

INSTITUTO DE INVESTIGACION TECNOLÓGICA

Alberto Aguilera, 23
28015-Madrid
Teléf.: 248 36 00

MODELO DE PLANIFICACION A LARGO PLAZO DE LA RED

ANALISIS FUNCIONAL

Junio, 1988.

ANALISIS FUNCIONAL

INDICE

- 1. Especificación general del modelo.**
- 2. Definición global de la metodología seleccionada.**
- 3. Alternativas principales existentes para la selección detallada de metodología de modelado y algoritmos.**
- 4. Definición detallada de la metodología seleccionada para la Fase I.**
 - 4.1. Módulo de inversión y de generación automática de planes (problema maestro).**
 - 4.2. Módulo de explotación (subproblema).**
 - 4.2.1. Módulo de costes variables de explotación.**
 - 4.2.2. Módulo de restricciones de fiabilidad.**
- 5. Criterios de evaluación de una metodología.**
- 6. Evaluación de la metodología seleccionada para la Fase I.**

1. ESPECIFICACION GENERAL DEL MODELO

ESPECIFICACIONES GENERALES

- Modelo de planificación estático a largo plazo (15 a 20 años):
 - Definición de los ejes básicos de transporte.
 - Ayuda en la determinación de las características básicas de la estructura de la red: nivel de mallado y tensiones.
- Modos de utilización del modelo:
 - A) Generación automática del plan óptimo.
 - B) Evaluación de un plan propuesto por el usuario.
- Plan óptimo es el que minimiza el coste anual total definido como:
Coste total= coste de inversión + coste de explotación + coste de indisponibilidad.
- Modelo permita obtener medidas de sensibilidad:
 - Con respecto a previsiones: demanda, generación.
 - Factores que determinan el plan óptimo.
- El sistema eléctrico esté definido por áreas de generación (unas 50) unidas por corredores de transporte (unos 100).
- Las alternativas de expansión serán definidas por el usuario.
- Planteamiento del modelo y del proceso de optimización sea modular y expandible: Sean posibles mejoras/sustituciones de los submodelos y algoritmos de optimización.
- La versión inicial (Fase I) debe ser un producto industrial útil.
- Modelo permita recoger la incertidumbre existente en la planificación:
 - Demanda
 - Hidraulicidad
 - Disponibilidad de generación y red

MODELO ESTÁTICO DE PLANIFICACION A LARGO PLAZO DE LA RED

DATOS:

- Demanda y generación previstas para año objetivo, con/sin incertidumbre.
- Red existente y comprometida.
- Alternativas de expansión de red: datos técnicos y económicos.
- Costes unitarios de explotación y de indisponibilidad.
- Características disponibilidad de equipo generador y red.
- Restricciones específicas de expansión, explotación y fiabilidad.
- Modo de utilización:
 - A) Automático: Programa selecciona plan expansión óptimo.
 - B) Interactivo: Programa evalúa plan expansión propuesto por usuario.

MODELO DE PLANIFICACION:

MODULO DE INVERSION Y
GENERACION AUTOMATICA DE
PLANES (modo utilización A)

MODULO DE EXPLOTACION:
COSTES DE EXPLOTACION Y
ANALISIS DE FIABILIDAD

RESULTADOS:

Modo utilización A:

- Plan óptimo de expansión de la red: alternativas seleccionadas.

Modos utilización A y B:

- Costes de inversión, explotación e indisponibilidad.
- Medidas de sensibilidad.

2. DEFINICION GLOBAL DE LA METODOLOGIA SELECCIONADA

DIRECTRICES GENERALES PARA LA METODOLOGIA A ADOPTAR

- Modelo estático de optimización (extensible a dinámico).
- Modelo lineal de red. Alternativas:
 - Modelo de transporte.
 - Flujo de cargas en continua (*).
- Indisponibilidad considerada como coste en la función objetivo y/o restricción en el proceso de optimización.
- Algoritmo de optimización global: descomposición (Benders) en problema maestro (inversiones) y subproblemas (explotación, fiabilidad). Ventajas:
 - Eficacia de cálculo (reduce la dimensión del modelo).
 - Modular, permite mejorar los modelos.
 - Separa formulaciones de características diferentes:
 - Problema de inversiones (básicamente lineal y con variables discretas).
 - Problema de explotación (básicamente con variables continuas; la formulación de red, puede no ser lineal originalmente, pero sí tras la descomposición).
 - Se resuelven varios problemas reducidos en lugar de uno grande.

El problema maestro de optimización de inversiones es lineal aunque los subproblemas de explotación no lo sean.

(*) Puede llevar a formulaciones no lineales del problema de optimización.

MODELO DE PLANIFICACION

(Modo de utilización A)

PLANTEAMIENTO

- Seleccionar plan factible y con mínimo coste:

Coste total:

Costes de inversión +

+ costes de explotación +

+ costes de indisponibilidad (deseable, no se incluiría en una primera versión).

- Restricciones:

- Restricciones específicas de expansión: financieras, limitaciones de capacidad, tipos de circuito utilizables, márgenes de capacidad instalada, otras.
- Restricciones de explotación: flujo de cargas, capacidades disponibles de generación y transporte, márgenes de reserva/seguridad en explotación, otras.
- Restricciones de fiabilidad en planificación: cotas superiores o inferiores de índices de fiabilidad, criterios pasa/no pasa para contingencias, otras. (Determinados planes de expansión resultarán infactibles a causa de esta restricción).

FORMULACION DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACION

(Modo de utilización A)

FORMULACION GLOBAL

- Variables:
 - Alternativas de expansión "x" (refuerzos de la red).
 - Descripción de la explotación "y" (flujos en red, generaciones, potencia no suministrada).

- Función objetivo (coste total): $CT(x,y) = CF(x) + CVE(y) + CVI(y)$
 - $CF(x)$ = costes fijos de inversión.
 - $CVE(y)$ = costes variables de explotación.
 - $CVI(y)$ = costes variables de indisponibilidad (deseable, no se incluirían en una primera versión).

- Restriciones específicas a la expansión (inversión) como limitaciones en capacidad total de un corredor o en el volumen total de inversión:
 $RINV(x) \leq a$

- Restricciones de planificación en relación con fiabilidad:
 $RFIAPLA(x) \leq b$

- Restricciones de explotación (flujo de cargas, capacidad disponible de generación y transporte):
 $REXP(x, y) \geq h$

- Restricciones de explotación en relación con fiabilidad:

$$RFIAEXP(x, y) \leq k$$

- Problema de optimización:

$$\min_{x,y} CT(x, y) = CF(x) + CVE(y) + CVI(y)$$

x, y

$$\text{sujeito a: } RINV(x) \leq a$$

$$RFIAPLA(x) \leq b$$

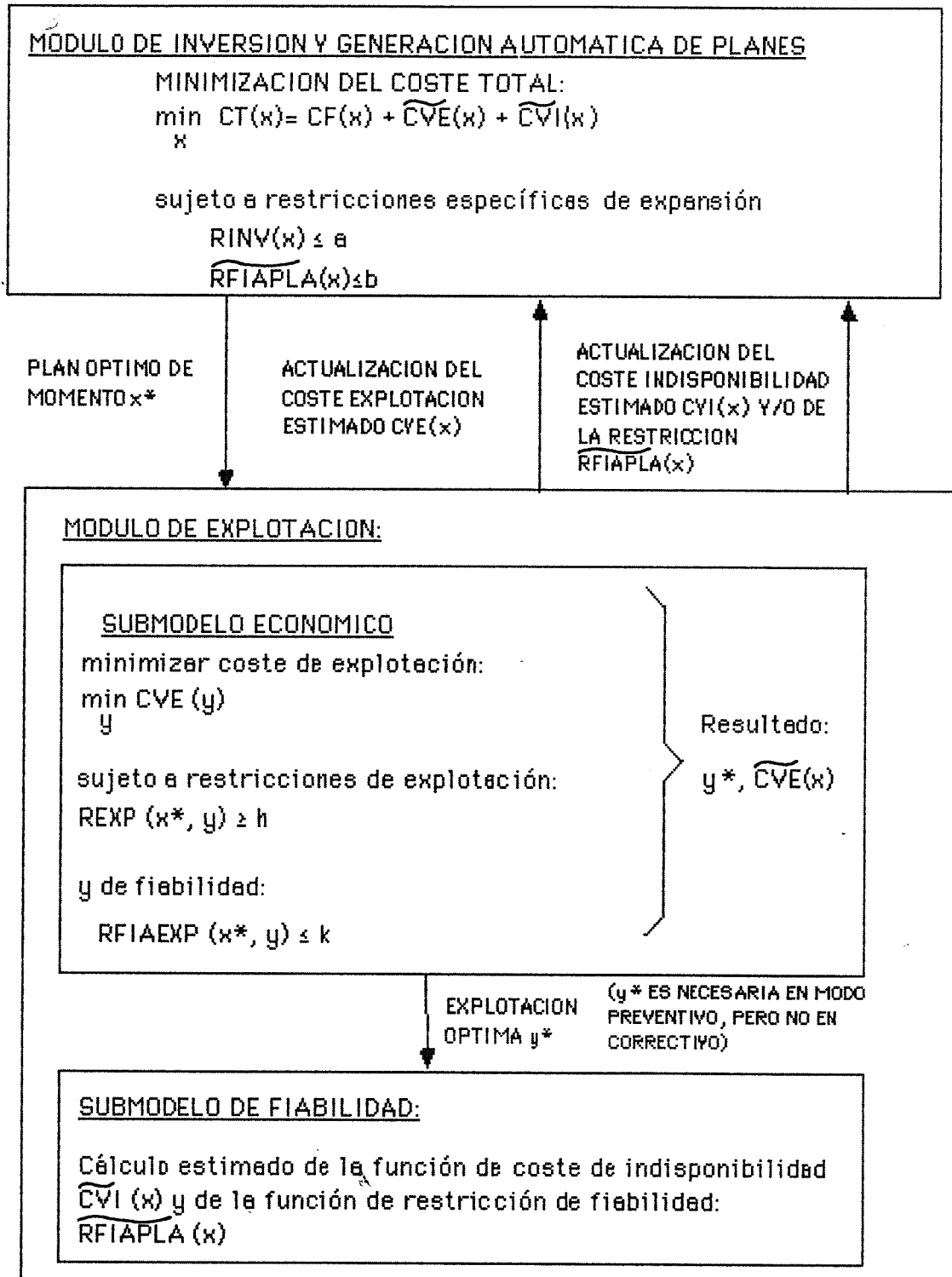
$$REXP(x, y) \geq h$$

$$RFIAEXP(x, y) \leq k$$

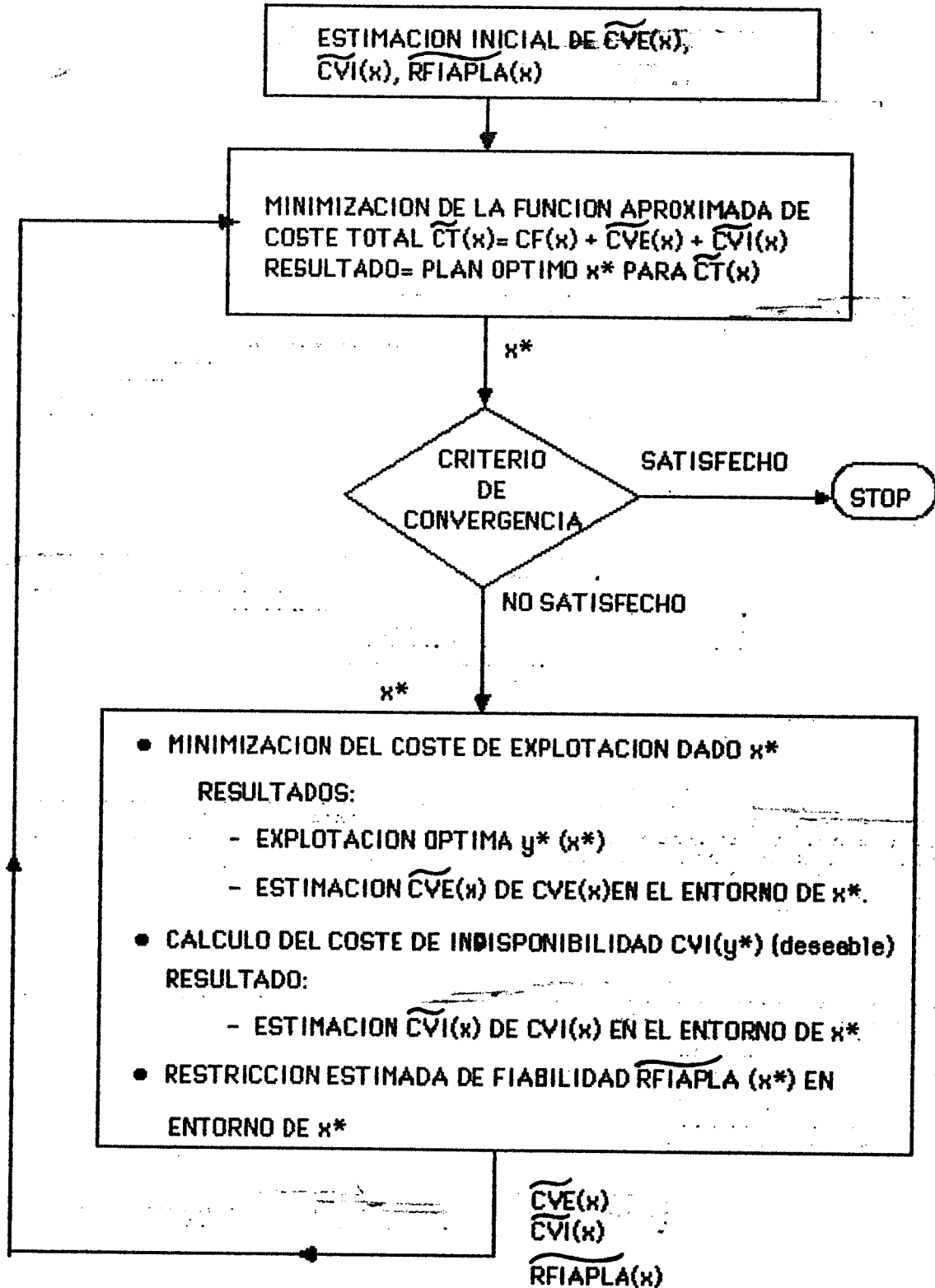
METODOLOGIA DE OPTIMIZACION

(Modo de utilización A)

DESCOMPOSICION DEL PROCESO DE OPTIMIZACION (BENDERS)



**PROCESO DE OPTIMIZACION
ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO**



**3. ALTERNATIVAS PRINCIPALES EXISTENTES PARA LA
SELECCION DETALLADA DE METODOLOGIA DE MODELADO
Y ALGORITMOS**

SELECCION DE METODOLOGIA
OPCIONES DE MODELADO Y ALGORITMOS

A) MODELOS DE RED:

- A.1. Transporte o lineal
- A.2. "Corriente continua" o linealizado
- A.3. Alterna
- A.4. Híbrido de A.1 y A.2
- A.5. Inclusión o no de pérdidas
- A.6. Implícito en la función objetivo de la optimización

B) MODELOS DE CALCULO DE FIABILIDAD:

- B.1. Determinista
- B.2. Lista de contingencias
- B.3. Probabilista:
 - B.3.1. Descomposición del espacio de estados
 - B.3.2. M. Carlo o simulación
 - B.3.3. Enumeración
 - B.3.4. Híbrido: red y generación
- B.4. Inclusión o no de acciones correctoras en cualquiera de los anteriores

C) ALGORITMO DE OPTIMIZACION:

C.1. Según enfoque global del algoritmo:

C.1.1. Optimización conjunta

C.1.2. Descomposición

C.1.3. Heurísticos de adición sucesiva de inversiones. Típicamente interactivo

C.2. Según enfoque del tratamiento temporal de las inversiones:

C.2.1. Modelos estáticos

C.2.2. Modelos dinámicos

C.2.3. Modelos de cobertura, sensibilidades

C.3. Según aspectos de la formulación:

C.3.1. Variables de inversión continuas

C.3.2. Variables de inversión discretas

D) MODELO DE CALCULO DE COSTES DE OPERACION:

D.1. Despacho económico

D.2. Despacho preventivo de seguridad:

D.2.1. Contingencias N-1

D.2.2. Márgenes u otros criterios

D.3. Acciones correctoras

E) MODELO DE DEMANDA:

- E.1. Situación de punta
- E.2. Escenarios múltiples
- E.3. Método de continuación u otros
- E.4. Modelado explícito de la incertidumbre

F) MODELO HIDRAULICO

- F.1. Valores medios
- F.2. Escenarios equiprobables
- F.3. Generación secuencial de estados

G) FUNCION OBJETIVO (FIGURA DE MERITO)

- G.1. Costes fijos/operación/indisponibilidad
- G.2. La fiabilidad como restricción

**4. DEFINICION DETALLADA DE LA METODOLOGIA SELECCIONADA
PARA LA FASE I**

SELECCION DE METODOLOGIA PARA LA FASE I

- A.1. Modelo de red de transporte, tratando en lo posible de extenderlo a corriente continua. Sin pérdidas.

- B.2. Fiabilidad considerada a través de lista consistente de contingencias para todos los planes. Se incluye redespacho de generación como acción correctora. Potencia hidráulica de emergencia según tipo de contingencia e hidráulicidad.

- C.1.2. Algoritmo de optimización por descomposición.
- C.2.1. Modelo estático.
- C.3.1 y 2. Variables de inversión continuas y discretas.

- D. Despacho económico con posibilidad de potencia no servida, con redespacho de generación como acción correctora. Se estudiará posible inclusión de margen de seguridad preventiva. Disponibilidades medias. Potencia hidráulica programada.

- E.2. Escenarios múltiples de demanda.

- F.2. Escenarios hidráulicos equiprobables. ?

- G. Costes de inversión y de explotación. Fiabilidad considerada como restricción.

4.1. MODULO DE INVERSION Y DE GENERACION AUTOMATICA DE PLANES (PROBLEMA MAESTRO).

DEFINICION GLOBAL

- Dada la red actual y la lista completa de todas las alternativas de expansión x , este módulo encuentra el plan (i.e., combinación de las alternativas de expansión propuestas) x^* que hace mínima la suma $CT(x)$ de los costes fijos de inversión $CF(x)$ y los costes de explotación $CVE(x)$, sujeto a las restricciones siguientes:
 - Restricciones específicas de expansión: toda aquella restricción existente sobre x que pueda expresarse en forma lineal $RINV(x) \leq a$. Nótese que la definición adoptada de x (ver más adelante), en especial cuando se usa la formulación en variables discretas, hace innecesarias muchas de estas restricciones. Típicamente incluirán limitaciones en el número máximo de líneas posibles en un corredor, tipos posibles de líneas, capacidad total máxima o mínima del corredor, limitación del volumen total de inversiones.
 - Restricciones de fiabilidad $RFIAPLA(x) \leq b$, que obligan a los planes a satisfacer un conjunto de condiciones pasa/no-pasa impuestas por el usuario.
- A fin de simplificar la formulación de este módulo de inversión, se recurre a un módulo de explotación (dividido en dos submódulos de

costes y de fiabilidad) que proporciona $CVE(x)$ y $RFIAPLA(x)$ en forma lineal, compacta y tan aproximada como sea necesario (cortes de Benders).

**FORMULACION CONCEPTUAL DEL MODULO DE INVERSION Y DE
GENERACION AUTOMATICA DE PLANES**

$$\text{MIN}_x \text{CT}(x) = \text{CF}(x) + \widetilde{\text{CVE}}(x) \quad (\text{Ver alternativa en página siguiente})$$

Sujeto a:

- Restricciones específicas de expansión

$$\text{RINV}(x) \leq a$$

- Restricción de fiabilidad:

$$\widetilde{\text{RFIAPLA}}(x) \leq b$$

- Definición de costes variables: $\widetilde{\text{CVE}}(x) \leq c$

donde:

CT: Costes anuales totales del plan

CF: Costes fijos de inversiones en la red

CVE: Costes variables de explotación del sistema eléctrico

$\widetilde{\text{CVE}}$: Función que aproxima a CVE; se obtiene del subproblema de costes variables de explotación.

x: Variables de expansión $\{x_{lk}\}$,

$$l = 1, \dots, L ; k = 1, 2, \dots, K_l$$

$\widetilde{\text{RFIAPLA}}(x)$: Función que aproxima RFIAPLA(x); se obtiene del subproblema de fiabilidad en el módulo de explotación.

RFIAPLA indica la magnitud de las violaciones de las restricciones pasa/no-pasa de fiabilidad impuestas por el usuario.

MODULO DE INVERSION Y GENERACION AUTOMATICA DE PLANES
FORMULACION ALTERNATIVA

$$\underset{x}{\text{MIN}} \text{ CT}(x) = \text{CF}(x) + \widetilde{\text{CVE}}(x) + \gamma \cdot \alpha(x)$$

donde γ es un factor de penalización; $\alpha(x)$ no es un coste monetario.

La restricción de fiabilidad pasa a ser:

$$\alpha(x) = \widetilde{\text{RFIAPLA}}(x) \leq b$$

y el resto no cambia. Si se suprime la restricción de fiabilidad, con la formulación resultante el problema maestro es siempre factible, pero se introduce una cierta arbitrariedad con la asignación de un valor numérico a γ .

DEFINICION DE LAS VARIABLES DE EXPANSION

- L corredores: $l = 1, \dots, L$
- K_l tipos de línea en corredor l : $k = 1, 2, \dots, K_l$
- Línea de tipo k en corredor l tiene coste h_{lk} , su capacidad es f_{lk} y su susceptancia es Y_{lk} .
- m_{lk} es el máximo número de nuevas líneas de tipo k que pueden ser instaladas en el corredor l . Para cada línea m , $m = 1, 2, \dots, m_{lk}$, se define una variable x_{lkm} que puede variar en el intervalo $(0,1)$ y que indica si la citada línea se instala (1) o no (0). Esta variable puede ser definida como continua o discreta.
- El nuevo número de líneas instaladas de tipo k en el corredor l es:
$$x_{lk} = \sum_{m=1}^{m_{lk}} x_{lkm}$$
- x_{lk}^0 es el número de líneas de tipo k ya existentes en el corredor l .
- La capacidad nominal del corredor es:
$$\bar{f}_l = \sum_{k=1}^{K_l} \bar{f}_{lk} \cdot x_{lk} + \bar{f}_l^0$$
- La susceptancia nominal del corredor es:
$$Y_l = \sum_{k=1}^{K_l} Y_{lk} \cdot x_{lk} + Y_l^0$$
- Se considerarán $K_l = 4$ tipos posibles de línea como máximo en cada corredor l : circuito sencillo y doble, tanto en 220 kV como en 400 kV. En el coste h_{lk} de cada tipo de línea está incluido el coste fijo de su derecho de paso.

FORMULACION PRECISA DEL PROBLEMA MAESTRO (INVERSION)

FORMULACION BASICA

$$\min_x CT(x) = \sum_{l,k,m} h_{lkm} \cdot x_{lkm} + \widetilde{CVE}$$

Sujeto a:

$$RINV(x) \leq a$$

$$\widetilde{CVE} \geq CVE(x^*_i) + \mu(x^*_i) \cdot (x - x^*_i), i = 1, 2, \dots, l$$

donde l es el número de iteraciones ya realizadas del algoritmo de Benders.

$$\widetilde{RFIAPLA} \leq b$$

$$\widetilde{RFIAPLA} \geq RFIAPLA(x^*_i) + \eta(x^*_i) \cdot (x - x^*_i), i = 1, 2, \dots, l$$

FORMULACION ALTERNATIVA

$$\min_x CT(x) = \sum_{l,k,m} h_{lkm} \cdot x_{lkm} + \widetilde{CVE} + \gamma \cdot \widetilde{RFIAPLA}$$

y el resto igual, pudiéndose eliminar la restricción $\widetilde{RFIAPLA} \leq b$; (lo que garantizaría que el problema maestro fuese siempre factible)

El criterio de convergencia del algoritmo iterativo es el clásico en Benders: que la diferencia entre el peor $CT(x)$ obtenido en el problema maestro y el mejor $CT(x)$ obtenido a partir del subproblema de explotación esté por debajo de un margen de error prefijado.

4.2. MODULO DE EXPLOTACION

DEFINICION GLOBAL

Cada plan de expansión x será evaluado en base a:

- E_C escenarios para el cálculo de los costes variables de explotación. Estos costes incluyen los de combustibles para generación y los que puedan existir de energía no suministrada. Los E_C escenarios serán pocos en número, y estarán definidos por la hidráulicidad y la demanda. Se considerará un único valor de disponibilidad media para cada corredor (para líneas será la capacidad nominal) y área de generación. El programa se especificará para poder acomodar varios escenarios, aunque en una primera versión solamente se incluya uno.
- E_F escenarios que impondrán restricciones de fiabilidad tipo pasa/no pasa al problema maestro de inversiones. Cada escenario corresponderá a un estado de disponibilidad predefinido por el usuario. Es importante, para conseguir buenas propiedades matemáticas del algoritmo de optimización, que todos los planes a evaluar sean sometidos a exactamente los mismos E_F escenarios. Estos E_F escenarios de disponibilidad deberán por tanto definirse para todos los elementos (líneas y grupos generadores) del sistema eléctrico, incluyendo en cada escenario la unión de todos los elementos de todas las alternativas de expansión definidas por el usuario.

4.2.1. FORMULACION CONCEPTUAL DEL MODULO DE COSTES
VARIABLES DE EXPLOTACION PARA CADA ESCENARIO: $e= 1, \dots, E_c$

$$\text{MIN}_y \quad \text{CVE}(y) = \text{CGEN}(y) + \text{CFIA}(y)$$

Sujeto a:

- Restricciones del modelo de red, permitiendo potencia no servida en cada nudo, $\text{RRED}(x,y) \leq h$.
- Permitir redespacho de generación.
- Se utiliza un único valor (el programado) para la máxima potencia posible de carácter hidroeléctrico, pues se trata de situaciones estables donde este valor no puede excederse.
- Pueden incluirse restricciones de seguridad en la explotación, a través de márgenes de reserva u otros métodos, $\text{RFIAEXP}(x,y) \leq k$.

Donde:

- CVE:** Costes variables totales para el escenario considerado.
 CVE consta de:
- CGEN:** Costes de combustibles en generación.
- CFIA:** Costes por indisponibilidad de generación o de red. Se estiman con un coeficiente multiplicador de la potencia no suministrada que se obtenga. Normalmente para el plan óptimo debieran ser nulos.

*(eso no duplica costes de lab. = both here & in RFIAEXP
 ~ F.O. del master) → It is fine since RFIAEXP comes
 only from the counterparty.*

MODULO DE COSTES VARIABLES DE EXPLOTACION
INFORMACION PROPORCIONADA AL MODULO DE INVERSION

- El módulo de costes variables recibe del módulo de inversión el mejor plan x^* existente hasta el momento.

- En base a esta información, y para cada uno de los $e= 1, \dots, E_c$ escenarios, se calcula:
 - El coste de explotación $CVE_e(x^*)$ para cada escenario.
 - El corte de Benders correspondiente a cada escenario:
$$CVE_e(x) \geq CVE_e(x^*) + \mu_e(x^*) \cdot (x-x^*)$$

- La anterior información se envía al módulo de inversión, agregada en un único coste $CVE(x^*)$ y un único corte de Benders.
$$CVE(x) \geq CVE(x^*) + \mu(x^*) \cdot (x-x^*)$$

FORMULACION PRECISA DEL MODULO DE COSTES VARIABLES DE

EXPLOTACION (Para cada escenario $e= 1, \dots, E_c$)

ALTERNATIVA A: MODELO DE RED DE TRANSPORTE

$$\text{MIN}_{g,f,r} \text{CVE}(g,f,r) = \sum_n \sum_t C_{nt} \cdot g_{nt} + B \sum_n r_n$$

Sujeto a:		(Variable dual)
$S.F + g + r = d$	(áreas $n= 1, \dots, N$)	π_d
$ f \leq \bar{f}$	(corredores $l= 1, \dots, L$)	π_f
$\underline{g} \leq g \leq \bar{g}$	(áreas $n= 1, \dots, N$)	π_g
$0 \leq r \leq d$	(áreas $n= 1, \dots, N$)	π_r

Donde:

S es la matriz de incidencia nodos-ramas.

$f = \{f_{ji}\}$ es el vector de flujos de potencia en los corredores (desde nudo j a nudo i). Puede también representarse como $f = \{f_l\}$.

$g = \{g_n\} = \{ \sum_t g_{nt} \}$ es el vector de potencias generadas g_n en el área n, que incluirá distintos tipos de generación g_{nt} , $t= 1, \dots, T$ que se diferencian por su coste uniforme C_{nt} y por sus potencias máximas \bar{g}_{nt} y mínimas \underline{g}_{nt} . El usuario debe hacer uso juicioso en cada área en la definición de estas variables g_{nt} , de forma que

con el menor número de ellas consiga representar con precisión el comportamiento agregado de la generación en cada una de las áreas. El modelo agregado del conjunto de las centrales hidráulicas de un área puede simplemente modelarse con una única variable g_{n1} , $t=1$ de coste $C_{n1} = 0$ (con lo que el algoritmo de optimización tratará de utilizarla al máximo), $\bar{g}_{n1} =$ potencia total hidráulica programada para el área en las condiciones del escenario estudiado (con lo que en condiciones normales, si no hay restricciones de red, deberá cumplirse que $g_{n1} = \bar{g}_{n1}$) y $\underline{g}_{n1} = 0$ (para evitar potenciales casos de infactibilidad en caso de insuficiencia de red en estados intermedios del proceso de optimización de x en el maestro; ignorar las restricciones de potencia fluyente no supone problema ni falta de generalidad alguna). El usuario podrá definir hasta $T-1$ grupos térmicos ficticios en cada área n , de costes C_{nt} , $t = 2, \dots, T$ (se reserva $t = 1$ para grupo hidráulico).

Caben varias alternativas para definir el coste de generación de un área : a) un único valor medio (poco preciso, provoca desequilibrios entre áreas); b) tratar cada grupo individualmente (muchas variables); c) representar la curva agregada de costes de un área en orden económico de prioridad, a través de un número reducido de grupos generadores ficticios, cada uno con un coste C_{nt} fijo; esto es compatible con el formato de la función

objetivo y el algoritmo de optimización se encarga de utilizar los grupos según su ordenación económica. (El número de variables puede ser elevado). Cada grupo térmico ficticio tendrá una capacidad máxima \bar{g}_{nt} , que en este subproblema corresponderá a la potencia media disponible de los grupos térmicos incluidos en g_{nt} . Se ignorarán las restricciones de mínimos técnicos (muy detalladas para un modelo de este tipo, pueden ser causa de infactibilidades y su tratamiento detallado requiere hacer uso de variables discretas). Podrán incluirse las consideraciones de preferencia de unos tipos de combustibles sobre otros (e.g., carbón nacional sobre carbón importado) sin más que modificar convenientemente los costes C_{nt} . Las consideraciones de consumos forzosos ("must run constraints", e.g., consumos mínimos de carbón nacional en ciertas áreas) pueden incorporarse simplemente creando un tipo t de grupo térmico con $C_{nt} = 0$ y $\bar{g}_{nt} =$ consumo mínimo deseado; el algoritmo se encargará de utilizarlo mientras la red no lo impida; incluso, a fin de reducir al máximo el número de variables, puede incorporarse este \bar{g}_{nt} a la potencia hidráulica programada \bar{g}_{n1} , separándose posteriormente el resultado obtenido para g_{n1} en sus dos componentes a efectos de cálculo de costes reales, dando siempre preferencia a la hidráulica sobre la térmica forzosa (como ocurriría en la realidad).

$\bar{f} = \{\bar{f}_l\}$ es el vector de capacidades de transporte disponibles en cada uno de los corredores l . Su valor viene determinado directamente por las variables de inversión x .

$d = \{d_n\}$ es el vector de demandas en cada área n .

$r = \{r_n\}$ es el vector de potencias no suministradas en cada área n .

COMENTARIOS:

- No se han incluido restricciones de seguridad de tipo preventivo en la explotación. Parece llevar a complicar significativamente la formulación del subproblema, pues afectan al vector de variables de explotación $y = \{g, f, r\}$. Formalmente requerirían crear una nueva descomposición de Benders con contingencias sobre el subproblema de costes de explotación. Por el contrario las restricciones de seguridad de tipo correctivo son independientes de los valores de y en el caso de referencia, y pueden ser incluidas en el módulo de restricciones de fiabilidad; cada escenario $e = 1, \dots, E_C$ podría dar lugar a escenarios de contingencias distintos, a incluir en el módulo de restricciones de fiabilidad.

Una forma sencilla de introducir restricciones de tipo preventivo en un escenario cualquiera del módulo de costes de explotación es reducir ficticiamente la capacidad de transporte de los corredores \bar{f}_l . Otra, que trata de aproximarse a exigir un margen del parámetro

denominado LSC ("Load supplying capability") consistiría simplemente en aumentar ficticiamente la demanda en todos los nodos de acuerdo con un factor mayor que la unidad. Cualquiera de estos dos métodos puede ser utilizado por el usuario sin más que modificar los datos de entrada al programa. Un procedimiento más avanzado (que no será utilizado en esta Fase I) consistiría en definir un subproblema adicional en el que se calculase una aproximación lineal $\widetilde{LSC}(x)$ a la función $LSC(x)$, para ser introducida entre las restricciones $RFIAPLA(x) \leq b$ en el problema maestro.

- La formulación anterior es compatible con los algoritmos existentes del tipo Ford/Fulkerson.
- La determinación del corte de Benders correspondiente a un conjunto de variables de inversión x^* se obtiene directamente a partir de las variables duales del problema de programación lineal (está por comprobar la efectividad del algoritmo de F/F para el cálculo de estas variables duales):

$$CVE(\bar{f}) = CVE(\bar{f}^*) + \pi_f \cdot (\bar{f}^* - \bar{f})$$

donde es ahora trivial relacionar \bar{f} con x .

La capacidad de diagnóstico de la herramienta aumenta si se incluye ficticiamente a las generaciones como variables de expansión. Entonces:

$$CVE(\bar{f}, \bar{g}) = CVE(\bar{f}^*, \bar{g}^*) + \pi_f (\bar{f}^* - \bar{f}) + \pi_g (\bar{g}^* - \bar{g})$$

y en el problema maestro puede también hacerse el mismo truco.

Esto permite analizar la influencia del plan previo de expansión de la generación sobre el plan de red.

Para combinar los cortes de Benders de varios escenarios basta con obtener las variables duales Π para cada uno de ellos y obtener un único valor medio Π_f y Π_g sopesando los individuales de acuerdo con sus probabilidades.

**FORMULACION PRECISA DEL MODULO DE COSTES VARIABLES DE
EXPLOTACION (Para cada escenario e= 1, ..., E_c)**

ALTERNATIVA B: MODELO DE FLUJO DE CARGAS LINEALIZADO

$$\text{MIN}_{g, \theta, r} \text{CVE}(g, \theta, r) = \sum_n \sum_t C_{nt} \cdot g_{nt} + \beta \sum_n r_n$$

Sujeto a:		(Variable dual)
$B \cdot \theta + g + r = d$	(áreas n= 1, ..., N)	Π_d
$\gamma_{ij} \theta_i - \theta_j \leq \bar{f}_{ij}$	(corredores l= 1, ..., L)	Π_f
$\underline{g} \leq g \leq \bar{g}$	(áreas n= 1, ..., N)	Π_g
$0 \leq r \leq d$	(áreas n= 1, ..., N)	Π_r

Donde:

f, g, r y d tienen el mismo significado que en la alternativa A.

$\theta = \{\theta_n\}$ es el ángulo de la tensión en el área n.

$B = \{b_{ij}\}$ es la matriz de susceptancias:

$$b_{ij} = \begin{cases} \gamma_{ij} & \text{si } i \neq j, \text{ siendo } \gamma_{ij} \text{ la susceptancia del corredor que} \\ & \text{une los nudos } j, i. \\ - \sum_n \gamma_{in} & \text{si } i = j, \text{ extendiéndose la sumatoria a todas las} \\ & \text{áreas } n \text{ directamente conectadas al área } i. \end{cases}$$

Notar que tanto γ_{ij} como \bar{f}_{ij} dependen de las variables de inversión x.

COMENTARIOS:

- Esta formulación conduce a un problema de programación lineal sin características especiales, aparentemente.

El algoritmo de F/F no es aquí aplicable.

- En la determinación del corte de Benders debe ahora tenerse en cuenta que una variación de las variables de inversión x produce cambios en el subproblema no sólo a través de f , sino también de $\{Y_{ij}\}$.

Ahora la expresión del corte de Benders es:

$$CVE(\bar{f}, Y) = CVE(\bar{f}^*, Y^*) + \pi_f(\bar{f}^* - \bar{f}) + \pi_Y(Y^* - Y)$$

donde

$$\pi_Y = (\pi_{di} - \pi_{dj}) \cdot (\theta_j^* - \theta_i^*)$$

La extensión para incluir variables ficticias de generación puede realizarse como en la alternativa A.

4.2.2. FORMULACION CONCEPTUAL DEL MODULO DE RESTRICCIONES DE FIABILIDAD (Para cada escenario, $e=1, \dots, E_F$)

$$\text{MIN}_z \text{INDFIA}(z) = \sum_n \text{PNS}_n$$

Sujeto a:

- Restricciones del modelo de red, permitiendo potencia no servida en cada nudo, $RRED(x,y) \leq h$
- Permitir redespacho de generación
- Potencia hidroeléctrica de emergencia (pueden utilizarse distintos valores, según el carácter de la contingencia).

Donde:

PNS_n = Potencia no suministrada en el área n.

(La información proporcionada al módulo de inversión está sujeta a consideraciones análogas a las hechas para el módulo de costes de explotación).

FORMULACION PRECISA DEL MODULO DE RESTRICCIONES DE FIABILIDAD (Para cada escenario, $e=1, \dots, E_f$)

La formulación es idéntica a la presentada para el módulo de costes variables de explotación, también con las dos alternativas A (red de transporte) y B (flujo de cargas linealizado), con las diferencias siguientes:

- Se trata únicamente de minimizar la potencia no suministrada, por lo que la función objetivo resulta ser:

Alternativa A:

$$\underset{g, f, r}{\text{MIN}} \quad \text{RFIAPLA}(g, f, r) = \sum_n r_n$$

Alternativa B:

$$\underset{g, \theta, r}{\text{MIN}} \quad \text{RFIAPLA}(g, \theta, r) = \sum_n r_n$$

- La potencia hidráulica máxima a despachar \bar{g}_{n1} es ahora la potencia hidráulica agregada que el área n puede aportar en caso de emergencia. Dado que cada escenario $e=1, \dots, E_f$ corresponde a un estado distinto de disponibilidad del sistema, la potencia hidráulica de emergencia a utilizar en cada uno de ellos podría hacerse depender del tipo de indisponibilidad de que se trate, dependiendo sobre todo de su duración esperada.

- Como en el módulo de costes de explotación, también aquí entre todos los E_F escenarios resultará un único corte agregado de Benders para un plan de expansión x^* proporcionado por el problema maestro. La diferencia ahora se encuentra en el hecho de que previsiblemente, en muchos de los E_F escenarios, las sensibilidades $\eta(x^*)$ de RFIAPLA sean nulas. Los pesos a utilizar para los cortes de Benders de los diferentes escenarios serán aquí las probabilidades de los correspondientes estados de indisponibilidad.
- La eficacia del algoritmo completo de optimización de la expansión previsiblemente dependerá bastante del tiempo invertido en evaluar estos E_F escenarios, sobre todo si su número es elevado. Es aquí importante el tratar de encontrar métodos de reducir los tiempos de cálculos: obtener las ecuaciones de cada escenario a partir de pequeñas modificaciones de uno o varios casos base, usar como solución de partida la solución ya conocida de un escenario análogo, comprobaciones rápidas de que el escenario no va aportar ninguna restricción activa, etc.
- También en este módulo, como en el de costes de explotación, interesa obtener sensibilidades de RFIAPLA con respecto a las capacidades máximas de generación \bar{g}_{nt} , a fin de facilitar la labor de diagnóstico en el problema maestro.

- Notar que cualquier sensibilidad con respecto a la variable x_{lkm} de una línea que resulta estar indisponible en un determinado escenario será nula. Podrá no serlo en todos aquellos escenarios en los que la línea esté disponible. Recordar que los cortes de Benders están sopesados por las probabilidades de los respectivos escenarios.

5. CRITERIOS DE EVALUACION DE UNA METODOLOGIA

- A) PRECISION, EXACTITUD
- B) VOLUMEN DE CALCULO REQUERIDO
- C) VIABILIDAD TECNICA DEL ALGORITMO.
COMPONENTE DE RIESGO EN EXITO DE IMPLANTACION
- D) MODULARIDAD, EXPANDIBILIDAD
- E) FACILIDAD DE COMPRESION
- F) FACILIDAD DE PROGRAMACION, TIEMPO DE DESARROLLO
- G) ADECUADO TRATAMIENTO DE LA INCERTIDUMBRE
(CARGA, HIDRAULICIDAD, COSTES, RETRASOS E
INSTALACIONES, DISPONIBILIDAD)
- H) FACILIDAD DE DIAGNOSTICO, MEDIDAS DE SENSIBILIDAD,
SEPARACION DE INDICES DE GENERACION Y RED

6. EVALUACION DE LA METODOLOGIA PARA LA FASE I

➤(De acuerdo con los criterios enunciados en el apartado anterior).

A. PRECISION, EXACTITUD

De acuerdo con la literatura técnica consultada, para obtener buena precisión en la determinación del plan óptimo de expansión de la red puede ser necesario el hacer uso de un modelo con variables discretas y flujo de cargas linealizado (i.e., corriente continua). Son de esperar valores razonables si se utilizan modelos de red de transporte y variables continuas, en particular cuando el volumen de nueva capacidad de transporte es elevado. Los resultados de los modelos simplificados pueden ser útiles para reducir las opciones de expansión a considerar con modelos más precisos, lo que puede ayudar a reducir los tiempos de cálculo.

Es interesante advertir que los cortes de Benders que se obtienen del subproblema de explotación cuando en el problema maestro se utilizan variables de expansión continuas, son directamente aprovechables en la formulación con variables de expansión discretas.

B. VOLUMEN DE CALCULO REQUERIDO

Con modelo de transporte, variables continuas y número reducido de escenarios el volumen de cálculo debe ser razonable. Las extensiones, en particular a variables discretas, supondrán aumentos sustanciales del volumen de cálculo, que puede reducirse significativamente si se filtran previamente las opciones de expansión con una versión más simple del modelo.

El método de descomposición propuesto (Benders) facilita la eficacia del algoritmo de optimización en variables discretas (Branch and Bound) pues la evaluación de cada plan de expansión se realiza en función de los cortes de Benders y no de los modelos detallado de explotación y fiabilidad.

El reto mayor para la fase II es el extender la evaluación determinista pasa/no-pasa de la fiabilidad, y la estimación de los costes en base a escenarios en el modelo propuesto, a una evaluación probabilista. La estructura modular del modelo propuesto permite esta extensión; la dificultad estará en encontrar la forma de conseguir una precisión razonable en la valoración de las incertidumbres sin que se dispare el tiempo de cálculo. Los resultados de tiempos de cálculo del modelo propuesto serán un buen indicador de hasta donde se puede llegar en la fase II.

La realización de alguna prueba numérica con un modelo de cobertura

generación/red (como el programa JUANAC desarrollado en ICAI-IIT recientemente en forma de prototipo) puede ayudar también a estimar tiempos de cálculo y a establecer criterios para la definición de los escenarios E_C y E_F .

C. VIABILIDAD TECNICA

La versión (red de transporte, variables continuas, lista de escenarios/contingencias) del modelo propuesto no debe presentar problemas de viabilidad o de implantación, pues utiliza formulaciones y algoritmos que han sido ya empleados con éxito en la literatura técnica consultada, y con los que están familiarizados los miembros del equipo de trabajo. Lo mismo puede decirse de la extensión a variables discretas, aunque el algoritmo definitivo a utilizar está aun por definir. El método de descomposición de Benders es un procedimiento complejo de implantar y que normalmente requiere un proceso delicado de validación y ajuste, pero se tiene experiencia en el grupo de trabajo en su utilización e implantación.

De acuerdo con la literatura técnica consultada, la extensión a red linealizada (flujo de cargas en continua) puede presentar problemas (falta de convexidad en el subproblema) con el método de descomposición de Benders. Estos problemas parecen no ser frecuentes y pueden perfectamente no ocurrir en (¿la mayor parte de las?) redes reales. El problema puede siempre ser detectado, con lo que hay seguridad de no aceptar soluciones no válidas del modelo. Este problema parece ser muy dependiente de la formulación utilizada (uso de red ficticia o "dummy network", definición de variables). El problema, de acuerdo con la literatura técnica consultada, desaparece cuando se utiliza una determinada definición de las variables discretas, no en continuas (*). Este es un tema que debe estudiarse en mayor detalle y sobre el que parece

existir buena documentación técnica, aun no disponible en el grupo de trabajo.

Otra complejidad nueva que aparece con la formulación de red en continua es que se trata de una formulación intrínsecamente no lineal. La descomposición de Benders convierte el problema en lineal, pero la característica de no linealidad "reaparece" de alguna forma en el cálculo de las sensibilidades del subproblema de explotación con respecto a las variables de inversión. Presumiblemente esto conduzca a peores propiedades de convergencia en la formulación de red en continua que en la de red de transporte.

- (*) Esto parece sugerir un método de resolución si el problema sólo se diera raramente: conmutar a la versión en variables discretas cuando se haya detectado falta de convexidad en variables continuas.

D. MODULARIDAD, EXPANDIBILIDAD

Una de las mayores ventajas del procedimiento propuesto es su modularidad (problema de inversiones formulable tanto en variables discretas como en continuas, subproblema de explotación que puede ser único o descompuesto en costes y fiabilidad, con posibilidad de un número cualquiera de escenarios/contingencias y modelo de red tipo transporte o de corriente continua), que en principio parece permitir la expansión del modelo propuesto utilizando al máximo lo ya desarrollado.

A este respecto parece crítica la fase de especificación informática del programa, en la que debe asegurarse que la estructura del programa podrá dar cabida a todas las opciones de la Fase I y asimismo permita aprovechar lo máximo posible del programa de la Fase I para desarrollar las extensiones que se planteen para fases posteriores. Métodos sistemáticos de especificación informática, como es el caso de CORE, pueden ser aquí de gran utilidad. Será conveniente definir lo antes posible las líneas maestras de las posibles extensiones del programa, para tenerlas en cuenta en lo posible desde un principio.

E FACILIDAD DE COMPRESION

Comprender en profundidad el método de descomposición de Benders requiere un cierto nivel de sofisticación matemática. Afortunadamente es posible alcanzar con facilidad un nivel de comprensión intuitivo que es suficiente a efectos prácticos de utilización, e incluso de programación, del modelo.

Una vez realizada la descomposición en el problema maestro de inversiones y en el subproblema de explotación, la comprensión de la formulación y de la marcha del algoritmo resulta ser mucho más clara que en otros métodos, pues cada módulo puede examinarse casi con total independencia de los demás. El usuario tiene un gran control sobre las prestaciones ofrecidas por el modelo, pues tiene opciones sobre el nivel de precisión del modelo (variables continuas o discretas, red de transporte o en continua) y sobre el número y características de los escenarios de explotación (coste y fiabilidad).

F. FACILIDAD DE PROGRAMACION. TIEMPO DE DESARROLLO

La programación de un algoritmo de optimización por el método de descomposición de Benders es una tarea compleja y que debe planificarse cuidadosamente. Máxime si además se pretende que ofrezca diversas opciones de funcionamiento/modelado al usuario.

Las principales tareas de programación para desarrollar el modelo pueden agruparse en dos bloques: A) módulo de inversiones (programa maestro) y B) módulo de explotación (subproblema), que pueden descomponerse a su vez en las tareas siguientes:

A. Programación del módulo de inversiones.

- A.1. Programación de la formulación del modelo, lógica del proceso de descomposición de Benders, obtención de diagnósticos (e.j., sensibilidades de la solución) y entradas/salidas del programa principal.
- A.2. Implantación informática, validación y acoplamiento de un algoritmo (comercial o "production grade") de programación lineal para la opción de variables continuas.
- A.3. Análogo, con un algoritmo de Branch and Bound (B & B), para la opción de variables discretas.

B. Programación del módulo de explotación.

- B.1. programación de la formulación del modelo, en su mayor parte común al módulo de costes y al de fiabilidad (si es que se utiliza el mismo modelo de red en ambos casos). Debe programarse la lógica de Benders para el tratamiento agregado (único corte de Benders) de varios escenarios para cada módulo. Es crítico el utilizar técnicas eficientes para obtener la formulación correspondiente a un escenario como una modificación de la formulación obtenida para un caso de referencia; también el prescindir de o el simplificar la evaluación de escenarios poco relevantes.
- B.2. Implantación informática, validación y acoplamiento de un algoritmo de optimización eficiente (preferiblemente una versión comercial o "production grade") para la resolución del problema de explotación (coste y/o fiabilidad) utilizando el modelo de red de transporte. Se utilizará probablemente el algoritmo de Ford/Fulkerson.
- B.3. Análogo, para el modelo de flujo de carga linealizado. Aquí se utilizaría un algoritmo de programación lineal adaptado a esta particular versión del despacho óptimo restringido por red.

El tiempo de desarrollo del modelo dependerá de las mejores o peores propiedades de convergencia del algoritmo global de optimización del plan, que si son buenas de entrada no requerirán de ajustes en la formulación

G. TRATAMIENTO DE LA INCERTIDUMBRE

El modelo propuesto no es probabilista, en el sentido de que no son estrictamente las leyes de la probabilidad las que determinan las situaciones a ser evaluadas en el proceso de planificación. Es el usuario, a través de su experiencia y de su sentido intuitivo de la probabilidad el que fija el conjunto de escenarios de carga, hidráulicidad y disponibilidad a ser tenidos en cuenta. Si la eficiencia del algoritmo permite considerar un número razonablemente elevado de escenarios de coste y fiabilidad, el procedimiento propuesto puede proporcionar una aproximación aceptable a lo que sería una verdadera evaluación probabilista. Téngase en cuenta que el método propuesto (cortes agregados de Benders) permite recoger cada escenario con un peso correspondiente a su probabilidad relativa al resto de los escenarios.

La organización propuesta del programa permite, en una fase posterior en la que habría que resolver previamente determinados aspectos de eficacia de los algoritmos, extender este conjunto reducido de escenarios prefijados a un conjunto más amplio generado aleatoriamente o por algún otro procedimiento eficiente de enumeración o analítico.

De momento no se ha considerado un tratamiento aleatorio de los costes, ya sean de inversión o de explotación. Los retrasos en las instalaciones de red son difícilmente modelables en un modelo estático de planificación.

H. FACILIDAD DE DIAGNOSTICO

Teóricamente el modelo propuesto debe proporcionar una elevada capacidad de diagnóstico, pues sus módulos en cualquiera de sus opciones de funcionamiento están basados en algoritmos de programación lineal, en los que las variables duales (que constituyen la base de todo análisis de sensibilidad) son fácilmente obtenibles.

Las variables duales para la solución óptima (i.e., plan óptimo de expansión de la red) deben indicar cuales de las restricciones del problema maestro (volumen total de inversiones, limitación de capacidad de los corredores, criterios de fiabilidad) limitan el plan y en qué cuantía. Asimismo las variables duales del módulo de explotación informarán del impacto sobre los costes y la fiabilidad de la capacidad limitada de cada uno de los corredores. Es también posible (como se comentó anteriormente) obtener sensibilidades con respecto a la generación instalada en cada área.

Están aun por definir los índices precisos a calcular para realizar el diagnóstico del plan óptimo proporcionado por el programa.

ASPECTOS AUN ABIERTOS EN EL ANALISIS FUNCIONAL

- Determinación eficiente de sensibilidades en el algoritmo de Ford/Fulkerson, y en Branch & Bound.
- Definición y procedimiento de cálculo de los índices a utilizar para evaluar el plan óptimo.
- Propiedades de convexidad de la formulación propuesta según se necesitan para el algoritmo de Benders (a la espera del informe de Stanford).
- Definición aproximada de las extensiones a introducir en la Fase II y comprobación de su compatibilidad con la estructura funcional informática definida para la Fase I.