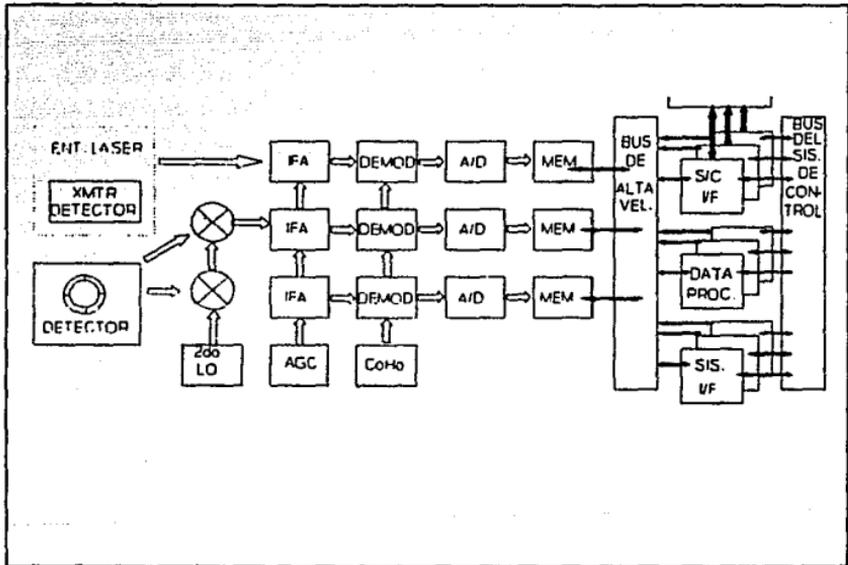
El subsistema receptor consiste en un elemento detector, un preamplificador, un arreglo disipador de calor, electrónica intermedia, un procesador Doppler, un controlador de recepción y una fuente de poder. El receptor funciona como un detector heterodino en longitudes de onda de 9.11 micras y con una banda Doppler de  $\pm 241$  GHz. El elemento detector es un fotomezclador de mercurio-cadmio-telurido que es enfriado hasta 77°K. Los corrimientos Doppler provocados por el movimiento de la plataforma espacial se eliminan mezclando la



Ilustr. XIV-15 Sistema óptico del sistema LAWS

señal recibida por el detector con la generada por un oscilador local de frecuencia fija. La electrónica intermedia amplifica y filtra la señal, apresura la conversión A/D y almacena la señal para su uso en el procesador Doppler. Las características de este subsistema son:

Subsistema de recepción	
Detector	Detector simple optimizado con elementos de alineación
Procesador Doppler	A bordo para soportar el control de disparo
Peso	Menor que 40 kg
Tasa de transmisión	1.5 - 6 Mbps
Potencia	Menor que 300 W



Ilustr. XIV-16 Diagrama de bloques de la electrónica del receptor

## EL PERFILADOR ATMOSFÉRICO PARA GEOPLATAFORMA (GAP)

El perfilador atmosférico (GAP) está siendo diseñado por la NASA como un elemento de la Geoplataforma, el componente geoestacionario de su Sistema de Observación Terrestre para la investigación del cambio global. Muchas de sus aplicaciones tomarán ventaja de las capacidades provistas por una plataforma geoestacionaria, especialmente de algunas facilidades de observación no disponibles en órbitas más bajas, como:

- Observación diurna detallada.

- Sensibilidad a los grados de mezcla de gases cercanos a la superficie debidos a la variación de la temperatura en la misma.
- Perfiles verticales de resolución mejorada.
- Lecturas de vientos y generación de imágenes y animaciones de movimientos de gases.

Como instrumento de aplicación en satélites, el GAP está fundado en dispositivos radiométricos. Así, la configuración general emplea un interferómetro simple de espejo plano Michelson detrás de un telescopio de 60 cm con rastreo de dos ejes. Este rastreo incluye la capacidad de programar el tamaño de los pasos, lo que permite optimizar las tasas de cobertura para algunas aplicaciones.

Tras el interferómetro, el haz recibido es dividido en bandas espectrales y enfocado sobre arreglos de 3x3 detectores que proveen nueve campos circulares de vista de 10 km de diámetro en patrones cuadrados con espaciamientos de centro a centro de 16.6 km.

Las características espectrales, espaciales y radiométricas del GAP se sintetizan en la siguiente tabla, junto con alguna información básica sobre los instrumentos que los conforman:

**RANGO ESPECTRAL Y RESOLUCION (1/cm)**

**Bandas anchas**

Banda 1	620 - 1000
Banda 2	1000 - 1111
Banda 3	1111 - 1700
Banda 4	1700 - 2350
Banda 5	2350 - 2700

**Bandas estrechas**

15 $\mu\text{m}$ CO <sub>2</sub>	620 - 1000
Ozono	1000 - 1080
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O	1240 - 1360
CO	2060 - 2220
4.2 $\mu\text{m}$ CO <sub>2</sub>	2380 - 2393

**CAMPO DE VISTA (CDV)**

Arreglos de detectores 3 x 3  
Diámetro de CDV simple 10 km, 280  $\mu$ r  
Distancias centro-centro 16.6 km, 465  $\mu$ r

**TELESCOPIO**

Paraboloide, 60 cm de diámetro

**INTERFEROMETRO**

Haz de 2", espejo plano autoalineado Michelson

**DETECTORES**

Arreglos de 3x3 de PV o PCHgCdTe

**CAPACIDAD DE CALIBRACION**

reproducibilidad 0.1°C , 1°C absoluta

**CAPACIDAD DE COBERTURA ESPACIAL**

3000 x 3000 km/hr

No

Exista

Pagina

## **XV.- APLICACIONES DE LA METEOROLOGIA**

Las aplicaciones de la Meteorología en los diversos elementos que constituyen nuestra forma de vida se han ido haciendo evidentes en cierta medida conforme este trabajo se ha desarrollado. La importancia de un conocimiento aceptable de la dinámica atmosférica y la consecuente posibilidad de prever sus manifestaciones favorables y adversas se manifiesta cada vez que se deben tomar decisiones económicas a casi cualquier nivel, cuando se pretende salvar vidas y cuando se quiere aprovechar a la naturaleza en conjunto.

Lo que sigue, entonces, no es más que un "rizar el rizo" que sólo pretende puntualizar lo que se ha implicado quizá más de una vez.

### **APLICACIONES**

La predicción del tiempo es el ejemplo más común de que se dispone en cuanto a aplicaciones de la meteorología y, de hecho, es la aplicación por excelencia, de la que en buena medida se derivan casi todas las demás. Referirse a la planeación de actividades y la toma de decisiones en base al clima supone que éste se conoce con anticipación, lo mismo si se trata de un día de campo que de la construcción de una presa gigantesca.

El conocimiento acumulado del comportamiento climático y las actuales capacidades de previsión permiten seleccionar áreas para cultivo y crianza con las condiciones óptimas para las especies de que se trate. También para saber que áreas se encuentran con problemas de alguna índole específica, por ejemplo: las plagas que puedan afectar al cultivo. Mediante esta información, se puede llevar a cabo la decisión de la época de siembra y de cosecha más propicia, pronóstico de cosechas, la calidad de los productos agrícolas, en la elección de especímenes animales y agrícolas, en la producción de ganado y en el control de plagas y enfermedades.

La biogenética, por supuesto, ha colaborado importantemente en la consecución de beneficios mayores, ya que al manipular genéticamente semillas de plantas diversas es posible tener una producción muy elevada, o muy resistente a condiciones ambientales adversas, o inmune a plagas. El conocimiento de las condiciones meteorológicas predominantes nos da una mayor garantía de éxito en esta clase de trabajos.

Para la industria es importante disponer de elementos para la toma de decisiones. Por ejemplo, la localización de una bodega para el almacenamiento de productos, o la ubicación de la industria de tal manera que no altere al medio ambiente. Las condiciones atmosféricas, además, establecerán las características de las instalaciones, el tipo de seguridad necesaria (no habrá que precaverse del exceso de humedad en una zona desértica, y en cambio habrá que prever protección contra ventiscas en zonas montañosas) e, incluso, el tipo de productos que tiene sentido en la región.

Estos son sólo algunos ejemplos, pero al respecto hay mucho que decir. En Ingeniería Civil es muy clara la influencia del clima, ya que para la construcción de puentes, carreteras, edificios, etc., el tipo de materiales a usar depende de las características del suelo, la humedad, si es o no zona sísmica, si se encuentra cerca de algún lago o río, si la radiación solar es muy intensa, y si la temperatura es extremosa en algún sentido.

Para la Ingeniería Eléctrica, por otro lado, es importante saber dónde se encuentra un abastecimiento de agua y la frecuencia de precipitaciones para así decidir si se puede poner o no una planta hidroeléctrica. Además las condiciones meteorológicas pueden ser tales que en las líneas de transmisión de energía eléctrica no baste con cierta cantidad de aislantes o que el diseño de los soportes para las mismas líneas deba considerar distancias especiales entre conductores.

El renglón de las comunicaciones es vital, como es fácil entender, ya que sin ellas cualquier país se vería paralizado en cuanto a muchas áreas (importación y exportación de productos por ejemplo), por lo que el tener un buen sistema de comunicaciones es de gran

importancia, así como también el tener la información del comportamiento de las condiciones meteorológicas que se pueden presentar en determinado momento y de esta forma tomar las precauciones necesarias para que la información que se necesite transmitir llegue a su destino en el menor tiempo posible y sin ningún error. En el aspecto de las telecomunicaciones es muy importante conocer de qué manera va a cambiar el clima, ya que se pueden ver interrumpidas por pérdidas de señal al tener que cruzar determinadas zonas con características (por ejemplo de precipitación abundante) que podrían comportarse como un atenuador de la señal transmitida.

En cuestión del tráfico aéreo es importante saber tanto la velocidad del viento, la nubosidad, la temperatura la humedad, etc., de manera tal que para poder controlar los aterrizajes y despegues de aviones y helicópteros es relativamente mas fácil que sin esta información. Para el caso del tráfico marítimo es necesario saber la visibilidad en el entorno, ya que es muy fácil que pueda colisionar algún transporte con otro, ocasionando grandes pérdidas tanto materiales como humanas. En el aspecto terrestre la visibilidad también juega un papel muy importante, ya que debido a las condiciones meteorológicas que en cierta zona se presentan, las indicaciones a los conductores de vehículos es vital, por ejemplo, si es zona de mucha probabilidad de neblina es importante saberlo para así, tomar las precauciones necesarias para evitar algún accidente.

En otro caso, el funcionamiento de plataformas petroleras está relacionado de tal forma con el estado atmosférico, que si las condiciones de la región en donde se piensa poner no son adecuadas, será necesaria la previsión de beneficios enormes para que un estudio serio proponga la instalación en la zona, a pesar del riesgo calculado de perder la maquinaria e incluso algunas vidas.

Y a propósito de perder vidas, las aplicaciones militares de la meteorología también son importantes. Para no extenderse sobre el punto, baste recordar que toda estrategia militar está sustentada sobre el conocimiento de tres elementos: el enemigo, el terreno y el clima.

En el área de prevención de desastres, la capacidad de prever el comportamiento de algún fenómeno atmosférico es vital, ya que gracias a ello es posible prevenir -al menos minimizar- las pérdidas humanas y materiales. Fenómenos como vientos que podrían convertirse en tornados o huracanes, mareas, precipitación pluviual extremadamente alta, etc., son elementos que la meteorología permite conocer.

Pensando en la cantidad de catástrofes que ocurren en la naturaleza, es fácil darse cuenta de la gran ayuda que representa la meteorología. Por ejemplo, los sistemas meteorológicos que se encuentran en el espacio tienen sus sensores apuntando hacia nuestro planeta, y estos sensores proporcionan información acerca de la temperatura de alguna zona en particular; en caso de que en una zona boscosa se detecte un incremento de temperatura por arriba de lo normal, esto sería un indicador de que podría haber un incendio en dicha zona y de esta manera actuar de la manera más eficiente en el menor tiempo. En el caso de huracanes, maremotos etc., el servicio meteorológico también puede prevenir y agilizar con su aviso la toma de las medidas necesarias para la protección de algunas zonas que se podrían encontrar en peligro.

La detección y cuantificación de la cantidad de contaminación que se presenta en determinadas zonas de alguna ciudad es también muy importante, y los instrumentos meteorológicos juegan un papel importante en este aspecto. Se tienen sensores que constantemente están midiendo la cantidad de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y otros compuestos que en grandes cantidades son dañinos para los seres humanos.

Es posible seguir enumerando aplicaciones específicas de la meteorología y sus ramas, pero lo más probable es que las que se agregaran resultarían sólo casos especiales de las comentadas. Además, como ya se anotó, lo cierto es que las aplicaciones surgen de manera casi natural al tratar el tema con alguna amplitud y, por tanto, no tiene objeto alargar la lista explícitamente. La Meteorología nos sirve, y por lo tanto hay que servirla.

## **TERCER TEMA: METEOROLOGIA EN MEXICO**

**La intensidad del viento es directamente  
proporcional al costo del peinado.**

**(Ley de Reynold de la Climatología)**

**Lavar tu automóvil para hacer llover no funciona.**

**(Ley inaplicable)**

**Murphy...**

## XVI.- LA METEOROLOGIA EN MEXICO

La importancia que el tiempo (entiéndase "tiempo atmosférico") y el clima tienen en las actividades del ser humano es enorme, si bien a menudo no se toma consciencia de ella. Enormes cantidades de recursos e incluso la conservación de vidas dependen constantemente de las condiciones atmosféricas, por lo que es indispensable el establecimiento de sistemas de observación de tales condiciones con el propósito último de permitir su previsión y la toma consiguiente de acciones adecuadas.

Esa necesidad se cubre en prácticamente todos los países del mundo a través del establecimiento de servicios nacionales de meteorología y climatología públicos y oficiales que controlan, concentran y analizan la información recogida en diversos puntos de su área geográfica de influencia a fin de establecer las características locales de la actividad atmosférica, pero además tienen la responsabilidad de comunicarse con sus similares de otros países y con los organismos internacionales y mundiales para intercambiar con ellos la información de que cada uno disponga, de modo que las características mundiales de los procesos meteorológicos puedan incluirse en los análisis y previsiones que, por cierto, difícilmente pueden limitarse en base a fronteras políticas.

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CNA), es el organismo público dedicado a proporcionar los servicios que se han comentado. Según la descripción utilizada en los documentos producidos por la misma CNA, se trata de:

*"... una institución operativa cuya actividad se orienta a la producción y difusión rutinaria, periódica y oportuna de información meteorológica de todo tipo y en todas las escalas espaciales y temporales que sea posible obtener con la tecnología disponible"*

(CNA/SMN "Modernización de las Redes de Observación del Servicio Meteorológico Nacional", octubre de 1989).

La periodicidad a que se hace referencia en el párrafo transcrito tiene muchas variantes, lo mismo que el tipo de la información que se proporciona. Se transmiten, por ejemplo,

boletines y avisos virtualmente en tiempo real, y se producen pronósticos, estudios climatológicos e hidroclimatológicos con intervalos que van de horas a meses, años o décadas. Así, es comprensible que la actividad de producción de información meteorológica deba mantenerse 24 horas al día y 365 días al año. Por cierto, tal actividad está basada no sólo en la operación del Sistema Nacional de Observación Meteorológica (SNOM), sino también en el Sistema Regional del Programa de la Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) de la WMO. Este VMM está integrado por múltiples estaciones de observación en la región meteorológica a la que México pertenece y que comprende a Alaska, Canadá, Estados Unidos, México y los países centroamericanos y del Caribe.

### **EL SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL**

Ya se anotó que la información básica acerca de los parámetros atmosféricos dentro del área geográfica nacional se obtiene de parte del SNOM, el cual está constituido por estaciones de observación de diversos tipos y propósitos instaladas por todo el país. En cierto sentido, el SNOM es el instrumento de medición del SMN, y su operación necesariamente debe ser sincrónica, así como uniforme en lo referente a la calidad y la cantidad de los datos medidos.

El uso que se le dará a la información recogida en las estaciones que constituyen al SNOM determina su modo de concentración. En particular, para la elaboración de pronósticos de corto y mediano plazo se requiere conocer los datos obtenidos cada tres horas en la red sinóptica básica de superficie (observatorios de superficie) y cada doce horas los de la red sinóptica básica de altura (estaciones de radiosondeo). Con tal fin se estableció el Sistema Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas (SNTM) a través del cual se concentran en el Centro Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas (CNTM) los datos transmitidos por dichas estaciones y, en general por todos los subsistemas integrantes del SNOM. Estos datos concentrados deben, en primer lugar, transmitirse a distintas dependencias e instituciones nacionales a través de enlaces destinados a ello. Además, a través del CNTM se ha establecido y mantenido el enlace con el Sistema Mundial de Telecomunicacio-

nes (SMT) de la WMO, enlace que permite la obtención cotidiana de los datos registrados en las redes de observación de otros países y que son indispensables (como también se había anotado) para la elaboración de todos los pronósticos meteorológicos necesarios en el país. A cambio, México contribuye con la WMO poniendo a disposición de los países integrantes su propia información meteorológica básica oportunamente y apeándose a las normas internacionales de calidad y formato. Ese compromiso implica la retransmisión de los datos nacionales en lapsos no mayores que treinta minutos a partir del momento de la observación hacia el Centro Meteorológico Mundial (CMM) de Washington. Esta velocidad de captación y concentración de información se hace necesaria cuando se pretende realizar una síntesis descriptiva del estado actual de la atmósfera que, junto con la información obtenida de las imágenes de satélite y la generada a través de la aplicación de modelos de pronóstico numérico, será utilizada en la elaboración de los pronósticos del tiempo que deben difundirse masivamente por diversos medios y proporcionados a múltiples instituciones públicas y privadas que incluyen las Gerencias estatales de la CNA, el Sistema Nacional de Protección Civil y los distintos medios de comunicación masiva.

Otro tipo de servicios no requiere de tanta premura en la concentración de la información. Así, los datos orientados a la elaboración de pronósticos en escalas temporales mayores y al estudio climatológico pueden concentrarse en la Ciudad de México a través del correo u otro método análogo de comunicación. Tales datos, así como todo el resto de los obtenidos por todos los medios al alcance del SMN pasan a formar parte del BNDC (Banco Nacional de Datos Climatológicos), el que constituye el archivo más importante del país en cuanto se refiere a información climatológica y que sirve de base para todos los estudios que se realizan acerca de las características meteorológicas de México. Además, como parte de la explotación del BNDC, el SMN elabora rutinariamente boletines y resúmenes, así como pronósticos a largo plazo de las condiciones atmosféricas, todo lo cual es distribuido también a las gerencias de la CNA y a múltiples usuarios en los sectores público y privado.

## LA INFRAESTRUCTURA DEL SMN: SNOM

La infraestructura de observación del Servicio Nacional de Observación Meteorológica está constituida (1989) por:

- 77 estaciones sinópticas de superficie.
- 11 estaciones de radiosondeo.
- 9 estaciones climatológicas principales.
- 365 estaciones climatológicas ordinarias.
- 5 estaciones de radar meteorológico.
- 1 sistema portátil de radiosondeo.

Las 77 estaciones de superficie y las 11 estaciones de radiosondeo constituyen la red sinóptica básica del SMN, la que tiene la misión de obtener información para la elaboración de todos los trabajos de previsión del tiempo en el Servicio, así como en instituciones como la Secretaría de la Defensa Nacional, la Secretaría de Marina y la Dirección de Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano.

En los observatorios (estaciones de superficie) se realiza una observación cada hora, de las que se transmiten al CNTM las correspondientes a las 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 y 21 horas. En las estaciones de radiosondeo se realiza un lanzamiento cada 12 horas (a las 06 y las 18, hora del centro) y sus datos se transmiten al CNTM usando formatos y códigos establecidos a través de la WMO.

Las demás instalaciones de observación listadas arriba no proporcionan actualmente información en tiempo real. La aplicación de los datos obtenidos con los radares meteorológicos es de carácter local hasta ahora y son utilizados para la detección y seguimiento de huracanes y tormentas severas, así como para pronóstico a muy corto plazo.

En cuanto a las estaciones climatológicas, la información que se obtiene de ellas se concentra mensualmente en el SMN y pasa al BNDC, donde es utilizada posteriormente para la elaboración de los estudios y análisis que se realizan en el propio Servicio.

Debe comentarse que, si bien el SNOM debiera incluir instalaciones dedicadas a la medición de radiación solar y estaciones agro e hidrometeorológicas que permitieran obtener información más detallada acerca de los fenómenos meteorológicos que influyen en la producción agrícola y en la operación de las obras hidráulicas, lo cierto es que actualmente el Servicio no cuenta con ellas. Sin embargo, cuando se trate de los proyectos de modernización del SMN, se hará referencia a la instalación de estaciones piloto con estas características.

#### **INFRAESTRUCTURA: SNTM**

El Sistema Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas, como ya se comentó, constituye el medio a través del cual se concentra en la Ciudad de México la información producida por las estaciones integrantes de la red sinóptica básica, al tiempo que constituye el enlace del SMN con el Centro Meteorológico Mundial de Washington. La operación de este sistema puede dividirse en las siguientes fases:

- 1) Concentración de datos.
- 2) Difusión nacional de datos.
- 3) Comunicaciones México-Washington.
- 4) Recepción de la información de satélite meteorológico.
- 5) Recepción y difusión de información meteorológica gráfica.

Los subsistemas de concentración y difusión nacional, así como el canal México-Washington, están integrados en la estación de radio XBA del SMN, la que opera 24 horas los 365 días del año. Los dos sistemas restantes están incluidos dentro de una estación terrena que, al igual que la XBA, trabaja ininterrumpidamente. Hasta ahora, la concentración de los datos registrados en la red sinóptica se realiza utilizando radios de banda lateral única (BLU) instalados en todos los observatorios sinópticos de la red, con excepción de los localizados en alguno de los siete subcentros de recolección existentes, ya que los datos registrados son transmitidos de todas formas a alguno de ellos. Los subcentros en operación actualmente están situados en Chihuahua, Monterrey, Mazatlán, Veracruz, Acapulco,

Tapachula y Mérida, de donde la información es retransmitida al Distrito Federal a través de línea telefónica, radio, télex o telégrafo. Los mismos medios son utilizados para la difusión en tiempo real de esos mismos datos, con el agregado de radios de banda lateral de alta potencia, a través de los cuales se transmiten los boletines meteorológicos en código Morse. La información gráfica nacional generada en el Servicio se transmite a Veracruz, Mazatlán, Torreón, Secretaría de la Defensa Nacional, UNAM y SENEAM usando líneas telefónicas dedicadas para la transmisión de esta información en formato analógico. Para ello, evidentemente, se cuenta con un transmisor apropiado que también es utilizado en la difusión de las imágenes recibidas de satélite.

En cuanto a las comunicaciones con el CMM de Washington, éstas se iniciaron el 20 de octubre de 1988 recibiendo los datos meteorológicos básicos concentrados en el Centro a través de un enlace de comunicaciones vía satélite, y a partir del 1º de noviembre del mismo año comenzó la transmisión de los datos nacionales utilizando el servicio INFOSAT de la SCT, el cual utiliza al satélite Morelos I para la retransmisión. La recepción de información gráfica procedente del CMM (cartas, diagramas, fotos) se recibe a través del circuito DIFAX, un sistema de transmisión digital.

La recepción de imágenes de satélite está establecida a través de una estación terrena (operada por el SMN) en la que se reciben continuamente las imágenes directas de los satélites geoestacionarios GOES (ver el apartado dedicado a satélites), las cuales son impresas y distribuidas a diversos usuarios. Adicionalmente, la información recibida en forma de imágenes es procesada en diferentes formas y utilizada para la elaboración de los distintos pronósticos del tiempo que se realizan en el SMN.

## **CENTRO NACIONAL DE PREVISION DEL TIEMPO**

Esta es, como su nombre indica, la unidad del SMN responsable de analizar la información meteorológica básica a escala nacional para elaborar los pronósticos de tiempo a corto y mediano plazo, así como los avisos de perturbaciones tropicales y de tiempo seve-

## CONTINUACION Y AMPLIACION DE LA MODERNIZACION DEL SMN

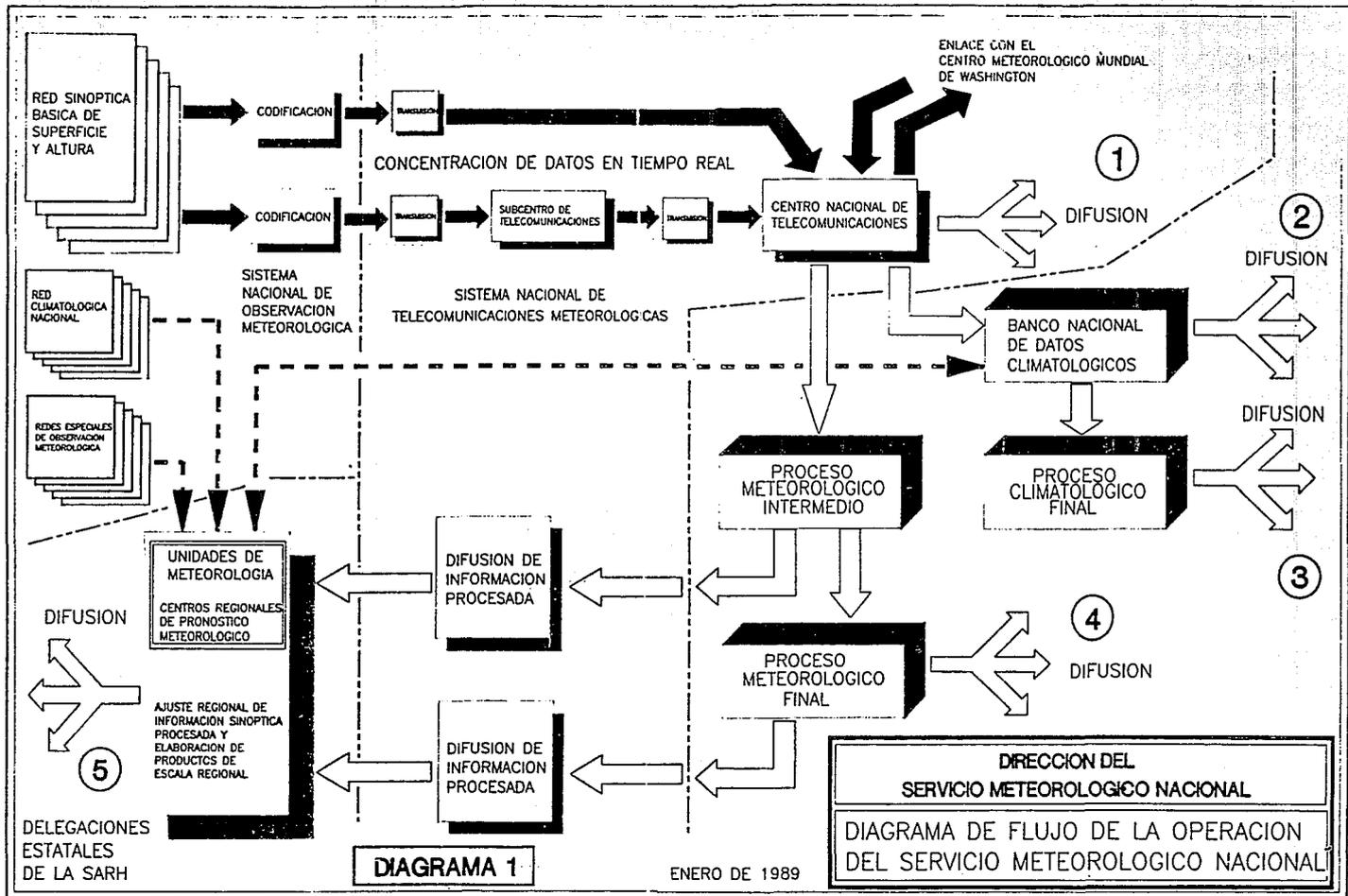
Previstos para el período 1990-94 se tienen diversos proyectos de ampliación y mejora para todas las instalaciones del SMN en el país. Así, se contempla:

- a) Modernizar el instrumental y las comunicaciones de las 77 estaciones sinópticas de superficie, introduciendo equipo meteorológico electrónico de registro automático.
- b) Ampliar la red sinóptica básica de superficie a 103 estaciones para obtener datos que permitan una adecuada cobertura nacional.
- c) Modernizar la red de estaciones de radiosondeo y ampliarla hasta 17 estaciones con el objeto de obtener información de la atmósfera superior suficiente para mejorar la cobertura del país.
- d) Consolidar la modernización de los sistemas de proceso de datos, tanto históricos como capturados en tiempo real, mediante la adquisición del equipo de cómputo complementario.
- e) Adquirir equipo de telecomunicaciones y de proceso de datos para establecer ocho centros regionales de pronóstico meteorológico.
- f) Adquirir y poner en operación equipo para la recepción de imágenes de satélite de alta resolución y de datos sobre la estructura vertical de la atmósfera provenientes de satélites meteorológicos de órbita polar, con el objeto de contar con información más frecuente y complementaria de la que se obtiene en la red de estaciones de radiosondeo. De hecho, en 1990-91 se adquirió y puso en operación la estación terrena necesaria para la recepción y procesamiento de tal información.
- g) Modernizar y ampliar la red de radares meteorológicos, estableciendo una red básica de 11 estaciones, incluyendo equipo para la concentración y proceso digital de los datos de todas las estaciones. Además, se pretende habilitar a estas estaciones para cuantificar la intensidad de lluvia dentro de su radio de

cobertura y aplicar la información obtenida para pronósticos a muy corto plazo y pronóstico hidrológico en colaboración con la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos.

- h) Modernizar y ampliar la red básica de estaciones climatológicas instalando 500 estaciones de registro automático de datos.

De manera somera, además, puede hablarse de toda una serie de acciones actualmente realizadas, en proceso de realización o por realizar, cuya tendencia es evidentemente la agilización del servicio que el Meteorológico presta. Así, por ejemplo, a partir de 1989 se trabaja en la integración de modelos numéricos de escala sinóptica y media, en colaboración con los centros de investigación; se está trabajando para mejorar la difusión operativa de información meteorológica gráfica para la navegación marítima; se está trabajando para establecer enlaces bidireccionales para transmitir información meteorológica gráfica México-Guatemala y México-Cuba como parte de lo estipulado en el plan regional de Telecomunicaciones de la WMO, se pretende descentralizar la captura y el procesamiento de datos meteorológicos a través de la ampliación de la Red de Centros Regionales de Pronóstico y habilitando a las Gerencias Regionales y Estatales para la realización de estudios climatológicos y para fungir como centros regionales de consulta. Acciones similares, por otro lado, se tienen previstas para los años de 1992 en adelante, y éstas incluyen la instalación de una red meteorológica de mesoescala para el Valle de México y sus alrededores así como las redes del mismo tipo que sean necesarias en otras zonas del país; se planea establecer el Laboratorio de Instrumental Meteorológico como una entidad nacional de referencia instrumental para todo tipo de sensores de variables atmosféricas, dotándolo del personal y los patrones necesarios y, finalmente, se planea la integración de la Red Agrometeorológica Nacional, la que deberá en su momento realizar el pronóstico agrometeorológico para aquellas regiones del país que lo requieran.



NORMAS  
SUPERVISION  
CONTROL

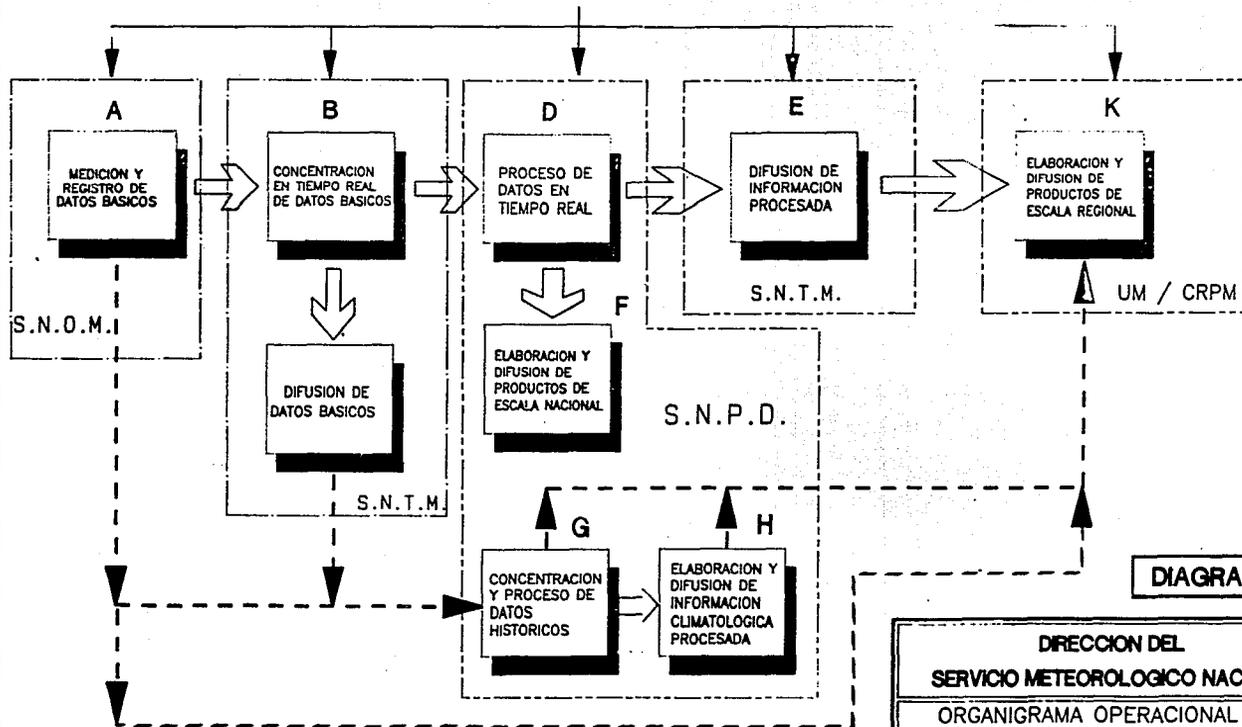


DIAGRAMA 2

DIRECCION DEL  
SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL  
ORGANIGRAMA OPERACIONAL DEL  
SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL

Todas estas acciones, evidentemente, exigen un esfuerzo humano y económico considerable. Las estimaciones de costo del equipo y el material necesarios<sup>1</sup> llevan a la conclusión de que serán necesarios financiamientos que alcancen los treinta millones de dólares únicamente para disponer del equipo indispensable en las etapas vitales de todo el esquema de modernización: la red sinóptica básica de superficie (estaciones sinópticas automáticas de superficie), la red sinóptica básica de altura, la red climatológica básica (estaciones climatológicas automáticas) y la red de radares meteorológicos.

#### ESPECIFICACIONES DE LAS ESTACIONES METEOROLOGICAS AUTOMATICAS PARA LA RED SINOPTICA BASICA DE SUPERFICIE DEL SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL

Deberá tratarse de estaciones meteorológicas automáticas de superficie, para aplicaciones sinópticas, constituidas por:

- Sensor de temperatura (RTD platino) tipo PT100 con las características:

RANGO UTIL	-20 a 60 °C
PRECISION	± 1 °C
RESOLUCION	0.1 °C
SENSIBILIDAD	0.38 Ω/°C

Deberán incluirse tres sensores de este tipo: uno para temperatura al abrigo, uno para temperatura a la intemperie a 10 cm del suelo y otro para temperatura a 30 cm por debajo del suelo.

<sup>1</sup> Las especificaciones técnicas para los equipos a utilizar en las etapas anotadas arriba que se incluyen en el presente trabajo están tomadas, como la mayor parte de la lista de acciones previstas, del documento "Modernización de las Redes de Observación del Servicio Meteorológico Nacional" elaborado en la CNA, Subdirección General de Administración del Agua, Subgerencia del SMN, en octubre de 1989.

- Sensor de humedad relativa de capacitancia variable:

RANGO	0 -- 100 % HR
TEMPERATURA DE OPERACION	-10 a 60 °C
RESOLUCION	1 %
PRECISION	± 2 %
LINEALIDAD	± 1 % HR

- Sensor de radiación solar tipo piranómetro; con termopila de placa negra y con doble domo de cristal óptico tipo Schott K5:

IRRADIACION	0 - 1000 W/m <sup>2</sup>
ESTABILIDAD ANUAL	± 1 % de escala máxima
SENSIBILIDAD	4.0 μV/W-m <sup>2</sup>
VELOCIDAD DE RESPUESTA	99 % en menos de 25 s
RANGO ESPECTRAL	335 2200 nm

- Sensor de precipitación de balancín o cubetas basculantes:

SUPERFICIE DE CAPTACION	400 cm <sup>2</sup>
SENSIBILIDAD	0.1 mm por basculación

- Sensor de velocidad de viento (anemómetro) de copas, construido en acero inoxidable y aluminio anodizado:

TRANSDUCTOR	Fototransistor
RANGO DE LECTURA	0 - 45 m/s
TEMPERATURA DE OPERACION	-40 a 60 °C
UMBRAL	0.3 m/s
PRECISION	1 %

- Sensor de dirección del viento (veleta) de los mismos materiales que el anemómetro:

TRANSDUCTOR	Fototransistores y disco con código Gray. Salida de 6 bits en paralelo
RANGO	0 - 360 grados
UMBRAL	0.3 m/s

- Sensor de presión atmosférica (barómetro) con compensación interna de temperatura:

RANGO DE MEDICION	500 a 1100 hPa (hectopascasles)
RESOLUCION	0.1 hPa
PRECISION	± 0.1 hPa

**- Herrajes y tornillería para el montaje**

de los sensores de viento, radiación solar, temperatura, humedad y presión en una torre de 10 m de altura, de sección triangular (proporcionada por el SMN). Deberá incluirse documentación completa de los sensores, diagramas electrónicos y de construcción, procedimientos de ajuste, mantenimiento y calibración escritos en español o inglés.

**- Sistema de adquisición y proceso de datos**

con capacidad mínima para recibir y procesar señales de 16 sensores meteorológicos, con módulo digital para despliegue de datos y teclado para programación básica de la estación. Debe incluir un puerto serie tipo RS-232 para transmisión de datos por modem. Este sistema deberá realizar una exploración de los sensores cada 30 s, almacenar los datos en su memoria y transmitirlos a la computadora central cuando ésta los solicite.

**- Computadora personal tipo IBM PC/PS2-30 y programas**

para el almacenamiento, análisis, despliegue y codificación de mensajes sinópticos y transmisión de los datos a través de línea telefónica conmutada. Los programas facilitados por el SMN deberán permitir, como mínimo, comunicación en modo continuado o en modo comando de la computadora con el sistema de adquisición, generación de archivos ASCII que contengan información estadística de los sensores (promedios por 10 minutos, máximas y mínimas de temperatura y radiación solar en el mismo período, viento máximo, precipitación acumulada e intensidad máxima -10 minutos-), así como datos de identificación (fecha, hora, tipo de estación, etc.), configuración automática cada tres horas del mensaje sinóptico en el formato SYNOP de la WMO, posibilidad de ingreso manual de datos no medidos o no calculables con validación de entradas y, finalmente, transmisión a través de modem del mensaje sinóptico en modo manual (cuando el operador esté presente y se hayan introducido datos complementarios) o automático (cada tres horas cuando el operador no esté). Se deberá disponer también de toda la documentación relativa al uso, mantenimiento y algoritmos de los programas en uso en la estación. La microcomputadora deberá instalarse a una distancia máxima de 50 m de los sensores de la estación y del sistema de adquisición de datos, que puede quedar en la torre de sensores o en el interior de la estación, junto a la microcomputadora.

- Como respaldo a todo ello, deberá disponerse de unidades de alimentación eléctrica para todo el sistema a través de línea de 127 VCA, 60 Hz, con respaldo de baterías solares y de una unidad UPS.

## CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE OBSERVACION PARA LA RED DE RADIO-SONDEO

Las estaciones de radiosondeo a utilizarse en la red sinóptica básica de altura deberán cumplir con las siguientes funciones:

- Medición totalmente automatizada de presión, temperatura, humedad y viento.
- Decodificación y control de calidad de los datos del radiosondeo.
- Codificación y transmisión automáticas de la información a través de línea telefónica.
- Archivos de datos completos de cada observación y generación automática de resúmenes mensuales.
- Despliegue de datos de radiosondeo en tiempo real a través de una micro-computadora tipo PC en forma tabular y gráfica.
- Impresión de reportes tabulares y de gráficas en un graficador de seis plumas compatible con HP-GL.

Los dispositivos que conformen la estación deberán estar integrados por componentes de estado sólido digitales, incluyendo la radiosonda. Deberá garantizarse la operación de la estación por una sola persona en todas las condiciones de tiempo y la interfase de la computadora con el operador deberá ser totalmente en español. Para la computadora, las especificaciones mínimas son:

- Procesador 80286 a 12 MHz.
- Coprocesador matemático 8087.
- Monitor VGA de 14", color.
- Tarjeta gráfica VGA+.
- Disco duro de 30 Mb.
- Unidad de disco flexible de 360 Kb.
- Unidad de disco flexible de 3.5", 1.44 Mb.
- Dos puertos RS232.

- Puerto paralelo.
- Temperatura de operación: 5 a 40 °C
- Sistema operativo MS-DOS 3.3 o superior.

Para el equipo de radiosondeo, las especificaciones son:

- Radiosonda digital.
- Peso máximo de 280 g (incluyendo batería).
- Totalmente calibrada, lista para lanzamiento sin verificación en tierra.
- Frecuencia: 403 MHz o 1680 MHz (dependiendo del sistema de rastreo que se utilice: OMEGA o radioteodolito).

- Para medición de temperaturas:

RANGO	-90 a 50 °C
RESOLUCION	0.1 °C
PRECISION	± 0.2 °C

- Para presión:

RANGO	5 a 1050 hPa
RESOLUCION	0.1 hPa
PRECISION	± 0.5 hPa

- Para humedad:

RANGO	5 a 100 % HR
RESOLUCION	1 %
PRECISION	± 2 % HR

El sistema deberá estar configurado para su conexión a una línea de alimentación de 90-135 VCA a 58-62 Hz. Deberá incluir una unidad UPS capaz de sostener el sistema por al menos 15 minutos. Se dispondrá también de un lote de refacciones para dos años de operación y de un lote de equipo de prueba y mantenimiento, así como de documentación completa para mantenimiento, calibración y ajustes y diagramas electrónicos de todo el sistema, todo en español.

### **ESPECIFICACIONES PARA LAS ESTACIONES CLIMATOLOGICAS AUTOMATICAS PARA LA RED CLIMATOLOGICA ORDINARIA DEL SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL**

La estación deberá estar constituida por:

- Sistema de adquisición y proceso de datos con capacidad máxima para recibir y procesar información de ocho sensores meteorológicos, con módulo de memoria EEPROM intercambiable con capacidad para almacenar datos de al menos dos meses, con teclado para programación básica de la estación y con un puerto serie RS232. El módulo deberá realizar una exploración de los sensores cada minuto, transformando los valores medidos en valores escalares, resumidos en valores promedio cada quince minutos y almacenados en la memoria EEPROM.
- Unidad de lectura de memoria con formato de comunicaciones RS-232 para conexión con microcomputadoras tipo IBM-PC/PS2 y programas para el almacenamiento, despliegue, análisis y transferencia de información en código ASCII para su integración automática a la base de datos del sistema CLICOM.
- Documentación completa acerca de los algoritmos usados para procesar los datos de los sensores, incluyendo el código de los programas tanto del sistema de adquisición y depuración de datos como los que permiten su recuperación.
- Unidad de alimentación eléctrica para todo el sistema usando celdas solares y baterías recargables selladas de larga duración.

Los sensores que deberán incluirse en la estación son:

- Termómetro RTD de platino, tipo PT100:

RANGO	-20 a 60 °C
RESOLUCION	0.25 °C
PRECISION	± 1 °C
SENSIBILIDAD	0.38 Ω/°C

- Sensor de precipitación de balancín o de cubetas basculantes:

SUPERFICIE DE CAPTACION	400 cm <sup>2</sup>
SENSIBILIDAD	0.5 mm por basculación

- Sensor de velocidad de viento (anemómetro) de copas:

TRANSDUCTOR	Tacómetro de alta frecuencia
RANGO DE LECTURA	0 - 45 m/s
TEMPERATURA DE OPERACION	-40 a 60 °C
UMBRAL	0.3 m/s
PRECISION	1 %

- Sensor de dirección de viento (veleta):

TRANSDUCTOR	Potenciómetro de 5 K $\Omega$
RANGO DE LECTURA	0 - 360 grados
TEMPERATURA DE OPERACION	-40 a 60 °C
UMBRAL	0.3 m/s
PRECISION	2 %

- Herrajes y tornillería para el montaje de los sensores de viento y temperatura y el módulo de adquisición de datos.
- El conjunto de programas para la computadora deberá realizar las siguientes funciones:
  - + Recuperación de datos almacenados en EEPROM.
  - + Generación de archivo ASCII y en unidades técnicas (grados centígrados, milímetros, milímetros/hora, etc.) que contenga la información promedio de cada quince minutos de todos los sensores, las máximas y mínimas de temperatura en el mismo período, precipitación acumulada en quince minutos e intensidad máxima en un minuto y los datos de identificación (fecha, hora, tipo de estación, etc.).
  - + Despliegue de datos en forma de series completas cada quince minutos, resumen diario de datos, resumen mensual y gráficas de las variables atmosféricas medidas.

## ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DE RADAR METEOROLOGICO

Los equipos de radar meteorológico que se integrarán a la red nacional deberán cumplir con las siguientes especificaciones:

### TRANSMISOR

Tipo:	magnetron coaxial de alta duracion.
Potencia pico:	250 Kw (minima).
Frecuencia (ajustable):	5500 - 5650 MHz (banda C).
Duracion del pulso:	2 $\mu$ s (reflectividad). 0.5 - 1.0 $\mu$ s (velocidad).
Frecuencia de repeticion de pulsos (FRP):	250 - 310 pps (reflectividad). 700 - 1200 pps (velocidad).
Rango (minimo):	450 Km (reflectividad). 120Km (velocidad).
Conmutacion T/R:	Duplexer de ferrita con tiempo maximo de recuperacion de 5 $\mu$ s.

### RECEPTOR

Tipo:	Logaritmico (reflectividad). Lineal (velocidad).
Cifra de ruido (max.):	5 dB.
Rango dinamico (minimo):	80 Db.
Frecuencia intermedia:	30 MHz.
Señal minima discernible:	-108 dBm (reflectividad). -114 dBm (velocidad).
Mezclador:	De cristales, coaxial, balanceado.
Oscilador local:	STALO ajustable, con CAF (AFC).

**ANTENA Y PEDESTAL**

Tipo de antena:	Paraboloide circular sólido.
Polarización:	Horizontal, lineal.
Ganancia mínima:	43 dB
Ancho del haz:	Un grado máximo, vertical y horizontalmente, medidos en los puntos de -3 db.
Lóbulos laterales:	No mayores de -25 dB a $\pm 10^\circ$ y no mayores de -30 dB para ángulos mayores de $10^\circ$ .
Frecuencia:	5500 - 5650 MHz.
Tipo de pedestal:	Elevación sobre azimuth.
Control de rotación de azimuth:	Automático ( $360^\circ$ ) y manual.
Velocidad de rotación:	0 - 6 rpm.
Precisión en azimuth:	$\pm 0.2$ grados o mejor.
Movimiento de elevación:	-2 a $90^\circ$ seleccionable en incrementos de 0.2 grados en forma manual. Movimiento automático de 0 a $60^\circ$ a 10 grados/s.
Precisión en elevación:	$\pm 0.2$ grados o mejor.

**RADOMO**

Temperatura ambiente:	-20 a $60^\circ\text{C}$
Pérdidas de transmisión:	Menores que 0.5 Db en un sentido.
Desviación del haz:	Menor que 0.1 grados.

Alteración de los lóbulos laterales:	1.0 a -26 Db.
Velocidad del viento:	250 km/h.
Protección ambiental:	Resistencia total a la corrosión en ambientes marinos.
Color:	Blanco.
Accesorios:	Luces de obstrucción y varilla pararrayos con cable de tierra.

**PROCESO Y DESPLIEGUE DE INFORMACION**

El proceso, análisis y despliegue de la información de radar debe ser enteramente digital, requiriéndose al menos los siguientes productos finales:

- Imágenes CAPPI de niveles seleccionables hasta 15 km con información sobre:
  - a) Reflectividad de los ecos.
  - b) Intensidad de la precipitación (mínimo 6 niveles).
  - c) Velocidad radial de los ecos.
  - d) Turbulencia.
- Imagen en formato PPI de altura máxima de los ecos.
- Imágenes en formato RHI de cortes verticales en cualquier azimuth seleccionado.
- Imágenes en formato PPI de valores máximos horizontales de reflectividad, velocidad radial y turbulencia.

El sistema de proceso y generación de productos deberá estar basado en un equipo de cómputo estándar, de modo que el SMN pueda agregar los módulos de programas que se consideren necesarios. La interfase con el usuario deberá estar totalmente en español y diseñada para su uso por personal sin ninguna experiencia previa en computación.

El sistema de proceso deberá incluir los medios para la transmisión a través de líneas telefónicas dedicadas o de la red conmutada de los productos generados para ser desplegados en terminales remotas. Además, deberá estar configurado para el control remoto del equipo de radar usando, opcionalmente, enlaces de microondas entre el T/R y el sistema de proceso y despliegue de datos.

## **APENDICES**

**No hay tal señal de flover  
como verla caer**

## APENDICE A

### ALCANCE DE LOS FENOMENOS METEOROLOGICOS

Los fenómenos atmosféricos tienen alcances que varían entre los procesos físicos y químicos de escala mínima que dan origen a la formación de partículas nubosas y los procesos dinámicos de escala planetaria asociados con sistemas climáticos completos. Establecer el alcance de cada fenómeno estudiado, tanto en espacio como en tiempo, es importante no sólo en el campo de la previsión de tiempo atmosférico, sino también en la planeación de programas de investigación de campo. La clasificación usual, sin embargo, se refiere primordialmente a la dispersión espacial (la que, por otro lado, tiene una marcada interdependencia con la duración: un fenómeno muy corto seguramente no tendrá tiempo de manifestarse a grandes distancias; un fenómeno que afecte áreas pequeñas no tiene oportunidad de durar ante los grandes sistemas de dinámica atmosférica) y define tres grandes escalas: la macroescala (o escala sinóptica), que aplica a fenómenos con alcance horizontal superior a 1000 km; la mesoescala, que supone alcances horizontales superiores a 1 km; y la microescala, que agrupa procesos con alcances menores a 1 km.

Para especificar más, la macroescala se divide en dos subgrupos ( $\alpha$  y  $\beta$ ), la mesoescala en tres ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\tau$ ) y la microescala en seis ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$ ,  $\delta$ ,  $\xi$ ,  $\eta$ ). La tabla siguiente presenta la distribución completa de las escalas en el espacio y ejemplifica fenómenos típicos y su alcance temporal en cada una:

ESCALA	RANGO ESPA	FENOMENO EJEM	DURACION
macro $\alpha$	> 10,000 km	Variaciones climáticas.	De días hasta años.
macro $\beta$	> 2,000 km	Ondas baroclínicas.	De 1 a 30 días.
meso $\alpha$	> 200 km	Huracanes, frentes.	De 1 a 15 días.
meso $\beta$	> 20 km	Corrientes de chorro nocturnas. Tormentas.	Algunas horas hasta un día.
meso $\tau$	$\geq$ 2 km		De minutos a horas.

INSTRUMENTACION EN METEOROLOGIA

ESCALA	RANGO ESPA	FENOMENO EJEM	DURACION
micro $\alpha$	> 200 m	Tornados.	Hasta una hora.
micro $\beta$	> 20 m	Remolinos de polvo.	De segundos a minutos.
micro $\gamma$	> 2 m	"plumes", turbulencias mecánicas, turbulencias isotrópicas.	Hasta un
micro $\delta$	> 2 mm	Formación de partículas nubosas	minuto.
micro $\epsilon$	> 2 $\mu$ m		
micro $\chi$	> 0.02 $\mu$ m		Entre un segundo y un día.

La clasificación que se realiza de las estaciones meteorológicas en el apartado correspondiente adquiere ahora un sentido más evidente. Se requiere de instrumentos distintos y de distintas instalaciones para recabar y procesar la información procedente de cada tipo de los fenómenos anotados dentro de su área de influencia. Los distintos tipos de instalación meteorológica corresponden, hasta cierto punto, con la escala de los fenómenos que se estudian en ellas.

La importancia de la distinción de fenómenos que se ha anotado, como se comenta arriba, no se limita a la investigación. Los requerimientos de los usuarios de la información meteorológica y climatológica, al margen de la descripción detallada que se presenta en su momento, pueden dividirse en tres grandes grupos según su tiempo de acceso:

- = 0 a 24 horas =
  - Previsiones meteorológicas.
  - Avisos de tiempo severo.
  - Consejo al público en general.
- = 24 horas a varios meses =

Datos y productos en apoyo de:

- Gestión de la agricultura, los recursos hidráulicos y energéticos.
- Vigilancia del clima, previsión de sequías.
- Diagnóstico y evaluación del clima.

= Varios meses a varios años =

- Resúmenes, estadísticas y análisis.
- Diagnósticos del clima.
- Preparación de modelos climáticos y estudios teóricos.
- Investigación del clima e investigaciones aplicadas.
- Planificación del aprovechamiento de tierras y otras actividades de desarrollo, sistemas de calefacción y de refrigeración, diseño y construcción de edificios, depósitos de agua, sistemas de abastecimiento de aguas, sistemas de riego agrícola y de transporte, instalaciones sanitarias.
- Predicción del clima.
- Evaluaciones del impacto del clima.

Las aplicaciones directas o indirectas, a corto o a largo plazo de la información proporcionada por los servicios meteorológicos, como es fácil apreciar, abarcan prácticamente todos los ámbitos de la vida diaria. La posibilidad de limitar la pérdida de vidas humanas como resultado de un fenómeno atmosférico previsible parecería justificación suficiente para la meteorología a nivel práctico. Y, sin embargo, hay más.

## APENDICE B

### NOTAS SOBRE LA PREDICCION DEL TIEMPO

La importancia de conocer la escala de los diferentes fenómenos que se producen en la atmósfera ya se ha anotado, incluso en el caso particular del pronóstico de tiempo. En esta actividad, además, las escalas meteorológicas obligan a utilizar determinados procedimientos de manipulación y análisis de la información, así como determinada técnica de pronóstico en cada caso. Así, los pronósticos del tiempo se han clasificado en cuatro categorías de acuerdo con el período de anticipación y con el carácter básico del pronóstico:

- Pronósticos de corto plazo (hasta 18 hrs.), desarrollados principalmente para la aviación civil y militar y para aplicaciones especiales, como la previsión de heladas. Algunos países han desarrollado métodos confiables hasta el 90 ó 95% gracias a la aplicación acertada de las técnicas de extrapolación a fenómenos de muy corto alcance.
- Pronósticos diarios de difusión general a través de medios masivos de información para periodos de 12 a 48 horas y para áreas geográficas determinadas. Es en este tipo de pronósticos en el que los esfuerzos se han concentrado, si bien se han logrado pocos avances reales desde que los procedimientos básicos para la meteorología se establecieron el siglo pasado. En estos casos se estima que la confiabilidad llega al 90% para 12 horas y decrece con el tiempo hasta llegar al 70% en 48 horas.
- Pronósticos diarios de mediano plazo (2 a 7 días). Los avances más recientes en este campo se basan en la aplicación de técnicas sinóptico-estadísticas para el pronóstico de patrones meteorológicos a gran escala y la predicción de condiciones atmosféricas medias. Hasta ahora, sin embargo, ninguna técnica ha logrado confiabilidad significativa (superior al 50%) en predicciones a plazos mayores que cinco días. Lo mejor que se ha logrado es un 70-75% en predicciones de anomalías de temperatura y 60% para anomalías de humedad.

Pronósticos de largo plazo (una semana o más), que funcionan en realidad sólo para condiciones medias o anomalías en periodos determinados (semanal, mensual, estacional o anual) de las variables más usuales: presión, temperatura y lluvia. Son útiles para aplicaciones como planeación agrícola, opti-

mización de riegos, operación de obras hidroeléctricas y de control de inundaciones, etc. En las mejores condiciones, el acierto de estos pronósticos de largo plazo es del 55-60%.

Queda establecido, entonces, que el método de predicción y el grado de detalle que se alcanza están condicionados a la longitud del período que se quiere analizar. Por ejemplo, los modelos convencionales de predicción numérica del tiempo (PNT) sólo pueden, pese a las mejoras que se les han introducido, representar explícitamente las características de gran escala de períodos mayores que doce horas, y aunque pueden predecir el desarrollo de sistemas atmosféricos nuevos no pueden, en cambio, representar la variabilidad de los parámetros de escala menor, como la formación de nubes y los procesos asociados con la precipitación. Así, para pronósticos a corto plazo (hasta dos horas) se aplica lo que se llama "principio de persistencia", que consiste en suponer que las tendencias actuales van a mantenerse, de modo que las condiciones presentes se extrapolan sin cambios al momento de interés (por cierto, en nuestro país esta necesidad es muy reciente, pues los datos de radar y de satélite que permiten describir el tiempo actual con todo detalle recién entraron a formar parte de los bancos de datos que los previsores deben manipular en tiempo real). Este método, evidentemente, tiene severas limitaciones que se manifiestan más o menos según el tipo de sistema meteorológico que se extrapole y la geografía de la zona. Por ejemplo, un sistema de precipitación asociado con un accidente orográfico puede durar muchas horas, en tanto que el mal tiempo provocado por sistemas convectivos regionales es de escasa duración y, por ende, el pronóstico no será confiable más allá de una hora. Cuando este tipo de extrapolación lineal no es aplicable, es necesario aplicar procedimientos no lineales en los que la topografía -ahora "oficialmente"- juega un papel importante.

## APENDICE C

### CLICOM

El proyecto CLICOM (CLimate COMputer) era, inicialmente, un programa de la WMO para promover el intercambio de tecnología para el manejo y el procesamiento de datos climáticos, y actualmente se ha convertido en una norma internacional en esa clase de procesamiento.

El sistema en general puede describirse como uno de procesamiento de datos climáticos basado en microcomputadora con la capacidad de digitalizar, controlar la calidad, manejar y analizar datos climáticos. Consiste de tres partes fundamentales:

- Un manejador de bases de datos relacionales que provee herramientas de manejo, consulta y sumariazión basicos de datos.
- Un paquete de programas FORTRAN comprensibles y diseñados específicamente para la entrada y validación de datos climáticos.
- Otro paquete pequeño de programas FORTRAN destinados a la presentación básica de información.

CLICOM, como muchas otras herramientas-norma en el ámbito tecnológico, comenzó a desarrollarse en los Estados Unidos en 1984, en el Centro Nacional de Datos Climáticos (CNDC), con los países menos desarrollados como usuarios objetivo primarios. Luego, al completarse la primera etapa, la implantación del proyecto internacional fue encargada al Servicio Nacional del Clima, Oficina de Meteorología, División de Actividades Internacionales (DAI) y, actualmente, está apoyado conjuntamente por ambas oficinas: el DAI proporciona el soporte técnico y el CNDC mejoras a los programas dentro de los E. U. y a menudo proporciona expertos para conducir entrenamiento en otros países.

El diseño del proyecto, en general, está enfocado a lograr instalación simple, suficiente información y apoyo para habilitar inmediatamente el inicio de operaciones, un componente de retroalimentación de usuario que identifica las necesidades actuales y futuras y que realiza un seguimiento de las actividades para facilitar la explotación del sistema. Un componente nuevo de especial importancia en el esquema es el concepto del Area de Soporte para CLICOM (ASC- Area Support for CLICOM-), dentro del cual expertos en métodos (ME- Methods Experts-) localizados cerca de los usuarios proveen soporte técnico y estimulan la formación de grupos de expertos usuarios. El concepto se conoce como ASC\*ME e inició su desarrollo a finales de 1989.

# RELACION DE ILUSTRACIONES

## CAPITULO I BAROMETROS

	ILUSTRACION	PAGINA
I-1	: Experimento de Torricelli	11
I-2	: Experimento de Maignan	11
I-3	: Barómetro de dos líquidos de Descartes	13
I-4	: Barómetro de dos líquidos de Hooke	13
I-5	: Barómetro de tres líquidos de Hooke	14
I-6	: Barómetro de rueda o volante	14
I-7	: Espiral anerode	15
I-8	: Barómetro marino de Zeiher	16
I-9	: Barómetro anerode de Vidie	16
I-10	: Anerode con resortes externos	16

## CAPITULO II TERMOMETROS

	ILUSTRACION	PAGINA
II-1	: Termoscopio de Santorio	20
II-2	: Termómetros de Santorio	20
II-3	: Termómetro de aire de Salomon de Caus (1615)	23
II-4	: Termómetro de aire de Telicoux (1611)	23
II-5	: Termómetros de aire posteriores a Leurechon	23
II-6	: Termómetro de aire de Guericke	23
II-7	: Termómetro de aire de Amontons	27
II-8	: Propuestas de Bernoulli para termómetros de máximas y mínimas	29
II-9	: Termómetros de Lord Charles Cavendish	29
II-10	: Termómetros combinados de máximas y mínimas (Six)	30

II-11	: Termómetros de máximas y mínimas (Rutherford)	30
II-12	: Termómetro metálico (Samuel Frotheringham)	31

### **CAPITULO III      PRECIPITACION PLUVIAL**

	<b>ILUSTRACION</b>	<b>PAGINA</b>
III-1	: Pluviometro registrador de Leupold (1726)	34
III-2	: "Pluviometro calentado" de Leutmann	36
III-3	: Pluviometro de flotador de Bevan (1827)	40
III-4	: Hyetógrafo de Halliwell (1907)	41
III-5	: Pluviometro registrador de Beckley (1869)	41
III-6	: Pluviometro registrador de Palazzo (1906)	42
III-7	: Pluviometro de sifón natural (fabricado por Negretti & Zambra)	42
III-8	: Pluviometro de sifón de Dines	43
III-9	: Registrador de Landriani (1782)	43
III-10	: Pluviometro registrador de Fergusson	44
III-11	: Registrador de intensidad de lluvia de Binnie (1892)	46
III-12	: Cuentagotas de Gallempack (1905) y modificación de Sprung (1907)	47
III-13	: Versión posterior del registrador de Gallempack (1908)	47
III-14	: Registrador de intensidad de lluvia de Jardi	48

### **CAPITULO IV      HIGROMETROS**

	<b>ILUSTRACION</b>	<b>PAGINA</b>
IV-1	: Primer higrómetro de cuerda de Santorio	54
IV-2	: Segundo higrómetro de cuerda de Santorio	54
IV-3	: Higrómetro de Arderon (1736)	54
IV-4	: Higrómetro de Desaguliers y Hales (1744)	56

IV-5	: Higrómetro de "barba de avena" de Hooke	56
IV-6	: Higrómetro de Kater (hecho por Robinson en 1820)	56
IV-7	: Higrómetro de Molineux (1685)	57
IV-8	: Higrómetro de hueso de ballena de Deluc	57
IV-9	: Higrómetro de Richer con ocho cabellos	57
IV-10	: Higrómetro de Babinet	57
IV-11	: Higrómetro de Gould	58
IV-12	: Primer higrómetro de condensación (1655)	58
IV-13	: Higrómetro de punto de rocío de Daniell	58
IV-14	: Higrómetro de Regnault de punto de rocío	59
IV-15	: Higrómetro de punto de rocío de Alluard	59
IV-16	: Higrómetro de Belli de punto de rocío	59
IV-17	: Higrómetro de punto de rocío de G. Dines (1871)	60
IV-18	: Higrómetro de Mason (1836)	60
IV-19	: Psicrómetro de Assmann (1892)	60
IV-20	: Termómetro diferencial de Leslie como higrómetro (1799)	61

## CAPITULO V VELOCIDAD Y DIRECCION DEL VIENTO

	ILUSTRACION	PAGINA
V-1	: Instrumento vertical de Danti (1578)	64
V-2	: Velela de placas divergentes de Parrot (1797)	65
V-3	: Registrador de dirección de viento de Landriani (1797)	65
V-4	: Dos anemómetros de Leupold	69
V-5	: Anemómetro de Huet	71
V-6	: Anemómetro de tubo de presión de Lind (1775)	71
V-7	: Modificación de Snow-Harris al anemómetro de Lind (1858)	72

V-8	: Anemógrafo de Pfeiffer	73
V-9	: Flotador del anemógrafo original de tubo de presión de Dines	73
V-10	: Anemógrafo de Dines fabricado por Munro (1893)	74
V-11	: Anemómetro helicoidal de Dines	75
V-12	: Anemógrafo de D'Ons-en-Bray	77
V-13	: Anemógrafo y veleta registradora de Robinson (1850)	78
V-14	: Anemómetro de Beckley (parte externa)	80
V-15	: Versión posterior del anemómetro de Beckley (1867)	81
V-16	: Anemocinégrafo	81
V-17	: Anemómetro de Wolff (1709)	82

## CAPITULO VI DURACION SOLAR

	ILUSTRACION	PAGINA
VI-1	: Izq.: Registrador de luz de sol de McLeod Der.: Primer instrumento de James B. Jordan	85
VI-2	: Instrumento mejorado de Jordan (1886)	86
VI-3	: Registrador doble de luz de sol de Jordan (1888)	86
VI-4	: Registrador fotográfico de Marvii (1888)	87
VI-5	: Una propuesta de Kicher (1646)	88
VI-6	: Instrumento original de Campbell (1853)	89
VI-7	: Modificación de Sir George Stokes (1880)	89
VI-8	: Registrador de luz de sol con ajuste de latitud de Campbell y Stokes	89
VI-9	: El registrador de Whipple y Castella	89
VI-10	: El "Sonnenscheinchronogrph" de Maurer	90

VI-11	: El registrador de luz de sol de la oficina del clima de los E. U.	90
-------	---------------------------------------------------------------------	----

## **CAPITULO VII ALTURA DE NUBES**

	ILUSTRACION	PAGINA
VII-1	: Cálculo de altura de nubes por triangulación directa	91
VII-2	: Método de la sombra de Kepler	91
VII-3	: Uso de un reflector horizontal	92
VII-4	: Nefoscopio de Fineman	93
VII-5	: Nefoscopio de Devik	94
VII-6	: El "domógrafo" usado por Hermite y Besançon	94

## **CAPITULO VIII METEOROGRAFOS**

	ILUSTRACION	PAGINA
VIII-1	: Meteorógrafo de Wren	97
VIII-2	: Tercer meteorógrafo de Wren	98
VIII-3	: Meteorógrafo de Secchi, vistas frontal y posterior	101
VIII-4	: Meteorógrafo de Theorell (1869)	102
VIII-5	: Sección de registro del meteorógrafo de Theorell	102

## **CAPITULO IX SONDEO DE ALTURA SIN TELEMETRIA**

	ILUSTRACION	PAGINA
IX-1	: Instrumentos para globos de Glaisher	106
IX-2	: Barotermógrafo de Richard (1893)	107
IX-3	: Barotermohigrógrafo de Richard (1896)	108
IX-4	: Meteorógrafo de Marvin para cometas	108

IX-5	: Meteorógrafo para cometa de Marvin, modificado por Assmann	109
IX-6	: Meteorógrafo de cometa de Dines	109
IX-7	: Barotermógrafo de Hermite y Besançon (1895)	109
IX-8	: Meteorógrafo para globo-sonda de Hergesell	110

## **CAPITULO X      TELEMETEOROGRAFIA Y RADIOSONDAS**

	<b>ILUSTRACION</b>	<b>PAGINA</b>
X-1	: Mecanismo de conversión de Von Baumhauer	112
X-2	: Esquema de transmisor de Von Baumhauer	112
X-3	: Receptor de Von Baumhauer	113
X-4	: Telemeteorógrafo de Cerebotani y Silbermann	115
X-5	: Principio del telemeteorógrafo de Herath y Robitzsch (1917)	116
X-6	: Uso de circuitos sintonizados de Idrac	117
X-7	: Principio de la primera radiosonda francesa	118
X-8	: Higrómetros para radiosonda de la NBS-Navy	120
X-9	: Circuito de medición y transmisión para la radiosonda de la NBS-Navy	121

## **CAPITULO XI      ESTACIONES METEOROLOGICAS**

	<b>ILUSTRACION</b>	<b>PAGINA</b>
XI-1	: Distribución de las estaciones de la red sinóptica internacional (1989)	127
XI-2	: Barómetro de Fortin	130
XI-3	: Barómetro fijo (de Kew)	130
XI-4	: Barógrafo típico	131
XI-5	: Higrómetro de cabello	134
XI-6	: Psicrómetro simple	134
XI-7	: Pluviógrafo de Hellmann	135

XI-8	: Tanque de Summerland	135
XI-9	: Evaporímetro tipo Piche	136
XI-10	: Evaporígrafo	136
XI-11	: Lisímetro de Pruitt y Angus	137
XI-12	: Veleta con anemómetro de plato oscilante	138
XI-13	: Anemocinómetro	139
XI-14	: Piranómetro de Eppley	141
XI-15	: Piranómetro bimetálico de Robitzch	141
XI-16	: Solarímetro y albedómetro	141
XI-17	: Heliógrafo de Campbell-Stokes	142

## CAPITULO XII RADARES METEOROLOGICOS

	ILUSTRACION	PAGINA
XII-1	: Magnetrón de cavidad	146
XII-2	: Tipos distintos de magnetrónes de cavidad	147
XII-3	: Magnetrón coaxial	147
XII-4	: Ecos producidos por una tormenta	148
XII-5	: Ecos producidos por los "ángeles"	149
XII-6	: Esquema básico del radar	150
XII-7	: Diagrama de bloques	151
XII-8	: Análisis de una señal	151
XII-9	: Ecos en formato PPI	152
XII-10	: Ecos en formato RHI	152
XII-11	: Diagrama de bloques de un radar Doppler	156
XII-12	: Diagrama de un radar CW, con respuesta en frecuencia de su amplificador	157
XII-13	: Comparación entre la estructura de un radar CW simple y un radar Doppler	158
XII-14	: Perfil horizontal de velocidad de viento logrado con radar Doppler	158

XII-15	: Perfil de velocidad de viento contra altura logrado con radar Doppler	158
XII-16	: Tipos de receptores	163
XII-17	: Receptores parabólicos e hiperbólicos	163

### **CAPITULO XIII SATELITES METEOROLOGICOS**

	<b>ILUSTRACION</b>	<b>PAGINA</b>
XIII-1	: Satélites involucrados en el programa programa internacional GARP	167
XIII-2	: Estructuras básicas de TIROS	169
XIII-3	: Vista de la plancha base de la carcasa de TIROS	171
XIII-4	: Dispositivo de reducción de velocidad angular (yo-yo)	174
XIII-5	: Retrocohetes de recuperación de velocidad angular	174
XIII-6	: Interacción entre la bobina de control control magnético y el campo terrestre	178
XIII-7	: Esquema de las cámaras Vidicon usadas en los TIROS	180
XIII-8	: Radiaciones detectadas por los sensores del del TIROS	184
XIII-9	: Comparación de las coberturas Tiros y Nimbus	188
XIII-10	: Estructura externa de un Nimbus	190
XIII-11	: Sistemas de estabilización y control de Nimbus	191
XIII-12	: Detección de horizonte (frontal y posterior) para control de eje vertical	192
XIII-13	: ESSA-1	200
XIII-14	: Cosmos-144	201
XIII-15	: Cosmos-149	202

XIII-16	: Meteor-1	203
XIII-17	: SMS-GOES	204
XIII-18	: Meteor-2	206
XIII-19	: METEOSAT y su infraestructura prevista	207
XIII-20	: GMS-Himawari	209
XIII-21	: Versión avanzada del TIROS-N	210
XIII-22	: ERBS	213
XIII-23	: GOES-I	214

#### CAPITULO XIV OTROS INSTRUMENTOS

	ILUSTRACION	PAGINA
XIV-1	: Circuito del sensor de presión	220
XIV-2	: Nefobasimetría antigua	221
XIV-3	: Esquema de funcionamiento del ceilómetro de proyector de luz	222
XIV-4	: Diagrama de bloques del nefobasímetro láser	223
XIV-5	: Concepto ISS	227
XIV-6	: Sistema integrado de sondeo	228
XIV-7	: Espectrógrafo UV	230
XIV-8	: Aspecto general del front-end del espectrógrafo UV	231
XIV-9	: Diagrama de bloques del módulo sensor (adquis. datos para barcos)	233
XIV-10	: Sensor de profundidad de nieve	236
XIV-11	: Sensor de agua equivalente de precipitación congelada	237
XIV-12	: Interruptor de luz solar	238
XIV-13	: Sonda Láser de Viento Atmosférico	244
XIV-14	: Diagrama esquemático del sistema de láser de LAWS	245

XIV-15	: Sistema óptico del sistema LAWS	246
XIV-16	: Diagrama de bloques de la electrónica del receptor	247

## **CAPITULO XV APLICACIONES**

## **CAPITULO XVI METEOROLOGIA EN MEXICO**

Diagrama de flujo de la operación del  
Servicio Meteorológico Nacional

Organigrama operacional del Servicio  
Meteorológico Nacional

entre pp. 261 y 262

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMERICAN METEOROLOGY SOCIETY  
6TH.INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERACTIVE INFORMATION AND  
PROCEDURES  
AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY

ATLAS, DAVID  
RADAR IN METEOROLOGY (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY)  
AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY

CAPRARA, GIOVANNI  
THE COMPLETE ENCICLOPEDIA OF SPACE SATELLITES  
PORTLAND HOUSE

CLAIBORNE, ROBERT  
CLIMATE, MAN AND HISTORY (1970)

ENCICLOPEDIA HISPANICA  
TEMAPEDIA: METEOROLOGIA (1991)  
ENCICLOPEDIA BRITANICA

GOMEZ MORALES, ARTEAGA  
ELEMENTOS BASICOS PARA MANEJO DE INSTRUMENTAL  
METEOROLOGICO  
CECSA

HUMPREYS, W. J.  
WAYS OF THE WEATHER. A CULTURAL SURVEY OF METEOROLOGY

KARGIAN, A. KH.  
METEOROLOGY. A HISTORICAL SURVEY

KNOWLES MIDDLETON  
INVENTION OF THE METEOROLOGICAL INSTRUMENTS (1969)  
JOHNS HOPKINS PRESS

PETTERSEN, SVERRE  
INTRODUCCION A LA METEOROLOGIA (1962)

WIDGER, WILLIAM K.  
METEOROLOGICAL SATELLITES (1966)  
HOLT, RINEH & WINSTON

CNA/SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL  
MODERNIZACION DE LAS REDES DE OBSERVACION DEL S.M.N.  
CNA/SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL

S BATTAN, LOUIS  
RADAR OBSERVATION OF THE ATMOSPHERE  
UNIVERSITY OF CHICAGO, 1973

MORRILL I. SKOLNIK  
INTRODUCTION TO RADAR SYSTEMS  
MC GRAW-HILL, 1980

AMERICAN METEOROLOGY SOCIETY  
24TH CONFERENCE ON RADAR METEOROLOGY  
AMERICAN METEOROLOGY SOCIETY, MARZO 1989

AMERICAN METEOROLOGY SOCIETY  
18TH CONFERENCE ON RADAR METEOROLOGY  
AMERICAN METEOROLOGY SOCIETY, MARZO 1978

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY  
7TH SYMPOSIUM ON METEOROLOGICAL OBSERVATION & TECHNIQUES  
AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY

## REFERENCIAS HEMEROGRAFICAS

PASTRE, CLAUDE  
LOS UTILES DE LA METEOROLOGIA  
MUNDO CIENTIFICO  
VOL. 8, NUM. 84. PP 972 - 976

G. ELISEI, M. MAINI,  
A. MARZORATI ET AL  
IMPLEMENTATION OF A MULTIAXIAL DOPPLER SODAR SYSTEM  
ATMOSPHERIC RESEARCH  
VOL. 20, PP. 109 - 118

PEREZ RICO, SANTIAGO  
CEILOMETRO NEFOBASIMETRO, O "PINCHANUBES"  
LA METEOROLOGIA  
VOL. I NO. 4, PP. 23 - 29

SIGNAL, S. P.  
RADIO WAVE PROPAGATION AND ACOUSTIC SOUNDING  
ATMOSPHERIC RESEARCH  
VOL. 20 (1986), PP. 235 - 256

FIOCCO, CIMINELLI & MASTRANTONIO  
SODAR RETRIEVAL OF VERTICAL ACCELERATION & IMPLIC. ...  
ATMOSPHERIC RESEARCH  
VOL. 20 (1986); PP. 199 - 212