Durante los días 6 al 25 de julio pasado el catedrático de esta Escuela, Sr. Valencia, visitó los Institutos de Turbomáquinas y de Oleohidráulica de la Escuela Técnica Superior de Aquisgrán, invitado por los directores de los mismos. Los informes que siguen a continuación pretenden dar idea de la magnitud y actividades de aquellos centros de investigación.

INSTITUTO DE IMPULSORES A CHORRO Y DE TURBOMAQUINAS DE LA RWTH* AQUISGRAN.

Quaderns d'enginyeria

3(1981)2 p. 491-501

INTRODUCCION

A principio de siglo se construyó, junto al edificio principal de la RWTH de Aquisgrán, un Laboratorio de Máquinas que albergaba, entre otras, secciones de calderas de vapor, de gasógenos, etc. Posteriormente, se estableció sin muchas innovaciones en el mismo local el Instituto de Turbomáquinas, siendo su fundador Karl Leister y uno de sus directores W. Dettmering. Finalmente, en 1964 se decidió establecer el actual "Instituto de Impulsores a chorro y de Turbomáquinas". Para ello se retiraron las venerables máquinas que durante 60 años largos prestaron inestimables servicios a la Escuela Superior de Aquisgrán, se removieron los asentamientos de las mismas y en su lugar se instalaron las modernas secciones de compresores radiales y axiales (subsónicos y supersónicos) y turbinas de vapor y de gas. Esta labor de planificación y organización duró hasta 1970 y fue dirigida por el Prof. Gallus. El equipamiento es apropiado y completo: en dispositivos de medida (sondas convencionales, de hilo caliente, anemómetros láser, etc), en elementos de cálculos (múltiples microcomputadoras, una unidad de cálculo de gran potencia propia y un terminal con el centro de cálculo de la RWTH de Aquisgrán), en talleres mecánicos y eléctricos perfectamente dotados (tornos, fresadoras, copiadoras, etc) y en recintos acondicionados para el personal (despachos, oficinas técnicas, biblioteca) y para la docencia (aula con capacidad de 50 alumnos y dotada de modernos medios audiovisuales). En cierta medida, el Instituto es autosuficiente en cuanto a la construcción de prototipos y sondas de medida.

PERFIL DEL CONSEJERO CIENTIFICO DEL INSTITUTO, PROF. GALLUS

Heinz Eckhard Gallus nació el 20.1.1931 en Waldenburg-Dittersbach (Silesia, hoy Polonia) En 1937 ingresó en la Escuela nacional de su pueblo natal, donde estuvo hasta 1942, en que fue a una escuela de grado superior. Coincidiendo con el final de la 2a. Guerra Mundial vio interrumpidos sus estudios entre 1944 y 1946 y una vez estabilizada la situación pudo reanudar los mismos, obteniendo en 1951 el diploma de bachiller. Desde 1951 hasta 1956 estuvo en la Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule de Aquisgrán, especializándose en máquinas de fluidos (volumétricas y turbomáquinas, de fluido comprensible o incomprensible) di -

* Rehinisch-Westfälischen Technische Hochschule

plomándose con la máxima nota por un trabajo titulado "Investigaciones teóricas sobre la turbina de paletas" (de funcionamiento semejante a la bomba volumétrica de paletas). Casado en 1957 con Elisabeth Goetz , ha tenido tres hijos: Andreas nacido en el 1959, Cornelia en 1960 y Corinna en 1965.

Su experiencia industrial la obtuvo en varias empresas de construcción de máquinas (Carl Wolffgram, Niederschlesische Bergbau-AG, Potthof & Flume, Harpener Bergbau-AG, STEAG, AEG-Turbinenfabrik y Westfalia Lünen).

En cuanto a la actividad científica pueden distinguirse tres etapas: a) *entre 1957 y 1963* en que estuvo trabajando en su tesis doctoral titulada "Contribución a la medida y cálculo de tensiones en discos planos giratorios con simetría de rotación alterada (mediante orificios irregularmente distribuidos)" y dirigiendo las prácticas de laboratorio sobre turbinas de vapor y compresores; b) *desde 1963 hasta 1970*, período dedicado a la remodelación del nuevo Laboratorio y a la redacción de los libros de texto y de problemas de las asignaturas impartidas en el Instituto; la tesis fue leída el 24-5-1969 consiguiendo la máxima calificación; y c) *la fase actual, iniciada el 19-6-1970* al ser nombrado consejero científico y Profesor numerario de turbomáquinas, y que se caracteriza por un espectacular despliegue de su labor investigadora, como podremos comprobar en el apartado dedicado a comentar sus publicaciones.

El Prof. Gallus es miembro de la Asociación de Ingenieros alemanes (VDI), de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), (miembro de los comités de turbomáquinas y de dinámica de estructuras) y de la Sociedad Alemana de vuelos aéreos e interplanetarios (DGLR).

Enseñanzas impartidas

Una visión general de conjunto, nos la ofrece el Cuadro 1.

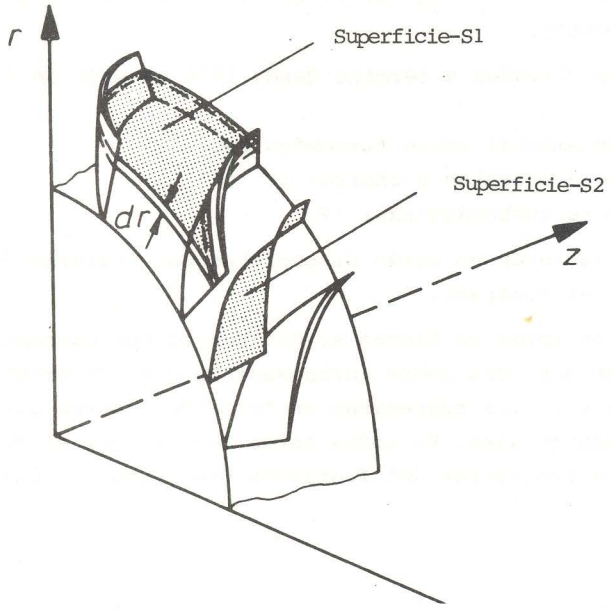
Se trata de un cuerpo de tres asignaturas principales: Generalidades sobre Turbomáquinas, Cálculo de turbomáquinas y Aplicaciones de las mismas, y de un conjunto de tres asignaturas complementarias: Construcción y acabado de turbomáquinas, Temas especiales y Técnicas de medida, cada una de ellas se desarrolla en un semestre, siendo la primera obligatoria para todos los alumnos de la Facultad de Máquinas y las 5 restantes sólo para los de la especialidad en turbomáquinas.

A lo largo de varios años de experiencia el Prof. Gallus ha conseguido estructurar perfectamente todas estas disciplinas, disponiendo en todos los casos de libros de texto, colecciones de problemas resueltos y explicados que se reparten gratuitamente a los asistentes (pero no publicadas hasta la fecha), diapositivas, trasparencias y películas. Las clases de teoría y problemas se explican una a continuación de otra en una mañana (2 horas de teoría, descanso, 2 horas de problemas), estando presentes en las primeras dos horas los profesores ayudantes que comentarán a continuación los problemas correspondientes al tema dado. Periódicamente, el Prof. Gallus reajusta los programas incorporando las nuevas realizaciones y puntos de vista obtenidos en la investigación llevada a cabo por los doctorados, como ha sucedido recientemente con los compresores supersónicos y el flujo no permanente en turbomáquinas. Los temas tecnológicos propiamente dichos son tratados por especialistas de la Industria correspondiente.

Investigación llevada a cabo

Se centra en dos líneas fundamentales (ver Cuadro 2): flujo permamente y flujo no permanente en turbomáquinas, subdividiéndose cada una en múltiples secciones que estudian compresores y turbinas axiales y compresores radiales, y teniendo en cuenta distintas facetas como son el flujo subsónico, el flujo supersónico, el rozamiento, las estelas, el número de

álabes, el grado de turbulencia, la amortiguación aeroelástica, etc.



En cada caso se procede de un modo semejante: se inicia el estudio del problema desde el punto de vista teórico; al poco se deciden las magnitudes características cuya variación debe ser conocida y se prepara la instalación piloto donde se efectuarán las medidas experimentales. La comparación entre los valores experimentales propios y de otros investigadores, y los resultados teóricos, permitirá rectificar el modelo hasta llegar a una coincidencia satisfactoria.

Entre los trabajos existe una gran variedad, pues se realizan desde los de índole marcadamente teórica (obtención de soluciones analíticas que representen un fenómeno determinado con mejor precisión que las soluciones existentes), hasta los que son en exclusiva experimentales. Sin embargo las líneas de investigación que más abundan son las que podemos clasificar de mixtas, caracterizadas por una parte experimental, muy importante, apoyada en un módelo matemático, consistente en el conjunto de soluciones halladas mediante métodos numéricos a partir de las ecuaciones en derivadas parciales no lineales, que configuran el problema . Los trabajos de investigación efectuados como tesis doctorales se publican a su término y sus resultados se incorporan al programa habitual impartido a los alumnos de especialidad "turbomáquinas"; en cambio los trabajos que proceden de encargos de industrias de la especialidad constituyen materia no difundible, conociéndose de las mismas solamente el título.

El modo de proceder al abordar un problema de investigación lo podemos ver expuesto en el cuadro 3.

Publicaciones

La lista completa comprende hasta la fecha 103 títulos que pueden clasificarse por materias como sigue:

a) relacionadas con turbomáquinas: 34
b) propulsión a chorro: 63
c) turbomáquinas: 35

(algunos artículos se incluyen por su temática en dos epígrafes).

Las tesis dirigidas por el Prof. Gallus se distribuyen a lo largo del tiempo de la siguiente forma:

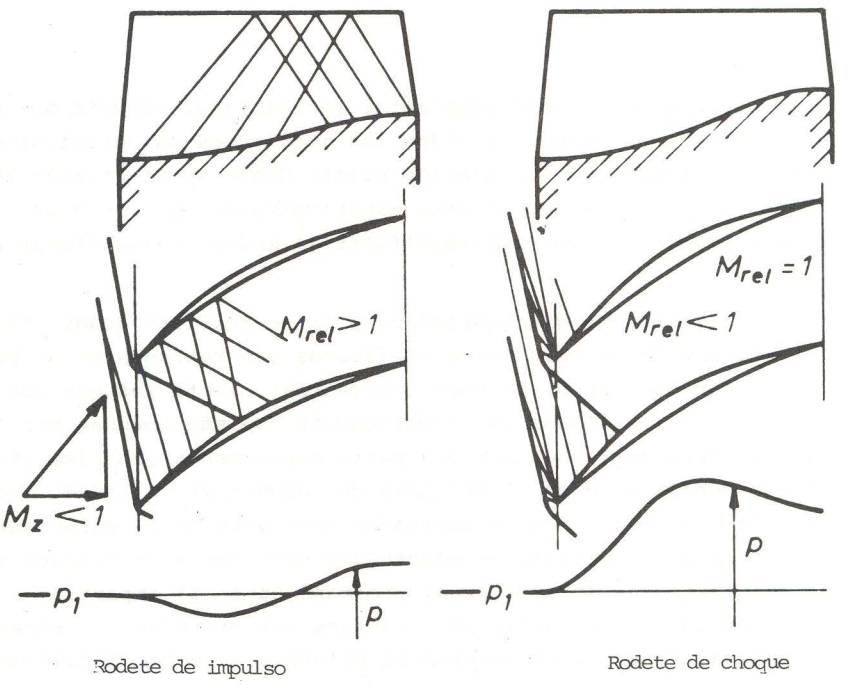
1973: 1; 1071: 2; 1975: 3; 1976: 3; 1977: 2; 1978: 1; 1979: 1; 1980: 3; 1981: 3.
En algunas ha sido codirector.

El número de proyectos llevados a término desde 1970 ha sido de 51 repartidos de la forma siguiente:

a) investigación fundamental sobre turbomáquinas: 21
b) investigación sobre aparatos a chorro: 18
c) investigación sobre turbomáquinas: 12

Muchas de estas publicaciones no están disponibles por tratarse de encargos de la industria y especificarlo así el contrato.

Las obras aparecidas en forma de libros se dividen en dos categorías: a) las publicadas por editoriales y que son dos, una sobre turbomáquinas como intercambiadores de energía y otra sobre turbomáquinas y b) las aparecidas en forma de apuntes que cubren el programa de las tres asignaturas fundamentales. En todas estas actividades el Prof. Gallus colabora estrechamente con los otros Profesores del Instituto Dipl. Ing. O. David y Dr. Ing. G. Dibelius.



Vistas en planta y en alzado de los rodetes de los dos tipos de compresores supersónicos diseñados, fabricados y analizados en el Instituto.
Distribución de presión a lo largo de las mismas.

Cuadro 1

Enseñanzas impartidas por el Prof. Gallus

Generalidades sobre turbomáquinas	Cálculo de turbomáquinas	Aplicaciones de las turbomáquinas	Construcción y acabado de turbomáquinas	Temas especiales sobre turbomáquinas	Técnicas de medida en turbomáquinas
Definiciones Termodinámica Propiedades del fluido Rejilla de álabes Estudio de una célula Volutas Regulación	Flujo bidimensional Flujo tridimensional Estudio de las pérdidas Curvas características Regulación Cavitación Refrigeración	Clasificación Bombas y sistemas de bombas (potencias, funcionamiento y formas constructivas) Compresores y ventiladores (clasificación, refrigeración)	Alabes Ejes Cojinetes Carcasa Juntas estanqueidad Organos de regulación	Capa límite Diferencias finitas Pérdidas secundarias Optimización Flujo no permanente	Medida de -temperatura -presión -velocidad -empujes -ruido -oscilaciones Cálculo de errores
Problemas	Problemas	Problemas	Problemas		Problemas

De todas las disciplinas se imparten cada semana 2h. de teoria y 2h. de problemas

En estas asignaturas colaboran con el Prof. Gallus otros profesores del Instituto y conferenciantes invitados de industrias específicas.

Cuadro 2

Resumen de las actividades de investigación en el campo de la aerodinámica de turbomáquinas

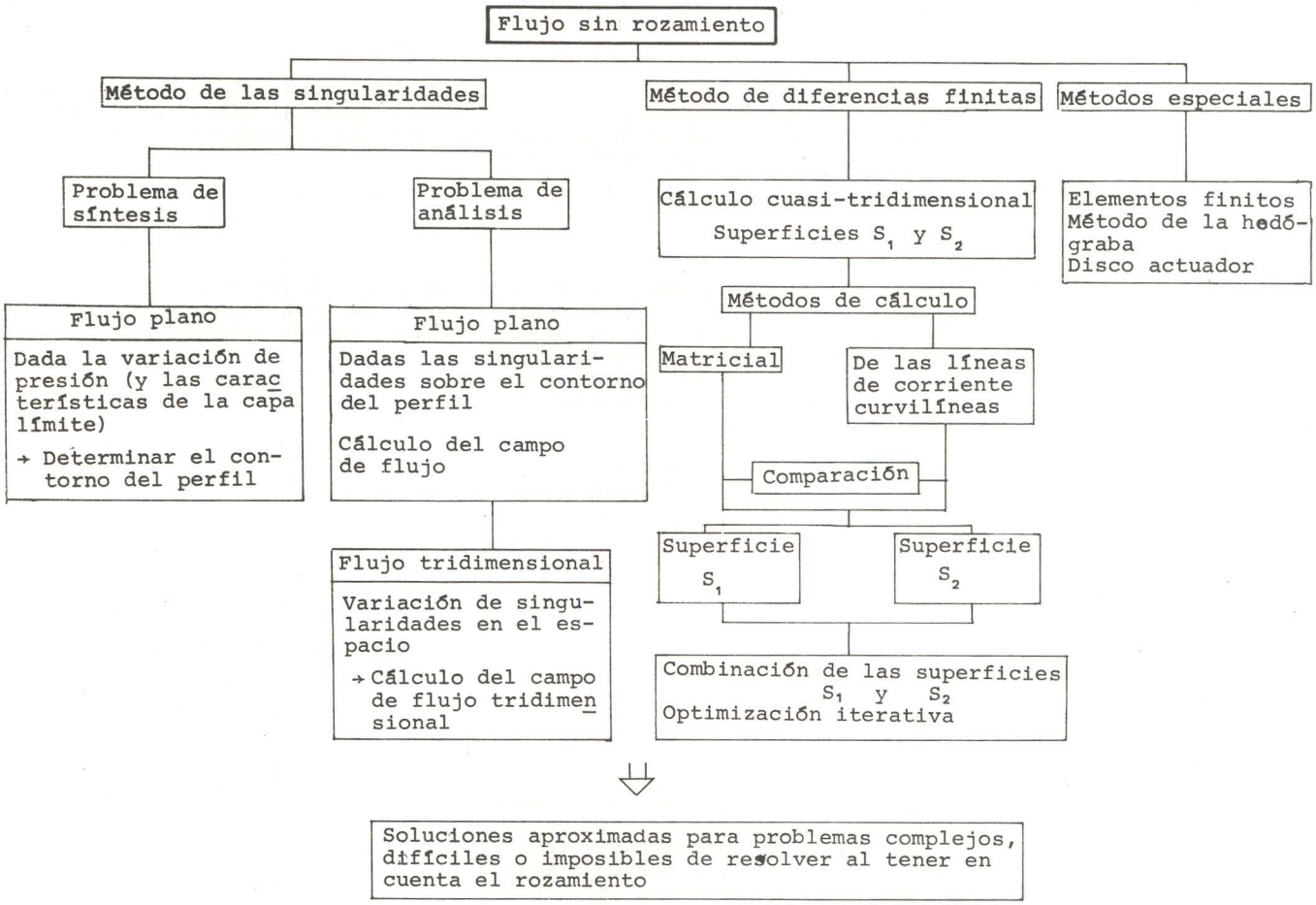
Problemas estudiados	compresor axial	turbina axial	compresor-radial
1. FLUJO PERMANENTE EN TURBOMAQUINAS 1.1 Procedimientos de cálculo para flujo sin rozamiento, compresible y tridimensional			
1.1.1 Flujo subsónico	1.- Procedimiento de diferencias (principio de Wu) sobre las superficies S_1 2.- Procedimiento de diferencias (Principio de Wu); cálculo interativo sobre las superficies S_1 y S_2		Procedimiento de diferencias (Principio de Wu). Cálculo sobre una superficie media S_2 y varias superficies S_1
1.1.2 Flujo supersónico	Cálculo de un rodete de ventilador supersónico 1.- Procedimiento de las líneas de corriente 2.- Procedimiento de las iteraciones temporales 3.- Procedimiento de las características (flujo con simetría de rotación)		
1.1.3 Flujo supersónico -choque-subsónico	Cálculo de un rodete de ventilador supersónico con choque en el mismo. Procedimiento de las líneas de corriente teniendo en cuenta las pérdidas en el choque.		
1.2 Cálculo teniendo en cuenta el rozamiento en perfiles y paredes. Flujo secundario.	Investigación teórica del flujo tridimensional con rozamiento en un compresor axial teniendo en cuenta especialmente las capas límite de las paredes laterales	capas límites en paredes laterales y efectos de flujo secundario en rejillas de turbinas con fuerte curvatura. Cálculo previo de coeficientes de pérdida e influencia de las características del flujo de llegada sobre la energía específica.	Se tiene en cuenta el rozamiento en la pared y de la zona de estelas mediante expresiones empíricas. Investigaciones teóricas incluyendo los fenómenos de rozamiento en los canales del rodete y en los canales del difusor de enlace entre dos células de un compresor radial de elevada presión.
1.3 Investigación experimental y comparación de resultados de medida con los resultados de cálculo	Medidas en una célula de compresor axial 1.- Variación de la presión en el perfil aerodinámico 2.- Variación de la presión en las paredes laterales (carcasa) 3.- Campo de velocidades en en plano axial 4.- Medidas de la capa límite en la pared lateral	Medidas en una célula de turbina axial 1.- Variación de la presión en el perfil aerodinámico 2.- Campo de velocidades en el plano axial 3.- Variación de las pérdidas 4.- Flujo secundario y disposiciones para reducirlo	Medida de la influencia de la capa límite en la pared lateral en el canal del rodete reduciendo la capa límite o generando turbulencia Investigación experimental incluyendo los fenómenos de rozamiento en los canales del difusor de enlace entre dos células de un compresor radial de elevada presión

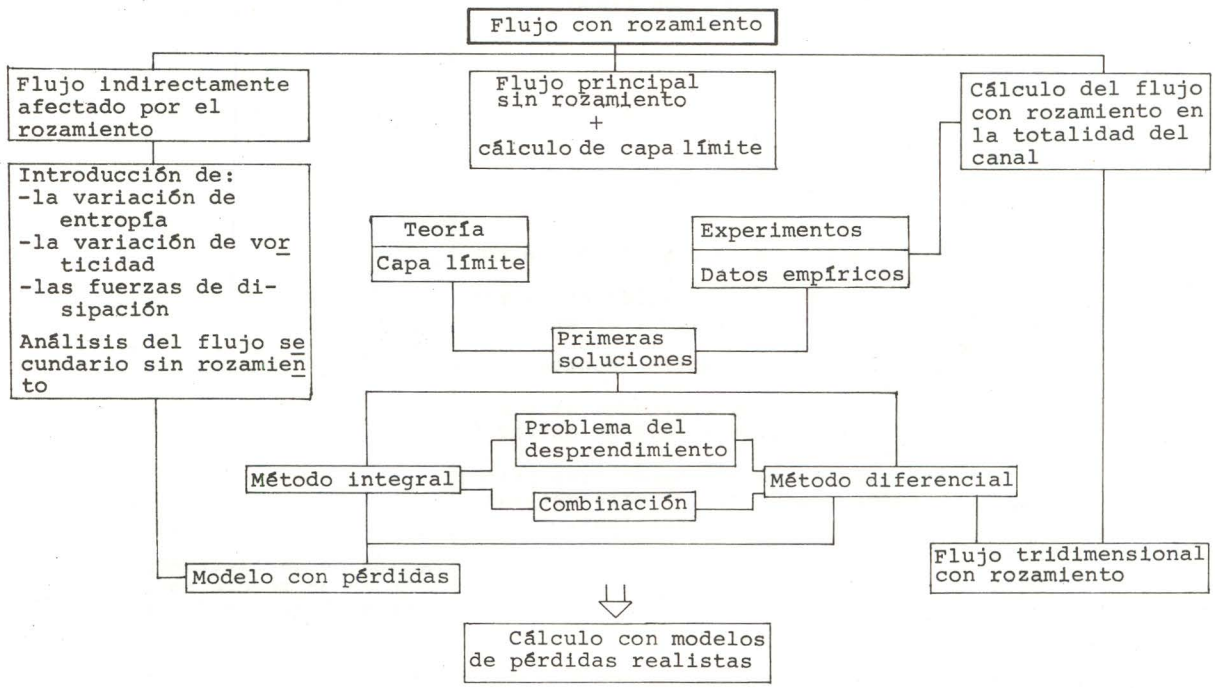
Cuadro 2 (continuación)

Problema estudiado		
2. FLUJO NO PERMANENTE EN TURBOMAQUINAS 2.1. Procedimiento de cálculo para flujo sin rozamiento, compresible, bidimensional		
2.1.1 Teoría potencial. Efecto recíproco en una rejilla en flujo subsónico (a la entrada y a la salida)	1.-Cálculo cuasipermanente (Cálculo de la variación de presión a lo lardo del perfil aerodinámico) 2.-Cálculo no permanente	Contribución al cálculo del flujo en células de compresores radiales
2.1.2 Efecto de la estela en flujo subsónico (a la salida)	Cálculo del flujo subsónico bidimensional,sin rozamiento,no permanente y compresible en determinadas rejillas de compresores y turbinas axiales teniendo en cuenta la influencia de estelas a la entrada (álabes rígidos)	Análisis teórico del flujo en el rodete de ventilador radial con voluta espiral incorporada.
2.1.3 Estudio de los parámetros principales 1. Ancho de la ranura axial 2. Forma de la estela 3. Número de álabes del rodete y nº de álabes del difusor 4. Grado de turbulencia 5. Variación del flujo	Variación de los parámetros principales y su interdependencia.	
2.1.4 Amortiguación aeroelástica en álabes oscilantes	Cálculo del flujo subsónico bidimensional,sin rozamiento,no permanente y compresible en determinadas rejillas de compresores y turbinas axiales teniendo en cuenta la influencia de estelas a la entrada en álabes oscilantes. Determinación de la amortiguación aeroelástica de los álabes.	
2.1.5 Alabes oscilantes en flujo supersónico (excitación exterior y autoexcitación)	Como en 2.1.4 pero con flujo supersónico	
2.2 Medida y comparación con los resultados del cálculo		
2.2.1 Flujo subsónico 2.2.2 Flujo supersónico	1.Variación de la presión en la pared (carcasa) 2.Variación de la presión en el perfil,a) en el difuosr; b) en el rodete 3.Medidas en la estela (rodete y difusor) 4.Medidas en los apartados a) y b) con y sin directrices de entrada compresor 5.Variación de los parámetros principales (según 2.1.3) para células de compresores y turbinas.	
2.2.3 Efectos recíprocos en la rejilla e interación entre capa límite y onda de choque en flujo supersónico		Medida de la fluctuación de presión en un rodete radial para distintos puntos de funcionamiento

Cuadro 3

Modo de proceder en los diversos problemas de investigación





Cuadro 3 (continuación)

Cálculo transónico y supersónico

- **Flujo bi- y tridimensional**
  - Flujo plano
    - Flujo supersónico en rejillas y células; rejillas en tándem, rejillas supercríticas. Problemas de diseño
    - Flujo mixto sub y supersónico
      Procedimientos
      - de las iteraciones temporales
      - de las líneas de corriente
      - de las singularidades (sin choque)
    - Efectos recíprocos
      - rodete-difusor
      - capa límite-onda choque
  - Flujo espacial
    - Procedimientos de las características cuasi- y tridimensionales con zonas sónicas intercaladas
- **Aplicación a un compresor**
  - Extrapolación del flujo plano a un compresor
    - Rodete con impulso
    - Rodete con choque
- **Rendimiento; Regulación**
  - Optimización del rendimiento y la regulación mediante:
    - geometría variable
    - pequeña relación cubo-radio exterior
    - zonas sónicas intercaladas

⇓

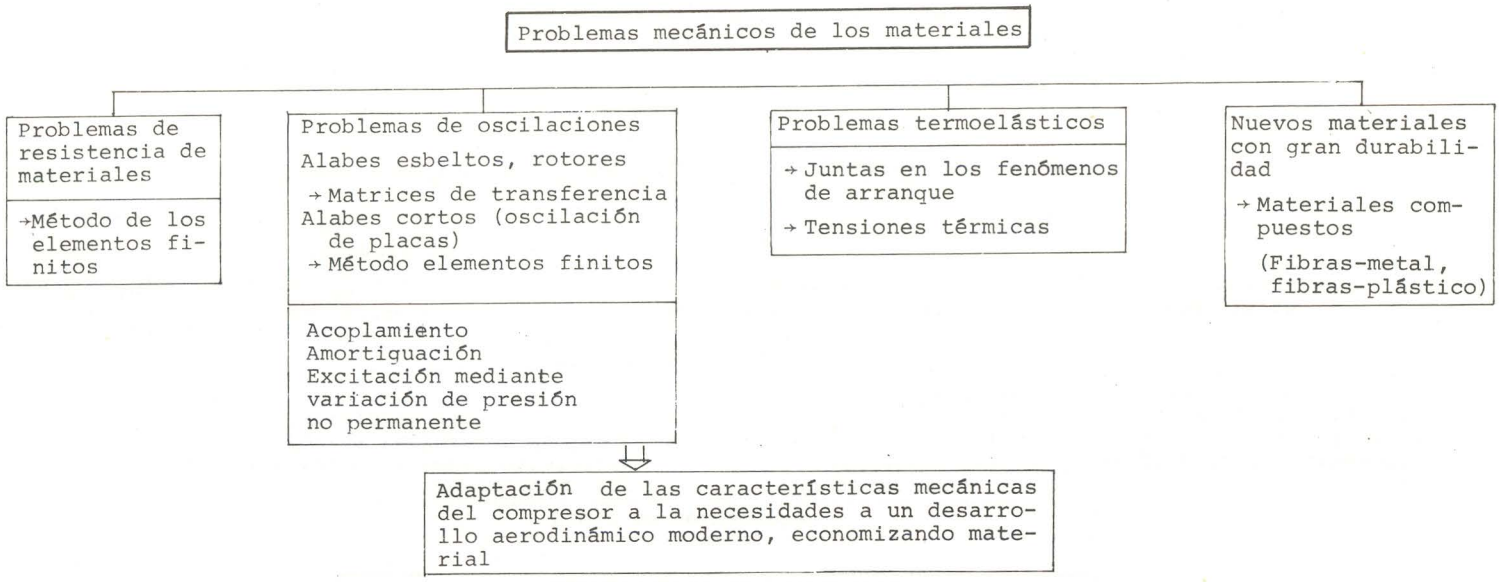
Gran concentración de potencia y optimización del rendimiento y la regulación

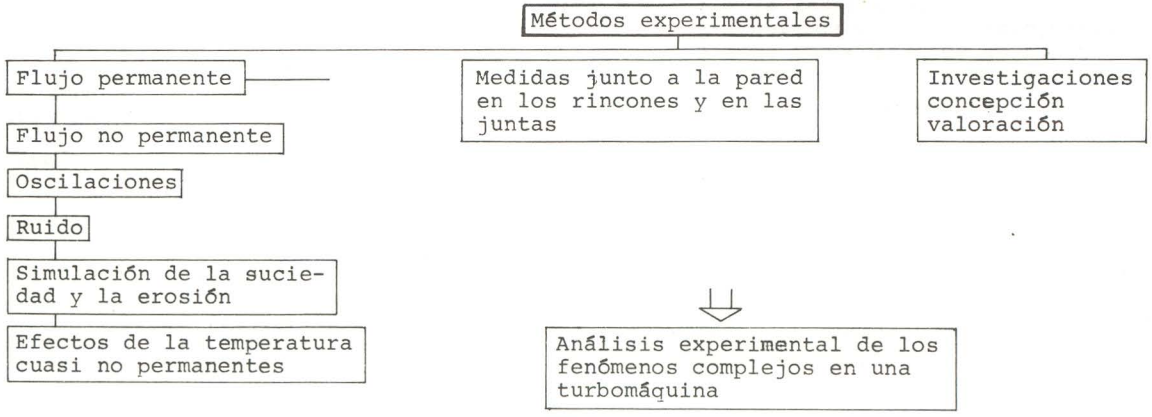
Aerodinámica no permanente

- **Flujo no permanente**
  - Causas: estrangulamiento giratorio
    efectos recíprocos de los álabes; distorsión
  - Efectos: variación de presión no permanente
    coeficientes de empuje fluctuantes
    momentos de empuje fluctuantes; influencia de capas límite
- **Generación de la solución**
  - Rejilla bidimensional sin rozamiento con flujo de llegada no uniforme
    - Influencia de la teoría potencial
      - Incompresible, siendo el tiempo un parámetro supuesto;
        - Procedimientos de las singularidades y de las diferencias
    - Influencia de la estela
      - Tiempo como variable independiente (método de secciones temporales)
        → Procedimiento de las diferencias
        Método integral simplificado aplicado a un perfil aislado
        → Método de las singularidades
  - Rejilla bidimensional sin rozamiento
  - Capa límite no permanente

⇒ Expresiones simplificadas para el cálculo previo de los efectos del flujo NO permanente

Cuadro 3 (continuación)





Cuadro 3 (continuación)

Aeroelasticidad

Acoplamiento del campo de flujo con las características de la estructura de las turbomáquinas

a) Generación de oscilaciones en los álabes a causa de una variación de presiones no permanente

b) Influencia recíproca entre álabes oscilantes y campo de flujo

⇓

Análisis de la relación entre flujo no permanente y oscilaciones

Máquina segura en su funcionamiento

Ruido

Causas:
- sonido en campo giratorio
- ruido de interferencias
- ruido del campo giratorio
- ruido de vórtices
- oscilaciones mecánicas
- oscilaciones del gas

Análisis de las causas del ruido y medidas a tomar para reducirlo

⇓

Máquina de funcionamiento agradable de acuerdo con el ambiente

Comportamiento en marcha

a) Funcionamiento permanente

Previsión del desprendimiento y de los límites de bombeo para una célula y para toda la máquina

Cálculo previo de curvas características teniendo en cuenta el bloqueo, las pérdidas, el desprendimiento y el bombeo

Regulación

b) Distorsión de temperatura distorsión de presión

c) Ensuciamiento de la máquina

Simulación
Parámetros que influyen
Formas constructivas
Influencia del funcionamiento

⇓

Previsión exacta del funcionamiento de compresores multicelulares