

Regulación Frecuencia - Potencia en la red de interconexion de Francia ⁽¹⁾

Principio general de funcionamiento de un regulador de frecuencia

El regulador mide la velocidad del alternador, o lo que es lo mismo la frecuencia «f» de la corriente. Si la frecuencia «f» es inferior a la frecuencia f_0 a que está ajustado el regulador, éste «abre», o sea aumenta la potencia mecánica de la turbina; si f es superior a f_0 , el regulador «cierra» y disminuye la potencia de la turbina.

A.—Referencia a los métodos de repartición de la potencia entre varias centrales en paralelo.

1.º Regulación por «estatismo»

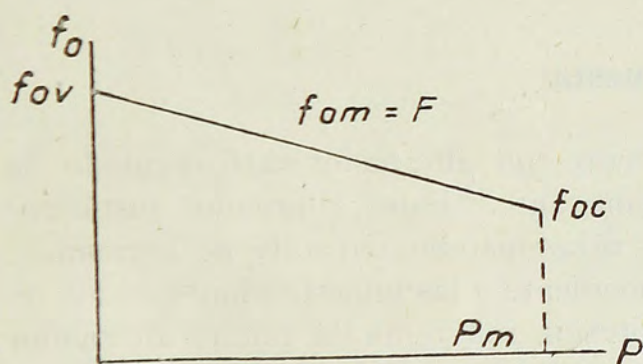


Fig. 1

Se relaciona la frecuencia f_0 a que está ajustado el regulador, con la potencia P producida por el alternador; f_0 es una función decreciente de P , aproximadamente lineal. f_0 variará entre f_{ov} en vacío a f_{oc} a plena carga de la máquina (fig. 1).

Si f_{om} es la frecuencia media, se definirá el «statismo» S como:

$$S = \frac{f_{ov} - f_{oc}}{f_{om}}$$

La frecuencia f_{om} es en principio igual a la frecuencia normal F de la red.

Los dispositivos de «cambio de velocidad» del regulador desplazan paralelamente la recta $f_0 = f(P)$, hacia arriba para un aumento de velocidad; otro dispositivo permite generalmente cambiar el estatismo del regulador.

(1) Resumen de las cuatro conferencias dictadas por el Profesor Esclangón en el Instituto de Ingenieros de Chile bajo el patrocinio de la Div. de Energía y Electrotecnia.

Si varios alternadores que funcionan en paralelo están provistos de reguladores estáticos, la repartición de la potencia es perfectamente definida para todas las cargas. Si f es la frecuencia de la red en un instante dado, las potencias entregadas por cada máquina son las potencias P_1 , P_2 , P_3 , determinadas por la intersección de la horizontal $f_0 = f$ con las rectas o curvas de estatismo (fig. 2).

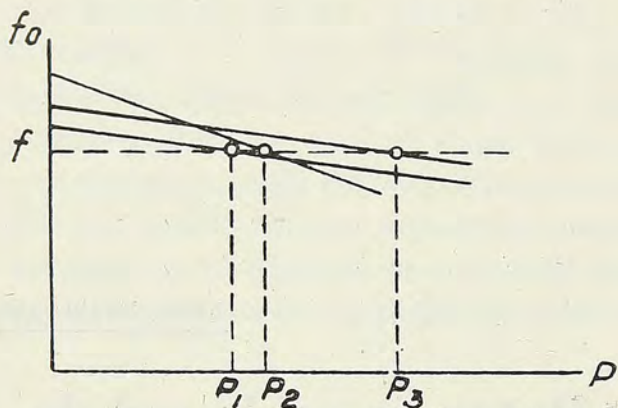


Fig. 2

tencias entregadas por cada máquina son las potencias P_1 , P_2 , P_3 , determinadas por la intersección de la horizontal $f_0 = f$ con las rectas o curvas de estatismo (fig. 2).

La suma de las potencias de las máquinas debe ser igual a la potencia total de la red.

Si esta potencia aumenta, la frecuencia f decrece, las potencias entregadas por cada máquina crecen hasta

que su suma sea igual a la potencia total consumida.

Durante los regímenes transitorios, puede haber oscilaciones de potencia, si los reguladores tienen velocidades de funcionamiento muy diferentes; pero ésto puede ser evitado fácilmente.

La repartición de las potencias puede ser modificada a voluntad, actuando sobre los dispositivos de «cambio de velocidad». Las variaciones de potencia se reparten en forma inversamente proporcional al «estatismo».

Este sistema presenta el inconveniente que cambia la frecuencia de la red con la potencia y, tanto más cuanto más imperfectos son los reguladores. Además, toda variación de carga repercute sobre el conjunto de la red, independientemente de las situaciones geográficas respectivas, lo que puede cargar excesiva e inútilmente la red de transporte.

2.º Regulación por «director de orquesta»

Supongamos que en la red precedente, un alternador esté regulado de modo que su estatismo sea nulo: $f_0 = \text{constante}$. Este alternador (astático) impone su frecuencia; la potencia de las otras máquinas (estáticas) permanece constante, con una aproximación correspondiente a las imperfecciones de los reguladores. Todas las variaciones de potencia son tomadas por el alternador astático, denominado «director de orquesta», ya que él impone su frecuencia.

Este sistema permite obtener una frecuencia constante, pero impone una carga particular a una central o grupo de centrales; igualmente, las necesidades de potencia son suministradas con independencia de la situación geográfica del consumo.

3.º Regulación por «estatismo virtual»

Este tipo de regulación consiste esencialmente en ligar la frecuencia de regulación f_0 , no ya a la potencia P total de la máquina, sino a la fracción de potencia p que ella entrega a la red de interconexión.

Consideremos, por ejemplo, tres grupos de potencia P_1 , P_2 , P_3 , entregando cada uno, sobre una red local las potencias q_1 , q_2 , q_3 , sobre la red de interco-

nexión $p_1 p_2 p_3$; supongamos que una parte especial de la red no contiene generadores y que consume una potencia p_0 (ésta puede ser la potencia consumida por la red de interconexión).

En cada momento se verifican las relaciones:

$$\begin{aligned} P_1 &= p_1 + q_1 & p_1 + p_2 + \dots &= p_0 \\ P_2 &= p_2 + q_2 \end{aligned}$$

Supongamos que se estudie un programa de acuerdo con el cual se predeterminen las potencias $p_{10} p_{20}$ que cada grupo debe intercambiar con la red de interconexión. Daremos a cada regulador un estatismo función de p_i , tal que para $p_i = p_{i0}$ la frecuencia f_0 de ajuste del regulador sea igual a la frecuencia normal F de la red. En estas condiciones, la red tendrá la frecuencia F si las potencias intercambiadas son justamente $p_{10} p_{20} \dots$, y cada grupo hace frente

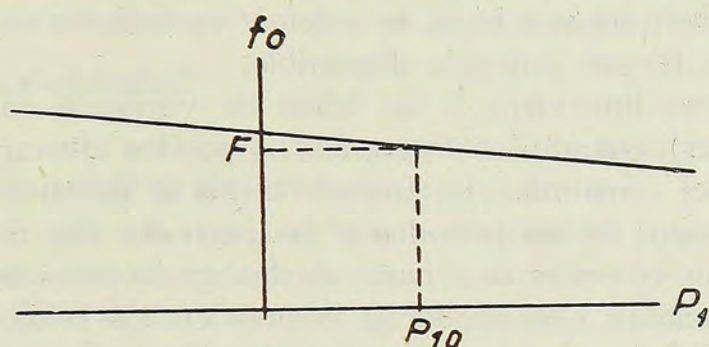


Fig. 3

espontáneamente a las variaciones de potencia exigidas por el consumo local.

Si la potencia q_1 de una red local aumenta, en el alternador, cuya potencia permanece constante mientras el regulador no actúe, disminuirá p_1 y por consiguiente su frecuencia de regu-

lación f_0 aumentará, sobre el valor de la frecuencia F de la red; el regulador abre y aumenta la potencia P del alternador hasta que se restablezca el equilibrio, es decir hasta que $p_1 = p_{10}$; el alternador ha cubierto así por sí mismo la variación del consumo local q_1 .

Si hay variaciones del programa (ya sea porque los p_{i0} son diferentes de lo que se ha previsto, o uno de los alternadores es de potencia insuficiente) la suma de los p_{i0} no será más igual a la potencia consumida, los p_i aumentarán y disminuirá la frecuencia f_0 de regulación de cada regulador; cada uno de ellos aumentará la potencia de su máquina en una cantidad inversamente proporcional a su estatismo.

El funcionamiento es análogo al de una red regulada por estatismo, pero sólo intervienen en este caso las potencias intercambiadas con la red de interconexión.

Este tipo de regulación ha sido propuesto en una forma ligeramente diferente por Follou y Darrieux en 1936.

B.—Solución adoptada en Francia

Como los reguladores franceses no se adaptan para la regulación por estatismo virtual, se ha adoptado la de grupo director de orquesta.

El director de orquesta es, según los casos:

—O las centrales térmicas de la región vecina a París, cuando las condiciones hidráulicas son insuficientes, o bien las centrales de pie de tranque del macizo central, que tienen buenas condiciones hidrológicas.

La potencia de regulación es del orden de 300.000 kilowatts, el comando se hace en el «dispatching» de la calle de Messine, en París, en donde están centralizadas las telemedidas de las principales líneas de interconexión.

Las centrales que no participan en la regulación reciben un programa de marcha la víspera, de acuerdo con las provisiones de consumo por una parte y el gasto de los ríos para las centrales de pasada junto con la potencia térmica disponible por la otra parte. Las centrales funcionan con un estatismo variable, grande (con débil variación de potencia) para las centrales cuya potencia es prácticamente constante; pequeña para aquellas que pueden ayudar en la regulación (térmicas con carbón corriente, hidráulicas con embalse).

La potencia total de punta sobrepasa los cinco millones de kilowatts; las variaciones alcanzan habitualmente 300.000 kilowatts y algunas veces 500.000.

Las centrales que hacen de director de orquesta deben satisfacer las variaciones anteriores; cuando hay el riesgo que su potencia sea insuficiente, se ponen en servicio grupos suplementarios, o bien, se ordenan variaciones del programa a aquellas centrales que tengan potencia disponible.

El estatismo de los reguladores interviene a las horas de variación rápida de la potencia (12, 14, 18 horas), cuando los programas no pueden ajustarse muy de cerca a la variación del consumo. La frecuencia no se mantiene rigurosamente constante durante estos cortos períodos y las centrales con reguladores de estatismo débil toman entonces una parte de las variaciones de carga. La frecuencia sufre variaciones que producen errores en los relojes sincrónicos, de algunos segundos, que se pueden corregir posteriormente.

Este sistema sólo puede funcionar si se dispone de una potencia suficiente; éste es el caso en Francia desde noviembre de 1949; es posible que se encuentren aun dificultades en el curso del próximo invierno, pero se puede esperar que los períodos difíciles ya han terminado gracias al esfuerzo desplegado después de 1945.

* * *

TRANSPORTE DE ENERGIA ELECTRICA A ALTA TENSION

El transporte de la electricidad a muy alta tensión sólo se justifica para potencias considerables y grandes distancias.

El costo del equipo aumenta muy rápidamente con la tensión y, para distancias relativamente cortas, es más económico y más seguro el empleo de varias líneas en paralelo a tensión más baja.

En Francia, como en el resto de Europa, se emplea desde hace veinte años el voltaje de 225 kV. trifásico; si no hubiese sido por la guerra, se habría llegado a un voltaje superior. En 1945, cuando se planteó el problema del transporte de grandes cantidades de energía desde el macizo central a París (distancia 400 km.), fué posible elegir una tensión superior a 225 kV; pero aquello habría impuesto a los constructores el estudio del equipo para 400 kV. (tensión probable); era necesario actuar rápidamente y la «Electricité de France», prefirió construir una línea de dos circuitos a 225 kV. transformable ulteriormente en una línea de 400 kV.

El paso a un escalón de tensión más elevada plantea los siguientes problemas:

1.º Equipo; 2º Estabilidad; 3.º Efecto corona.

Equipo.—a) Interruptores.

El problema puede ser considerado como resuelto; un fabricante francés ha expuesto desde 1939 un interruptor para 500.000 volt. Los progresos de los interruptores de aire comprimido y de pequeño volumen de aceite permiten pensar que el equipo de interrupción funcionará correctamente.

b) Transformadores

Transformadores que se ensayan a tensiones superiores a 400 kV. han sido ya construídos en numerosos ejemplares. La construcción de un transformador de gran potencia para la misma tensión es relativamente más fácil.

Estabilidad

El problema está resuelto para líneas de 400 km.; para líneas de mayor longitud, la estabilidad necesitará:

a) Alternadores con una razón de cortocircuito elevada y de gran inercia, con excitatrices de acción rápida; b) condensadores síncronos para la regulación de la tensión y de la potencia reactiva; c) interruptores de apertura rápida, de preferencia monofásicos y reconexión rápida. En Francia la reconexión lenta da resultados satisfactorios, debido a que la red forma una malla estrecha.

Estudio de la estabilidad. Mesas para calcular. Micromáquinas

El estudio de la estabilidad de una red conduce a un trabajo arduo; supone desde luego conocida la distribución de las corrientes y potencias antes y después de la falla. Este cálculo se ha simplificado mediante el uso de las mesas para calcular (analizador de redes), que representan la red en un modelo reducido.

L'Electricité de France ha construído un analizador alimentado a 500 ciclos, con aparatos de medida con amplificación electrónica, lo que permite reducir apreciablemente la potencia necesaria.

A pesar del analizador, el estudio del movimiento de un alternador en régimen transitorio, después de una falla, es difícil. Los señores Cahen y Robert, de L' Electricité de France, han construído micromáquinas, o sea modelos reducidos de los alternadores que conservan los tiempos de lanzamiento y las constantes de tiempo de los circuitos de los alternadores estudiados. Estas micromáquinas se conectan a una red infinita por una línea artificial; se inscriben en un oscilógrafo catódico los desplazamientos angulares entre el rotor del alternador y el rotor ficticio de la red infinita. Al producir una falla en la línea artificial, es fácil ver el comportamiento del conjunto.

Condensador serie

Un condensador serie producirá un desfase entre las extremidades de la línea; varios condensadores repartidos disminuyen la impedancia característica de la línea. En caso de cortocircuitos, los condensadores están some-

tidos a sobretensiones, que pueden obligar a eliminarlos de la red en el momento en que son más útiles. L'Electricité de France está haciendo actualmente ensayos en una línea de 60.000 volt, que trabaja algo sobrecargada.

Efecto corona

Las pérdidas por efecto corona, en tiempo de lluvia sobre todo, pueden alcanzar valores considerables.

L'Electricité de France ha emprendido en Chevilly, bajo la dirección de los señores Ailleret y François Cahen, medidas sistemáticas del efecto corona, en cables únicos o en haces de cables.

Tres transformadores monofases, de 500.000 volt. (entre fases), alimentan cada uno un cable, correspondiente a cada fase, de una luz de 500 m., entre dos soportes. La energía consumida puede ser medida en las tres formas siguientes:

a) Directamente en la alta tensión, por medio de instrumentos ubicados en el borne del transformador (medida de la tensión por divisor de tensión); b) por el divisor de tensión y la corriente primaria del transformador, lo cual incluye las pérdidas joule; c) sobre el primario de transformador (es necesario en este caso corregir las pérdidas).

Los estudios se han realizado sobre cables de aluminio-acero de diámetro ampliado a 40 o 50 mm. y sobre un haz de dos cables aluminio-acero de 26,4 mm. de diámetro (cable normal para 220 kV.), distantes de 40 a 60 cm.

Los resultados indican una disminución neta de las pérdidas corona para el haz de cables, al compararlo con el cable único, en todas las diferentes circunstancias. Hay igualmente una disminución de la impedancia característica y por consiguiente un aumento de la potencia natural de la línea.

Se han realizado en Puy-de-Dôme ensayos de formación de escarcha (o hielo) sobre el conductor y se ha demostrado que los manguitos de hielo ni siquiera se soldaban en las heladas más importantes.

L'Electricité de France elegirá el haz de dos cables de 26,4 mm. a 40 cm. de distancia, para la tensión de 400 kV. prevista para el futuro. Para la buena disposición mecánica de los cables, se colocarán tres separadores en cada tramo de 500 metros.

Los suecos han adoptado igualmente la solución de un haz de dos cables para su línea de 380 kV.

En Francia no se han hecho ensayos sobre el transporte a corriente continua; ha habido problemas más urgentes que resolver; actualmente se efectúan medidas del efecto corona, con corriente continua, con la ayuda de máquinas electrostáticas fabricadas en Grenoble.

El paso a la tensión de 400 kv., en la línea de dos circuitos a 220 kv. se hará fácilmente, agrupando los conductores dos a dos y alargando las cadenas de aisladores. No será necesario retirar los cables para colocar otros.

La fecha en que se hará el cambio va a depender de la evolución geográfica de los consumos de energía eléctrica; si el consumo en la región parisiense crece rápidamente, el cambio se hará en un futuro próximo; si, al contrario, las industrias de gran consumo de energía se instalan en el sur de Francia, no habrá lugar para desarrollar la red de transporte hasta dentro de un cierto tiempo.

Para Chile, el transporte a grandes distancias presenta un gran interés; puede ser facilitado por la presencia de diversos centros de consumo escalonados sobre la línea principal, Sur-Norte.

* * *

ENSAYOS DE SOBRETENSION EN TRANSFORMADORES

El equipo eléctrico de las líneas de transporte puede estar sometido a sobretensiones que se dividen en dos clases:

1.º Sobretensiones internas debidas a la red misma:

a) Aumento de las tensiones de frecuencia normal, como consecuencia de un incidente cualquiera en la explotación;

b) Sobretensiones de operación, a consecuencia del cierre o apertura de interruptores; sobretensiones a la frecuencia propia de la red o de las máquinas, intermediaria entre la frecuencia industrial y la de las ondas de choque.

2.º Sobretensiones externas debidas esencialmente a descargas de rayos, directas o indirectas, con ondas de frente muy empinado, en las que lo abrupto de la onda se amortigua rápidamente por efecto corona y sobre todo por efecto pelicular.

Los ensayos de sobretensión del equipo y, más particularmente de los transformadores, que son los primeros en recibir las sobretensiones, deben ser, las unas a frecuencia industrial (o bastante vecinas) y las otras, bajo la forma de ondas de choque, en las cuales se ha normalizado la forma (1-50), lo que quiere decir que el voltaje sube a su valor máximo en un microsegundo y después baja a la mitad en este valor en 50 microsegundos. (1)

Ensayos a frecuencia industrial

Estos ensayos son en la actualidad clásicos; dan aun sin embargo lugar a discusiones entre proveedores y clientes en la interpretación de sus resultados, cuando éstos no son suficientemente claros.

Los laboratorios de L'Electricité de France, bajo la dirección de M. Langlois-Berthelot, han emprendido un estudio detallado para precisar la naturaleza de los efectos observados en el curso de los ensayos.

El aparato bajo ensayo tiene su estanque aislado y la corriente que pasa, entre el enrollado (que está aislado) y el estanque, se envía por intermedio de un cable coaxial a un oscilógrafo catódico; la corriente de capacidad se anula por un montaje en T debidamente calibrado.

En estas condiciones se observa:

a) Una ionización en penachos, que corresponde a un comienzo de ionización en el aislante, que se traduce por pequeñas descargas, de débil energía y frecuencia muy elevada.

b) Efecto corona, que da una deformación de la curva de corriente para la tensión máxima (valor nulo de la corriente de capacidad).

(1) En Estados Unidos de N. A. se ha adoptado la onda de 1.1/2-40.

La aparición de estos fenómenos a tensiones progresivamente crecientes permite tener una idea más precisa de la sollicitación de los aislantes, antes de su ruptura franca. El orden de magnitud de los fenómenos observados permitirá establecer una medida de la «fatiga» de los aislantes.

Ensayos con onda de choque

1.º **A plena tensión;** mayormente aún que en los ensayos de frecuencia industrial, la interpretación de los resultados está sujeta a caución.

El equipo estudiado mide la tensión en diferentes puntos del enrollado, la corriente entre un punto del primario y la masa, la corriente entre secundario y masa.

Los oscilogramas realizados con barrido muy rápido (gran amplificación de ambas escalas) permiten determinar la ruptura (falla) antes de la destrucción completa del aislamiento, por la aparición de descargas de alta frecuencia (mayores que un megaciclo) muy visibles en los gráficos.

2.º **A tensión reducida con el oscilógrafo de repetición:** la interpretación de los resultados a plena tensión da lugar a dificultades que se simplifican mucho con el estudio de la repartición de las tensiones a lo largo de los enrollados, en función del tiempo; este estudio se hace con ayuda de un generador de choque de acción periódica y de un oscilógrafo sincronizado con el generador. Se pone así en evidencia la frecuencia propia de los enrollados y los instantes y los puntos donde las tensiones son las más elevadas.

Estos resultados aclaran mucho y, sobre todo, permiten guiar mejor los ensayos con ondas de choque a plena tensión.

Los ensayos a tensión reducida pueden hacerse en transformadores fuera de sus estanques; se puede también reemplazar el circuito magnético (que juega el papel de la masa) por una plancha de cobre que no esté puesta en corto circuito.

Estos ensayos han permitido abordar el importante problema del paso de una onda de choque del primario al secundario de un transformador. Los transformadores son con bastante frecuencia empleados como pararrayos entre la red aérea y los alternadores. Parece sin embargo que las ondas de choque pasan bastante bien por los transformadores.

Valor del ensayo con ondas de choque

Este ensayo no se practica sistemáticamente en Europa; los constructores temen que su realización sea a cuenta de una fatiga peligrosa en el aislamiento, sin aportar una seguridad mayor que la que representa la experiencia del comportamiento de sus equipos en servicio en las redes eléctricas.

Parece que el examen preciso de los oscilogramas, tanto a tensión reducida como a plena tensión, puede dar informaciones preciosas en el futuro, tanto al fabricante como al usuario. Parece sin embargo necesario el precisar la técnica antes de hacer el ensayo de ondas de choque como una prueba de rutina o de tipo, por lo menos.

LOS LABORATORIOS UNIVERSITARIOS E INDUSTRIALES DE GRENOBLE

Grenoble es una pequeña ciudad de 100.000 habitantes, que se enorgullece de ser la capital de los Alpes franceses.

Fué en la región de Grenoble donde se aprovechó en 1868 la primera caída de gran altura (200 metros) y donde se realizó la tercera experiencia de transporte eléctrico de energía (1883).

Grenoble posee una Universidad, de la cual depende el Instituto Politécnico (Escuela Nacional Superior de Electrotecnia Hidráulica y Escuela Francesa de Papelería). El Instituto Politécnico y el Instituto Fourier (quien fué prefecto de Isère de 1804 a 1815), de la Facultad de Ciencias (Secciones de matemáticas y física), poseen diversos laboratorios, entre los cuales se cuentan:

El Laboratorio de Electroestática y de Física de los metales, dirigido por M. Neel, especialista en magnetismo. Se ha puesto a punto la fabricación de imanes permanentes de polvo de fierro puro, de fuerte campo coercitivo (del orden de 1.000 oersteds).

En Electroestática, M. Felici, estudiando el funcionamiento de las máquinas de influencia, ha trazado el perfil de los conductores que dan un campo superficial uniforme, y al colocar su máquina en aire comprimido, ha podido obtener una potencia por unidad de peso notable. Ayudado por la Sociedad Anónima de Máquinas Electroestáticas, ha podido pasar a la fabricación industrial de máquinas que dan 70.000 volts y 100 microamperes y prototipos capaces de dar 200 kilovolts y varios miliamperes. Las aplicaciones de estas máquinas son numerosas (rayos X, ionización de los gases, etc.)

En el dominio de la electricidad, la Universidad está en relación con el laboratorio de ensayos de la sociedad Merlin-Gérin, fabricantes de equipo eléctrico. El laboratorio comprende esencialmente un alternador capaz de dar 18.000 volts, con una corriente de cortocircuito (simétrica) de 25.000 amperes. Acoplado a un transformador, permite ensayos directos de interruptores hasta 90 kilovolts y 490 megavoltamperes (normas francesas); hasta 800 MVA para 17.5 KV y en ensayos indirectos, permite alcanzar 4.500 MVA a 220 KV.

Esta instalación, destruída en 1944, ha sido reconstruída y puesta nuevamente en servicio en 1945.

Grenoble, es por otra parte, el país de la hulla blanca. El Instituto Politécnico posee un laboratorio de hidráulica que se consagra esencialmente al progreso de los métodos de medida; en particular ha perfeccionado el método de aforo químico de los ríos, mediante el empleo de una solución de bicromato de sodio (en lugar de sal marina), y su análisis colorimétrico bajo la acción de un reactivo especial. Se puede actuar así sobre concentraciones mucho más débiles, lo que puede ser cómodo para torrentes de montañas (de aguas claras) (poco utilizables en los ríos de aguas negras o coloreadas).

En la ciudad de Grenoble, funciona el Laboratorio Delfinés de Hidráulica, que es un laboratorio conectado a los Talleres Neyret, Beylier et Piccard Picquet (Neyrpic), fabricantes de material hidráulico (turbinas, válvulas, equipos de riego). Estos laboratorios realizan numerosos ensayos sobre modelos reducidos, ya sea sobre tranques y vertederos como sobre puentes, olas y mareas.

Han sido conducidos a perfeccionar sus dispositivos de medida y a tomar contacto con técnicos muy diversos para la explotación de sus modelos.

Han construido numerosos equipos para riego y participado en la elaboración de programas de valorización de terrenos en Africa del Norte particularmente. Estos estudios necesitan el concurso de técnicos de todas clases; geólogos, ingenieros civiles, agrónomos, topógrafos, a fin de alcanzar un resultado correcto.

Otros laboratorios (radio, industria del papel...) podrían ser descritos con interés; conviene señalar el contacto estrecho entre sus técnicos que resulta muy fructífero.

(Después de las conferencias se presentó una película sobre los transformadores de cuarzo, para uso en minas, de Merlin-Gérin.)