

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Programa de Doctorat en Enginyeria Elèctrica

SISTEMA D'ANÀLISI I PLANIFICACIÓ DE XARXES  
DE DISTRIBUCIÓ D'ENERGIA ELÈCTRICA DE MITJANA TENSIÓ

Tesi presentada per en Jaume Gratacós i Prats  
per a obtenir el títol de Doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya

Directors de tesi: Dr. Ricard Bosch i Tous  
i Dr. Pau Casals i Torrens

Departament d'Enginyeria Elèctrica  
Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, novembre de 2015



## Resum

La planificació òptima dels treballs anuals de desenvolupament d'una xarxa de distribució d'energia elèctrica de mitjana tensió, per atendre l'evolució de la demanda amb uns nivells màxims de qualitat i continuïtat del subministrament i amb una inversió mínima, ha estat objecte d'interès de la comunitat acadèmica durant els darrers quaranta anys. Les metodologies formulades fins avui presenten inconvenients que poden dificultar la seva aplicació en casos reals.

Aquesta tesi detalla el disseny d'un sistema d'anàlisi i planificació de xarxes de distribució reals, que incorpora una nova metodologia heurística multi-objectiva i dinàmica multi-etapa per a l'obtenció de planificacions òptimes i eficients. Aquesta nova metodologia heurística conté estratègies de millora de la seva eficiència que no s'han trobat en la literatura especialitzada: la tipificació d'actuacions de desenvolupament i l'avaluació de l'eficiència relativa de les planificacions òptimes durant el procés de cerca.

## Abstract

The optimal planning of the annual development tasks of a medium voltage power distribution network, to tackle the evolution of the demand with maximum levels of quality and continuity of service and minimum investment, has been under the spotlight of the academic community for the last forty years. The methodologies available today present some withdraws that might complicate its application on real cases.

This thesis describes the design of a system of analysis and planning of real distribution networks, which incorporates a new multi-objective and dynamic multi-stage heuristic methodology to generate the optimal and efficient planning strategies. This new heuristic methodology contains strategies to increase its efficiency that have not been found in the specialized literature: the typing of the development tasks and the evaluation of the relative efficiency of the optimal planning strategies during the search.

**Descriptors:** Xarxa de distribució elèctrica, planificació multi-objectiu, planificació dinàmica multi-etapa, heurística.



## **Agraïments**

A l'Institut Català d'Energia i a la Direcció General d'Energia, Mines i Seguretat Industrial de la Generalitat de Catalunya.

A la meva família, pel seu suport durant tots aquests anys.

Al Ricard Bosch i al Pau Casals, per la seva perseverança i sentit pràctic.

Al Marc Falgueras, per la seva infinita paciència.



Als meus pares, Jaume i Margarita.

A la meva germana, Margarita.

A la meva àvia, Margarita.





## Índex de continguts

1. Pròleg .....	1
1.1. Motivació .....	1
1.2. Objectiu de la tesi .....	2
1.3. Abast de la tesi .....	3
1.4. Estructura de la tesi .....	5
2. Estat de l'art .....	7
2.1. Període 1940-1969.....	7
2.2. Període 1970-1979.....	8
2.3. Període 1980-1989.....	9
2.4. Període 1990-1999.....	11
2.4.1. Tècniques clàssiques d'optimització.....	12
2.4.2. Tècniques heurístiques clàssiques .....	13
2.4.3. Tècniques meta-heurístiques modernes .....	14
2.5. Període 2000-2015.....	15
2.5.1. Tècniques clàssiques d'optimització.....	16
2.5.2. Tècniques heurístiques clàssiques .....	16
2.5.3. Tècniques meta-heurístiques modernes .....	17
2.6. Resum.....	19
3. Reflexions sobre l'estat de l'art.....	21
4. Estructura del sistema d'anàlisi i planificació .....	25
4.1. Mòdul de modelització de la xarxa de distribució .....	26
4.1.1. Anàlisi de repartiment de càrregues .....	28
4.1.2. Anàlisi de continuïtat de subministrament .....	28
4.1.3. Anàlisi de marge de creixement.....	29
4.1.4. Anàlisi de punts crítics de subministrament .....	29
4.2. Mòdul de previsió a mig termini .....	31
4.3. Mòdul de planificació dels desenvolupaments de xarxa a mig termini.....	32
4.3.1. Metodologia de determinació de les planificacions òptimes de desenvolupament d'un circuit de mitjana tensió .....	33

4.3.2. Transicions entre estats: Operadors de circuit .....	37
4.3.2.1. Operador de circuit de canvi de tensió .....	38
4.3.2.2. Operador de circuit de desdoblament.....	40
4.3.2.3. Operador de circuit de reassignació de càrregues .....	43
4.3.2.4. Operador de circuit d'augment de capacitat .....	46
4.3.2.5. Operador de circuit de soterrament .....	48
4.3.2.6. Operador de circuit de millora de continuïtat de subministrament...	49
4.3.2.7. Operador de circuit de millora de reserva d'alimentació.....	51
4.3.2.8. Regles de seqüenciació dels operadors de circuit .....	52
4.3.3. Adaptacions a l'algoritme de Bellman .....	55
4.3.3.1. Avaluació de la suficiència dels estats .....	56
4.3.3.2. Determinació de les transicions entre estats més eficients.....	56
4.3.3.3. Límit del nombre d'estats que passen d'una fita temporal a la següent .....	58
4.4. Mòdul de presentació de les planificacions òptimes de desenvolupament....	58
4.5. Exemple d'aplicació .....	59
5. Conclusions.....	69
6. Futurs desenvolupaments .....	71
7. Referències bibliogràfiques.....	73
Annex. Evolució dels paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament associats a les planificacions de desenvolupament de l'exemple del capítol 4 .....	79

## Índex de taules

Taula 1: Resum de l'aplicació de l'operador de canvi de tensió al circuit tipus de 6 kV. ....	39
Taula 2: Resum de l'aplicació de l'operador de desdoblament de circuit al circuit tipus de 25 kV.....	42
Taula 3: Resum de l'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues al circuit tipus de 25 kV.....	44
Taula 4: Resum de l'aplicació de l'operador d'augment de capacitat al circuit tipus de 25 kV. ....	47
Taula 5: Resum de l'aplicació de l'operador de soterrament al circuit tipus de 25 kV. ....	48
Taula 6: Resum de l'aplicació de l'operador de millora de continuïtat de subministrament al circuit tipus de 25 kV. ....	50
Taula 7: Resum de l'aplicació de l'operador de millora de reserva d'alimentació al circuit tipus de 25 kV. ....	52
Taula 8: Paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament associats als mercats de les subestacions de l'exemple. ....	60
Taula 9: Exemple d'aplicació. Evolució tendencial prevista dels paràmetres elèctrics del circuit analitzat. ....	62
Taula 10: Exemple d'aplicació. Condicions particulars per a cada cas de l'anàlisi...63	
Taula 11: Exemple d'aplicació. Relació de planificacions òptimes de desenvolupament resultants i temps de càlcul associat a cada cas. ....	64
Taula 12: Exemple d'aplicació. Relació d'actuacions associada a cada planificació òptima de desenvolupament. Inversió total actualitzada a l'any 0 de cada planificació. ....	65
Taula 13: Exemple d'aplicació. Paràmetres del sistema al final del període de planificació. ....	65
Taula 14: Exemple d'aplicació. Evolució fins l'any 1 dels paràmetres del sistema associats a la planificació òptima 1. ....	67
Taula 15: Exemple d'aplicació. Evolució fins l'any 1 dels paràmetres del sistema associats a les planificacions òptimes 3, 4, 7, 8 i 9.....	67

## Índex d'il·lustracions

Il·lustració 1: Diagrama de fluxos del sistema d'anàlisi i planificació.....	25
Il·lustració 2: Avaluació de la funció de criticitat de la xarxa de distribució MT en una zona urbana. ....	30
Il·lustració 3: Graf genèric dirigit i orientat que modelitza un problema de programació dinàmica. ....	34
Il·lustració 4: Graf genèric dirigit i orientat que modelitza els estats de xarxa i la determinació de les planificacions de desenvolupament del circuit MT. En vermell els nodes associats a estats amb un comportament no suficient. ....	36
Il·lustració 5: Circuit tipus en situació prèvia a l'aplicació de l'operador de canvi de tensió al circuit tipus de 6 kV. ....	39
Il·lustració 6: Circuit tipus de 25 kV en situació prèvia a l'aplicació de l'operador de desdoblament. ....	41
Il·lustració 7: Circuits resultants de l'aplicació de l'operador de desdoblament al circuit tipus de 25 kV. ....	41
Il·lustració 8: Esquema d'aplicació de l'operador de desdoblament en funció del circuit associat al circuit analitzat. ....	42
Il·lustració 9: Circuit en situació prèvia a l'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues. ....	45
Il·lustració 10: Circuits resultants a l'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues al circuit tipus.....	45
Il·lustració 11: Esquema d'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues en funció del circuit associat al circuit analitzat. ....	46
Il·lustració 12: Esquema d'aplicació de l'operador d'augment de capacitat en funció del circuit associat al circuit analitzat. ....	48
Il·lustració 13: Esquema d'aplicació de l'operador de soterrament en funció del circuit associat al circuit analitzat. ....	49
Il·lustració 14: Esquema d'aplicació de l'operador de millora de continuïtat de subministrament en funció del circuit associat al circuit analitzat. ....	50
Il·lustració 15: Esquema d'aplicació de l'operador de millora de reserva d'alimentació en funció del circuit associat al circuit analitzat. ....	52
Il·lustració 16: Diagrama de fluxos de la seqüenciació dels operadors que s'apliquen per a la generació d'estats de xarxa de la fita temporal següent. ....	54
Il·lustració 17: Diagrama de fluxos de la comparació d'eficiència de dos estats $E_i$ i $E_j$ . ....	57
Il·lustració 18: Exemple d'execució. Xarxa de distribució de mitjana tensió, subestacions de capçalera i centres de maniobra. ....	60

Il·lustració 19: Exemple d'execució. Avaluació de la funció de criticitat en la zona d'anàlisi, en la situació inicial. ....	61
Il·lustració 20: Exemple d'aplicació. Circuit seleccionat per al seu desenvolupament. ....	62



## **1. Pròleg**

### **1.1. Motivació**

La Llei 24/2013, de 26 de desembre, *del Sector Elèctric* estableix el monopoli natural de l'activitat de distribució d'energia elèctrica i delimita la seva regulació i control per part de l'Administració General de l'Estat i les Comunitats i Ciutats Autònomes d'acord amb el marc competencial dels seus respectius estatuts d'autonomia. L'article 133 de l'Estatut d'Autonomia de Catalunya atribueix a la Generalitat de Catalunya les competències en "*la regulació de l'activitat de distribució d'energia que s'acompleixi a Catalunya, l'atorgament de les autoritzacions de les instal·lacions corresponents i l'exercici de les activitats d'inspecció i control de totes les instal·lacions existents a Catalunya*".

L'Administració General de l'Estat s'ha dotat de l'eina anomenada *Modelo de Red de Referencia* per al contrast tècnic en l'establiment de la retribució de l'activitat dels gestors de xarxa de distribució. En concret, el *Modelo de Red de Referencia* determina la xarxa de distribució òptima per atendre el mercat elèctric espanyol amb un cost mínim d'inversió, pèrdues tècniques i energia no servida.

El Reial Decret 1048/2013, de 27 de desembre, *por el que se establece la metodología para el cálculo de la retribución de la actividad de distribución de energía eléctrica* estableix l'obligació dels gestors de les xarxes de distribució de sotmetre als organismes competents per a la seva aprovació els seus plans d'inversió anuals i plurianuals d'inversió i desenvolupament de les seves xarxes de distribució d'energia elèctrica. Aquest Reial Decret articula els plans d'inversió en el mecanisme retributiu de l'activitat de distribució d'energia elèctrica.

En aquest context, es va creure convenient endegar el projecte per implementar una eina d'anàlisi i planificació de les xarxes de distribució d'energia elèctrica de mitjana tensió. L'objectiu fonamental que es persegueix amb aquesta eina és detectar les problemàtiques en la xarxa de distribució de mitjana tensió que afecten a la qualitat i continuïtat del subministrament elèctric, i elaborar planificacions de desenvolupament de referència d'aquestes xarxes per contrastar-les amb les que els gestors de les xarxes de distribució



inclouen en els seus plans d'inversió, amb l'objectiu final de determinar la seva suficiència d'aquests plans d'inversió.

Aquesta tesi recull el disseny del *sistema d'anàlisi i planificació de les xarxes de distribució d'energia elèctrica de mitjana tensió*, que inclou una nova metodologia per determinar les planificacions òptimes de desenvolupament d'aquestes xarxes amb l'objectiu que atenguin l'evolució de la demanda amb uns nivells màxims de qualitat i continuïtat del subministrament i amb una inversió mínima.

L'anàlisi de la literatura especialitzada reflecteix l'interès de la comunitat acadèmica durant els darrers quaranta anys en el disseny de metodologies multi-objectives i dinàmiques multi-etapa per a l'obtenció de la planificació òptima d'una xarxa de distribució d'energia elèctrica. No obstant, les metodologies formulades fins avui presenten inconvenients que poden dificultar la seva aplicació en casos reals de planificació. El mòdul de planificació del sistema d'anàlisi i planificació implementa una nova metodologia heurística que permet generar planificacions òptimes i eficients de desenvolupament de la xarxa real de distribució de mitjana tensió de Catalunya, amb caràcter anual per a períodes de planificació de cinc anys, amb uns nivells màxims de qualitat i continuïtat de subministrament i amb una inversió mínima.

## **1.2. Objectiu de la tesi**

L'objectiu d'aquesta tesi és implementar un sistema informàtic d'anàlisi i planificació de les xarxes de distribució de mitjana tensió<sup>1</sup> de Catalunya que elabori planificacions tècnicament i econòmicament òptimes i eficients de desenvolupament de la xarxa de distribució per atendre l'evolució de la demanda en un horitzó de cinc anys, tot donant compliment als paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament recollits en el Reial Decret 1955/2000, de 1 de desembre, *por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica*.

---

<sup>1</sup> S'entén per xarxa elèctrica de distribució de mitjana tensió aquella que està operada a una tensió nominal superior a 1 kV i inferior a 36 kV i que dona subministrament a més d'un client.

El sistema d'anàlisi i planificació de les xarxes de distribució de mitjana tensió ha de:

- Caracteritzar el comportament de la xarxa de mitjana tensió de Catalunya i la seva evolució tendencial en els propers cinc anys, identificant les problemàtiques, presents i futures, de manca de qualitat i continuïtat de subministrament.
- Generar planificacions anuals dels treballs de desenvolupament de xarxa que permeten assolir uns determinats nivells de qualitat i continuïtat de subministrament, que siguin tècnicament i econòmicament òptimes i eficients, i que respecten els nivells màxims de càrrega, caiguda de tensió i continuïtat de subministrament.

En aquest sentit, forma part de l'objectiu de la tesi el disseny d'una metodologia de planificació del desenvolupament de les xarxes de distribució de mitjana tensió que sigui multi-objectiu (mínima inversió i màxims nivells de qualitat i continuïtat de subministrament) i dinàmica multi-etapa (que elabori planificacions dels treballs anuals de desenvolupament de xarxa d'inversió mínima per a tot el període de planificació).

### **1.3. Abast de la tesi**

El sistema d'anàlisi i planificació té el següent abast:

- L'abast temporal dels programes d'inversió anual generats pel sistema és de cinc anys.

El Reial Decret 1048/2013, de 27 de desembre, actualment vigent, estableix que els plans d'inversió han de tenir un horitzó de tres anys, a comptar a partir de l'any següent al de presentació del pla d'inversió per a la seva aprovació. Ara bé, el Reial Decret 222/2008, de 15 de febrer, *por el que se establece el régimen retributivo de la actividad de distribución de energía eléctrica*, actualment derogat, estableix que els plans d'inversió tinguin un horitzó de planificació de quatre anys.

S'ha cregut convenient mantenir el període de planificació de 4 anys del Reial Decret 222/2008, de 15 de febrer, més un corresponent a l'any inicial.

S'ha considerat necessari incorporar les actuacions de desenvolupament de l'any inicial ja que la informació de la xarxa disponible correspon al final de l'any anterior i, per tant, s'ha de generar l'evolució de la xarxa que té lloc l'any en què es presenten els plans d'inversió.

- Només es consideren els increments verticals de demanda de potència; és a dir: la de nova demanda que cal atendre mitjançant l'extensió de la xarxa de mitjana tensió s'ha afegit als nodes existents en la situació inicial.

Aquest fet evita haver de tractar les incerteses relatives a la localització de la nova demanda, sense afectar la determinació dels desenvolupaments estructurals necessaris de les xarxes de distribució existents. Cal tenir en compte que bona part del mercat atès des de les xarxes de mitjana tensió de Catalunya està consolidat, de manera que aquestes xarxes només han de fer front al creixement vegetatiu de la demanda.

Per altra banda, cal tenir en compte que, a dia d'avui, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo no ha aprovat el *Procedimiento de Operación de Distribución 1.1 - Caracterización de la Demanda*, el *Procedimiento de Operación de Distribución 1.2 - Previsión de la demanda* ni el *Procedimiento de Operación de Distribución 2 - Determinación del punto de conexión de suministros* que concreten la previsió de creixement de la demanda i l'extensió de la xarxa associada a càrrec del sistema retributiu.

- Els plans d'inversió generats pel sistema d'anàlisi i planificació han de formular actuacions que tinguin com a objecte els circuits de mitjana tensió, incloent les transformacions entre nivells de mitjana tensió en servei.

Cal tenir en compte que el màxim nivell de detall desagregat dels plans d'inversió dels gestors de les xarxes de distribució de Catalunya arriba fins els circuits de mitjana tensió.

- Les xarxes de distribució seran tractades com a xarxes passives; és a dir: no es tindrà en compte la generació que evacua en elles ni tampoc la presència d'elements de control automàtic.

#### **1.4. Estructura de la tesi**

Aquesta tesi està organitzada en sis capítols i un annex, el contingut dels quals es descriu a continuació:

- Capítol 1, on es descriu la motivació, els objectius i l'abast de la tesi.
- Capítol 2, on es descriu l'evolució de les metodologies desenvolupades de planificació de les xarxes de distribució d'energia elèctrica i el seu estat de l'art actual.
- Capítol 3, on es fa una reflexió sobre l'estat de l'art actual de les metodologies de planificació de les xarxes de distribució d'energia.
- Capítol 4, on es detalla l'estructura del sistema d'anàlisi i planificació desenvolupat en aquesta tesi i, en concret, es descriu el mòdul de planificació dels desenvolupaments de xarxa a mig termini que implementa la nova metodologia heurística de planificació. Aquest capítol també inclou un exemple d'aplicació del sistema, que permet evidenciar l'efecte de les estratègies de millora de l'eficiència de l'heurística formulades en aquesta tesi.
- Capítol 5, que recull les conclusions i les principals aportacions realitzades en aquesta tesi.
- Capítol 6, que recull les línies d'investigació futures.
- Capítol 7, de referències bibliogràfiques consultades durant l'elaboració d'aquesta tesi.
- Annex, on es detalla l'evolució dels paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament de l'exemple del capítol 4.



## 2. Estat de l'art

Aquest capítol recull la revisió realitzada de l'evolució cronològica dels models i metodologies disponibles per al disseny òptim de xarxes de distribució d'energia elèctrica i el seu estat actual de desenvolupament.

La classificació dels models presentada es basa en la realitzada per Bernal (1998) i Domínguez (2000).

### 2.1. Període 1940-1969

Els avanços en el camp de la investigació operativa durant les dècades dels anys 1940 i 1950, i la disponibilitat de major potència de càlcul gràcies als primers ordinadors, varen tenir les següents fites:

- L'any 1947, George Dantzing va desenvolupar el mètode *simplex* per a la resolució de problemes de programació lineal.
- Durant la dècada dels anys 1950 es varen desenvolupar les primeres metodologies en l'àmbit de la programació dinàmica, amb el treball de R. Bellman (1957).
- L'any 1960, A.H. Land i A.G. Doing varen introduir la metodologia *Branch and Bound* per a la resolució de problemes de programació lineal entera pura.
- L'any 1965, R.J. Dakin va descriure un algoritme basat en la metodologia *Branch and Bound* per a la resolució de problemes de programació lineal entera mixta.

El treball de Knight (1960) és el primer en el camp de la planificació òptima de xarxes elèctriques. Knight va adaptar el mètode *simplex* per dimensionar el nombre de circuits necessaris per connectar un conjunt de subestacions. El model no fa un tractament dinàmic del desenvolupament de xarxa.

## 2.2. Període 1970-1979

Durant la dècada dels anys 1970, el camp de la investigació operativa segueix donant els seus fruits amb millores en la metodologia *Branch and Bound* per a la resolució de problemes de programació lineal entera i entera mixta formulada en les dècades anteriors.

En aquest període es desenvolupen els primers models que tracten per separat l'optimització de les subestacions i els seus circuits subsidiaris tot considerant funcions de cost linealitzades. En aquest període també té lloc un primer intent de tractament dinàmic de la planificació del desenvolupament del sistema.

Algunes de les referències més significatives dels desenvolupaments en aquest període són:

- Adams i Laughton (1974) varen dissenyar un model basat en les metodologies *Branch and Bound* i *simplex* per decidir la configuració topològica i tipològica dels circuits, donada la localització de les subestacions que els alimenten. La funció objectiu a optimitzar és el cost total d'expansió del sistema i l'optimització està lligada a determinades restriccions de capacitat dels circuits i de les subestacions.
- Masud (1974) va definir un model per determinar la planificació òptima de la millora de la capacitat de les subestacions de distribució per atendre el creixement dels mercats subsidiaris. Aquest model es basa en la metodologia de programació lineal i entera, subjecta a restriccions de cost, nivell de càrrega, tensió i nivells de reserva d'alimentació.
- Crawford i Holt (1975) varen definir un model per determinar la localització i capacitat de les subestacions. El model minimitza el producte de la potència aparent associada als consums i la distància a les subestacions mitjançant un algoritme *simplex* de cerca de camins òptims (adaptació de l'algoritme de Ford-Fulkerson).

- Hindi i Brameller (1977) varen desenvolupar un model per a l'optimització conjunta de la localització i capacitat de subministrament de les subestacions i dels circuits que alimenten. Hindi i Brameller plantegen un problema programació entera mixta per optimitzar el cost total de desenvolupament del sistema mitjançant un algoritme *Branch and Bound*.
- Wall i altres (1979) varen desenvolupar un model per optimitzar la localització i capacitat dels circuits mitjançant un algoritme *simplex* de cerca de camins òptims. Es linealitzava la funció de cost.

Els models descrits no aborden la dimensió dinàmica de l'optimització del sistema, amb excepció del model d'Adams i Laughton (1974), que proposen l'optimització dinàmica multi-etapa de les configuracions de xarxa conjuntament amb la seva optimització. Ara bé, els autors reconeixen l'elevat cost computacional que implica el model proposat i plantegen una heurística alternativa que només garanteix l'obtenció de configuracions sub-òptimes.

### **2.3. Període 1980-1989**

Durant el període 1980-1989 se segueixen desenvolupant models en l'àmbit de la programació lineal entera mixta (amb aplicació d'algoritmes *Branch and Bound*), si bé apareixen els primers models que fan un tractament no lineal per respondre a les necessitats de millora del tractament de les funcions de cost i del temps d'obtenció de solucions.

Per altra banda, alguns dels models desenvolupats en aquest període aborden la dimensió dinàmica del problema d'optimització. Aquests models es poden classificar en dues categories:

- *Models dinàmics*: Són aquells que optimitzen de forma simultània totes les etapes en la que es divideix el període de planificació.
- *Models pseudo-dinàmics*: Són aquells que optimitzen etapa a etapa, de manera que la solució òptima trobada en una etapa es genera a partir de la solució trobada en l'etapa anterior, mitjançant una optimització local.



Destaquen els següents models en l'àmbit de la programació lineal entera mixta: Gönen i Foote (1981), Thompson i Wall (1981), Sun i altres (1982), El-Kady (1984) i Gönen i Ramírez-Rosado (1986, 1987). Destaca el tractament de la problemàtica dinàmica dels tres darrers:

- El model desenvolupat per Sun i altres (1982) és pseudo-dinàmic, i consisteix en la determinació de la configuració òptima del sistema al final del període per, posteriorment, decidir any a any les instal·lacions que entraran en servei mitjançant una optimització mono-etapa.
- El-Kady (1984) va plantejar un model dinàmic en dues etapes. En la primera etapa s'obté, per a l'horitzó de planificació, la planificació òptima de subestacions i circuits que en depenen. En una segona etapa, l'usuari decideix els subsistemes per als que vol obtenir una planificació temporal més detallada.
- Gönen i Ramírez-Rosado (1986, 1987) desenvoluparen models dinàmics per resoldre simultàniament la localització i la mida òptima de les subestacions i els seus circuits subsidiaris.

Per altra banda, destaquen els primers models en l'àmbit de la programació no lineal:

- Kaplan i Braunstein (1981) varen desenvolupar un model per optimitzar la localització d'una nova subestació en una xarxa existent, basat en una metodologia graf-analítica que parteix de la capacitat de subministrament de la subestació i dels circuits que connecten la subestació amb la xarxa existent. El model no tracta la problemàtica dinàmica.
- Ponnavaikko i Rao (1981) varen desenvolupar un model per determinar la capacitat de subestacions i de circuits subsidiaris basat en el mètode de programació quadràtica entera mixta i el tractament no lineal de les funcions de cost. El model no tracta la problemàtica dinàmica.
- Youssef i altres (1985) desenvoluparen un model per determinar la topologia i capacitat de subestacions i circuits subsidiaris basat en un algorisme de Lagrange d'optimització no lineal contínua.

- Yousef i Hackman (1988) proposen la millora del model anterior per tractar la dimensió dinàmica del problema d'optimització, mitjançant l'aproximació contínua de la planificació multi-etapa.
- Mikic (1986) va desenvolupar un model basat en la programació no lineal entera mixta per dissenyar una xarxa a partir de paràmetres tals com la densitat de càrrega i el factor de potència. El model fa una aproximació estàtica del problema dinàmic.
- Willis i altres (1987) desenvoluparen un model heurístic per a la determinació òptima de subestacions (localització i capacitat de subministrament). El model no tracta la problemàtica dinàmica.
- Ponnavaikko i altres (1987) desenvoluparen un model per a la localització i dimensionat de subestacions, així com dels seus circuits subsidiaris. El model està basat en la programació no lineal entera mixta, i fa un optimització inicial amb variables contínues que posteriorment s'aproxima a valors enters. El model no tracta la problemàtica dinàmica.
- Ben-Dov i altres (1987) desenvoluparen un model heurístic per a la localització de subestacions i els seus circuits subsidiaris que té en compte, per primera vegada, el cost de l'energia no subministrada al consumidor. El model no tracta la problemàtica dinàmica.

#### **2.4. Període 1990-1999**

El període 1990-1999 es caracteritza per la millora de les tècniques clàssiques d'optimització no lineal, l'ús de tècniques heurístiques clàssiques i de noves metodologies meta-heurístiques (orientades a escapar de les solucions òptimes locals per assolir solucions òptimes globals).

Així mateix, en aquest període destaquen les primeres metodologies per tractar tres problemàtiques específiques: la fiabilitat del subministrament, les incerteses i l'optimització multi-objectiu. L'interès també se centra en tractar la planificació dinàmica multi-etapa.

### 2.4.1. Tècniques clàssiques d'optimització

Les metodologies més significatives basades en tècniques clàssiques d'optimització desenvolupades en aquest període són:

- Partanen (1990) va aplicar l'algoritme de Bellman de programació dinàmica per obtenir les estratègies òptimes de millora de la capacitat dels trams d'un circuit radial. La metodologia considera costos reals d'inversió i pèrdues, i la restricció per excessiva caiguda de tensió. Si bé aquesta metodologia permet obtenir estratègies òptimes globals de substitució de conductors, Partanen admet que té un cost computacional excessiu per a problemes amb un nombre elevat d'etapes.
- Ramírez-Rosado i Gönen (1991) varen desenvolupar una metodologia de planificació òptima de noves subestacions i circuits subsidiaris que considera restriccions de capacitat i de caiguda de tensió màxima. La metodologia està basada en el model pseudo-dinàmic desenvolupat per Sun, Farris i altres (1982).

Les metodologies més significatives d'optimització multi-objectiu són:

- Ramírez-Rosado i altres (1994) varen desenvolupar metodologies multi-objectiu per a la planificació òptima de subestacions i dels seus circuits subsidiaris, tot minimitzant el cost de desenvolupament i el cost de l'energia no subministrada, amb restriccions de capacitat i de caiguda de tensió màxima. L'optimització multi-objectiu es basa, entre d'altres, en el mètode híbrid de pesos i de restriccions- $\epsilon$  i en la programació lineal entera mixta. Les metodologies són del tipus dinàmic i pseudo-dinàmic.
- Ramírez-Rosado i Domínguez (1996) varen desenvolupar una metodologia de programació matemàtica difosa per a la localització i determinació de la capacitat òptima de subestacions i circuits subsidiaris, en què es consideren les restriccions de caiguda de tensió màxima i la capacitat dels circuits i subestacions.

### 2.4.2. Tècniques heurístiques clàssiques

L'ús de tècniques heurístiques d'optimització permet la millora del cost computacional d'obtenció de solucions respecte a les tècniques clàssiques d'optimització. La majoria de les metodologies fan servir la tècnica heurística de *branch exchange* proposada per Aoki, Nara, Satoh i altres (1990). Amb tot, aquesta tècnica heurística porta a solucions localment òptimes, sense garantir que s'assoleixi l'òptim global.

Les metodologies més significatives basades en tècniques heurístiques clàssiques d'optimització desenvolupades en aquest període són:

- Aoki i altres (1990) varen desenvolupar una metodologia de programació lineal entera mixta per a la planificació topològica de sistemes radials de distribució. Els autors varen desenvolupar l'algoritme de cerca de l'òptim anomenat *branch exchange*, consistent en afegir i eliminar un tram de circuit per trobar canvis que sempre disminuïssin la funció de cost, tot mantenint la radialitat del sistema. La metodologia no tracta la problemàtica dinàmica.
- Nara i altres (1991) varen ampliar la metodologia anterior per fer un tractament pseudo-dinàmic multi-etapa.
- Nara i altres (1992) varen desenvolupar l'algoritme *multi-state branch exchange* per permetre canvis que incrementessin la funció de cost, sempre i quan fossin transitoris, amb l'objectiu d'escapar de les solucions localment òptimes i assolir les globalment òptimes.
- Tang (1996) va desenvolupar una metodologia basada en la programació no lineal entera mixta pseudo-dinàmica que considera el cost de les interrupcions de subministrament en la funció de cost a optimitzar, amb l'objectiu d'assolir una configuració òptima d'un sistema radial de distribució (subestacions i circuits subsidiaris). El tractament dinàmic consisteix en una optimització mono-etapa i una anàlisi final dels resultats per determinar l'òptim global.

- Lo i Nashid (1996) varen desenvolupar una metodologia de tres fases per trobar el disseny òptim d'un sistema de distribució. En la primera fase es determina la localització de les subestacions en base a un algoritme adaptatiu per minimitzar la funció de cost global del producte de la potència aparent demandada per la distància a la subestació, tot partint de les localitzacions proposades per l'usuari. Posteriorment, el sistema determina el traçat dels nous circuits subsidiaris de les subestacions per atendre els nodes de demanda. Finalment el sistema decideix la capacitat dels conductors d'aquests circuits, minimitzant una funció en què intervenen la inversió i les pèrdues, atenent a la restricció al nivell de tensió mínim. La metodologia no tracta la problemàtica dinàmica.
- Peponis i Papadopoulos (1997) varen desenvolupar una metodologia per determinar la capacitat òptima de les subestacions i dels circuits subsidiaris basada en l'algoritme *branch exchange*. La metodologia elabora una planificació dinàmica.

### **2.4.3. Tècniques meta-heurístiques modernes**

Les tècniques meta-heurístiques modernes resolen la cerca d'òptims globals amb un cost computacional inferior al de les tècniques heurístiques clàssiques, el que permet augmentar la complexitat dels problemes tractats, incorporant el tractament de la fiabilitat i les incerteses.

Les metodologies més significatives basades en tècniques meta-heurístiques modernes d'optimització desenvolupades en aquest període són:

- Miranda i altres (1994) varen desenvolupar una metodologia d'optimització de la topologia d'un sistema de distribució (subestacions i circuits adjacents), en què es minimitza una funció objectiu que incorpora els costos d'inversió, pèrdues, fiabilitat i un cost associat al nivell de tensió. La metodologia implementa un algoritme genètic per obtenir una planificació òptima dinàmica multi-etapa.

- Carvalho i altres (1997) varen desenvolupar una metodologia de planificació de l'expansió d'un sistema amb incertesa pel que fa a la demanda i a localització i cost dels equips, entre d'altres. La incertesa és modelada mitjançant un arbre d'escenaris i es fa una cerca de la solució òptima per a tots els escenaris, amb l'objectiu d'obtenir solucions robustes. La metodologia no tracta la problemàtica dinàmica. La cerca de la solució òptima per a cada escenari es fa mitjançant algorismes genètics.
- Ramírez-Rosado i Bernal-Agustín (1998) varen desenvolupar una metodologia de planificació òptima de subestacions i circuits subsidiaris basada en algorismes genètics. La funció objectiu correspon al cost d'inversió, i l'optimització està subjecta a restriccions pel que fa a caigudes de tensió i capacitat de transport dels circuits i subestacions. La metodologia no tracta la problemàtica dinàmica.
- Ramírez-Rosado i Domínguez (1999) varen desenvolupar una metodologia de planificació òptima de sistemes de distribució basada en la cerca tabú de la solució globalment òptima. La metodologia fa un tractament de les incerteses amb distribucions de probabilitat. La metodologia preveu un tractament dinàmic multi-etapa de la planificació.

## **2.5. Període 2000-2015**

El període 2000-2015 es caracteritza per la millora de les tècniques clàssiques, heurístiques i meta-heurístiques, el que permet tractar amb una major complexitat les problemàtiques de fiabilitat, incertesa i, en especial, l'optimització multi-objectiu.

D'entre les noves metodologies meta-heurístiques desenvolupades destaquen les que realitzen una optimització basada en els algorismes de colònia de formigues desenvolupats per Dorigo i altres (1996).

### 2.5.1. Tècniques clàssiques d'optimització

D'entre les metodologies basades en tècniques clàssiques d'optimització destaca la següent:

- Paiva i altres (2005) varen desenvolupar una metodologia basada en la programació lineal entera mixta per a l'optimització simultània dels sistemes de distribució de mitjana i baixa tensió, tot respectant els límits de capacitat dels conductors, subestacions i transformadors. La metodologia no fa un tractament de la problemàtica dinàmica.

### 2.5.2. Tècniques heurístiques clàssiques

Les metodologies més significatives basades en tècniques heurístiques clàssiques d'optimització desenvolupades en aquest període són:

- Míguez i altres (2002) desenvoluparen una metodologia per optimitzar la capacitat de subestacions i la topologia dels circuits subsidiaris d'aquestes basada en una modificació de l'algoritme de *branch exchange*, tot considerant límits màxims en caiguda de tensió i nivells de qualitat de subministrament. La metodologia parteix de localització de les subestacions i dels nodes de càrrega, així com de la demanda màxima d'aquests. La metodologia realitza una optimització mono-objectiu en què té en compte la inversió i les pèrdues. La metodologia no fa un tractament de la problemàtica dinàmica.
- Peco (2001) desenvolupà una metodologia de disseny òptim d'un sistema de distribució de gran escala per optimitzar de manera simultània els sistemes d'alta, mitjana i baixa tensió. La metodologia no imposa restriccions pel que fa a la qualitat de subministrament, sinó que incorpora en la funció objectiu (optimització mono-objectiu) el cost de l'energia no subministrada. L'optimització dels sistemes radials de mitjana i baixa tensió es basa en l'algoritme de *branch exchange*. La metodologia no fa un tractament de la problemàtica dinàmica.

### 2.5.3. Tècniques meta-heurístiques modernes

Es detallen les metodologies més significatives segons la tècnica meta-heurística emprada:

a) Cerca tabú:

- El treball de Domínguez (2000) consisteix en el desenvolupament de metodologies de planificació òptima basades en la cerca tabú i en la teoria de conjunts difosos per tractar les incerteses inherents en la planificació de sistemes elèctrics. Els models desenvolupats són del tipus mono-objectiu i multi-objectiu. En el cas dels models multi-objectiu, Domínguez incorpora la introducció dels circuits de reserva per millorar la fiabilitat del subministrament. Els models desenvolupats permeten un tractament multi-etapa mitjançant una metodologia pseudo-dinàmica.
- Ramírez-Rosado i Domínguez (2004) desenvoluparen una metodologia d'expansió d'un sistema de distribució basada en la cerca tabú per tractar les incerteses de la previsió de la demanda mitjançant la lògica difosa. Es tracta d'una metodologia multi-objectiu que pretén minimitzar al mateix temps la inversió, el valor esperat de la energia no subministrada i els riscos de sobrepassar la capacitat dels circuits i els límits de nivells de tensió. La metodologia no fa un tractament de la problemàtica dinàmica.
- Cossi i altres (2012) varen desenvolupar una metodologia de planificació òptima de l'expansió d'un sistema de distribució de mida gran mitjançant un algoritme de cerca tabú multi-objectiu. Les funcions objectiu a optimitzar són, per una banda, la inversió i les pèrdues i per l'altra la fiabilitat del subministrament (energia no subministrada). La metodologia fa ús d'un algoritme genètic per determinar la localització òptima de nous seccionadors amb l'objectiu de minimitzar l'energia no subministrada.



b) Algoritmes de colònia de formigues:

- Gómez i altres (2004) varen desenvolupar una metodologia de planificació d'un sistema de distribució (subestacions i circuits subsidiaris) mitjançant un algoritme de colònia de formigues. L'optimització és mono-objectiu (amb una funció objectiu que depèn de la inversió i les pèrdues) i té en compte les restriccions en capacitat de circuits i subestacions i els límits de tensió. La metodologia no fa un tractament de la problemàtica dinàmica.
- Ippolito i altres (2004) dissenyaren una metodologia de planificació òptima multi-objectiu dinàmica multi-etapa per a la definició d'estratègies òptimes de desenvolupament d'un sistema de mitjana i baixa tensió de mida reduïda, minimitzant la inversió en desenvolupament i maximitzant la qualitat de subministrament. La metodologia consta de dues fases: en una primera es generen les configuracions òptimes per a cada subperíode de planificació i posteriorment es determinen les transicions òptimes entre aquestes configuracions. En la primera fase es fa servir un algoritme genètic i en la segona es fa servir un algoritme de colònia de formigues multi-objectiu.

c) Algoritmes evolutius:

- Ramírez-Rosado i Bernal-Agustín (2001) varen desenvolupar una metodologia de planificació òptima multi-objectiu basada en un algoritme evolutiu. La metodologia, basada en la codificació entera de les solucions, permet optimitzar simultàniament la fiabilitat i el cost econòmic de la planificació de grans sistemes de distribució, i determina les solucions òptimes per tal que el planificador pugui escollir la que cregui més satisfactòria. La metodologia no fa un tractament de la problemàtica dinàmica.

- Díaz-Dorado i altres (2002, 2003) varen desenvolupar una metodologia per al traçat de circuits de mitjana (2002) i baixa (2003) tensió en àrees urbanes (2002) i rurals (2003) fent servir algoritmes evolutius que optimitzen la inversió i el cost en pèrdues, atenent a restriccions de caiguda de tensió i capacitat dels circuits i donada la localització de les subestacions i els punts de demanda. La metodologia no fa un tractament de la problemàtica dinàmica.

## 2.6. Resum

L'evolució de les metodologies de planificació òptima dels sistemes de distribució ha anat paral·lela als avanços teòrics en el camp de la investigació operativa.

Durant el període dels anys 1970-1979, les primeres metodologies desenvolupades basades en la programació lineal permetien l'obtenció de solucions aproximades per a sistemes de mida generalment reduïda. D'entre les tècniques més aplicades destaca la *Branch and Bound*. El treball d'Adams i Laughton (1974) evidencia la necessitat d'aprofundir en el tractament de la dimensió dinàmica del problema de planificació.

Durant el període 1980-1989 es fa ús de les metodologies de programació no lineal per representar millor les funcions de cost reals. En aquest període també destaca l'aparició de les primeres metodologies que aborden la dimensió dinàmica del problema de planificació.

Durant el període 1990-1999 es plantegen les primeres metodologies d'optimització multi-objectiu, el tractament de la fiabilitat del subministrament i de les incerteses i s'aprofundeix en el tractament de la dimensió dinàmica del problema de planificació. Destaca l'aparició de la tècnica heurística de *branch exchange*, que permet cercar configuracions de xarxa òptimes mitjançant reconfiguracions topològiques simples, tot i que no evita caure en configuracions localment òptimes. L'aplicació de les tècniques meta-heurístiques modernes, tals com els algoritmes genètics, el recuit simulat i la cerca tabú, permet escapar de les configuracions localment òptimes per assolir configuracions globalment òptimes. En aquest període, l'interès també se centra en tractar la planificació dinàmica multi-etapa.

Durant el període 2000-2015, els desenvolupaments metodològics se centren en l'optimització multi-objectiu (inversió mínima i nivells de fiabilitat màxims) i la planificació multi-etapa dinàmica. Destaquen els avanços en les tècniques meta-heurístiques i l'aparició dels algoritmes de colònia de formigues, amb l'objectiu d'abordar optimitzacions dinàmiques, multi-objectiu i amb tractament de les incerteses.

### 3. Reflexions sobre l'estat de l'art

La determinació de la planificació dinàmica òptima d'una xarxa de distribució d'energia elèctrica, que minimitzi la inversió i maximitzi la fiabilitat del subministrament, atenent a determinades restriccions de capacitat dels circuits, caiguda de tensió i nivell de continuïtat del subministrament, és un problema combinatori per al que l'exploració exhaustiva de les combinacions possibles és inabordable a la pràctica.

La producció acadèmica dels darrers quaranta anys ha tingut com a resultat el desenvolupament de metodologies que permeten resoldre el problema de manera més o menys efectiva i eficient. Sovint, però, les metodologies desenvolupades estan condicionades a les simplificacions introduïdes al problema, tals com:

- Reducció del problema multi-objectiu a un problema mono-objectiu. A tall d'exemple, en el treball de Peco (2001), l'energia no subministrada és monetaritzada i després sumada al cost d'inversió.
- Les formulacions pseudo-dinàmiques al problema multi-etapa són nombroses al llarg de les referències citades.
- Tractament dels costos reals mitjançant aproximacions lineals.

Aquestes simplificacions estan fora de lloc en la resolució del problema que ha motivat aquest treball.

A dia d'avui, la recerca acadèmica se centra en les metodologies que implementen tècniques meta-heurístiques tals com els algoritmes de colònia de formigues, la cerca tabú i els algoritmes evolutius, tots ells en les seves formulacions multi-objectiu. Tal com exposen Coello i altres (2007), aquestes metodologies presenten una sèrie d'inconvenients:

a) Algoritmes multi-objectiu de colònia de formigues:

- Necessitat de prioritzar les funcions objectiu considerades per tal que l'algoritme funcioni correctament, el que condiona l'obtenció de les solucions òptimes globals no dominades.
- Extrema sensibilitat de la qualitat de les solucions obtingudes respecte els paràmetres de control dels algoritmes, el que motiva un procés de calibratge que pot afegir incertesa sobre els resultats que obté la metodologia.

b) Algoritmes multi-objectiu de cerca tabú:

- Dificultat de mantenir una diversitat suficient de les solucions inicials analitzades per poder assolir els òptims globals multi-objectius. Sovint es combina la cerca tabú multi-objectiu amb una altra metodologia que genera les solucions inicials i en garanteixi la seva diversitat. Aquest esquema afegeix un cost considerable de càlcul de les solucions òptimes.
- Dificultat per dissenyar una metodologia eficient de cerca de solucions veïnes a mesura que el nombre de funcions objectiu augmenta.

c) Algoritmes multi-objectiu evolutius:

- Coello i altres (2007) constaten una manca de desenvolupaments teòrics en el camp de l'algorísmica que permetrien la millora en l'eficiència i l'efectivitat dels algoritmes multi-objectiu existents i, en especial, pel que fa a assolir una diversitat suficient de les solucions òptimes multi-objectiu.

Per altra banda, s'observa una tendència a introduir actuacions tipificades pels gestors de xarxa de distribució durant l'exploració de l'espai de solucions òptimes. És el cas dels nous circuits de reserva per millorar els nivells de continuïtat de subministrament prevista a Domínguez (2001).

Amb tot, és palès el consens en la comunitat acadèmica per seguir investigant en la millora de les metodologies d'optimització dinàmica multi-objectiu que resolguin el problema plantejat de manera satisfactòria.

Davant d'aquesta situació, i atenent a la necessitat de cercar una solució al problema multi-objectiu i multi-etapa dinàmic plantejat en aquest treball, s'ha cregut convenient abordar-lo en la seva formulació combinatòria clàssica mitjançant una metodologia heurística basada en l'algoritme de Bellman. Aquesta aproximació permet donar resposta a les tres necessitats plantejades:

- Necessitat de determinar actuacions tipificades de desenvolupament de les xarxes de distribució que es troben en els plans d'inversió dels gestors d'aquestes xarxes: canvi de tensió, reassignació de càrregues a una nova subestació, millora de la reserva, etc.
- Necessitat de determinar planificacions òptimes i eficients.
- Necessitat de caracteritzar les solucions que no són òptimes properes a les solucions òptimes.

El capítol següent conté la descripció del sistema d'anàlisi i planificació de xarxes de distribució de mitjana tensió, que incorpora un mòdul de planificació dels desenvolupaments de xarxa a mig termini que implementa aquesta heurística.

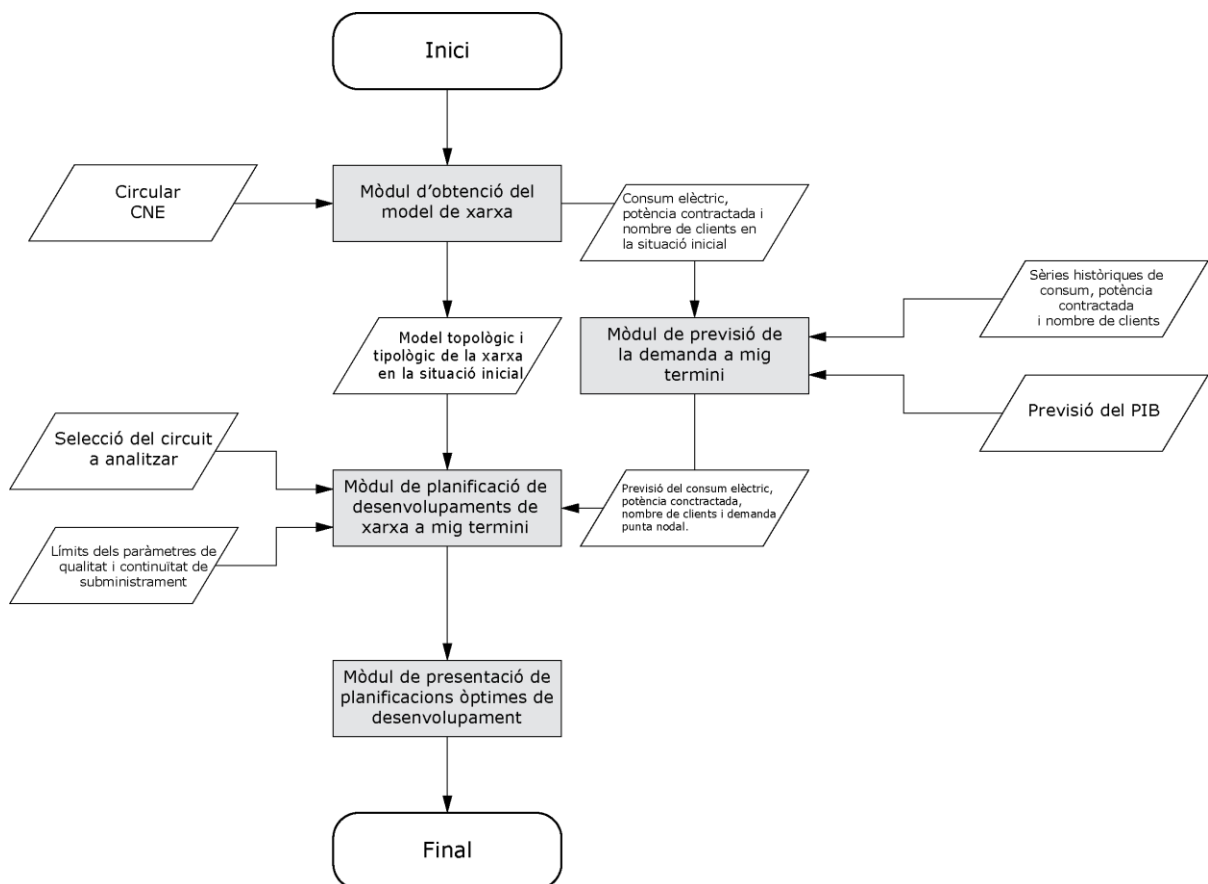


#### 4. Estructura del sistema d'anàlisi i planificació

Aquest capítol conté l'especificació del sistema d'anàlisi i planificació de les xarxes de distribució d'energia elèctrica de mitjana tensió.

El Sistema d'anàlisi i planificació s'estructura en quatre mòduls, l'execució dels quals es mostra al diagrama de fluxos de la il·lustració següent:

- Mòdul d'obtenció del model de xarxa.
- Mòdul de previsió de la demanda a mig termini.
- Mòdul de planificació dels desenvolupaments de xarxa a mig termini.
- Mòdul de presentació de les planificacions òptimes de desenvolupament.



**Il·lustració 1:** Diagrama de fluxos del sistema d'anàlisi i planificació.

El sistema d'anàlisi i planificació s'ha desenvolupat en llenguatge C++ amb el que s'ha creat una aplicació per a ser executada en un entorn Microsoft Windows de 64 bits.



#### **4.1. Mòdul de modelització de la xarxa de distribució**

Es disposa de la informació que els gestors de la xarxa de distribució han lliurat a la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (que assumeix les competències de l'antiga Comisión Nacional de Energía) en resposta a la seva Circular 3/2012, de 12 de juliol, *de petición de información del ejercicio 2011 a remitir por las empresas distribuidoras de energía eléctrica a la Comisión Nacional de Energía para el cálculo del incremento de actividad de distribución y supervisión de la misma.*

D'acord amb les especificacions de la Circular 3/2012, la informació proporcionada pels gestors de les xarxes de distribució està geo-referenciada i actualitzada a 31 de desembre de 2011. Aquesta informació conté la descripció de les infraestructures de distribució i del mercat al que donen subministrament.

El mòdul de modelització de la xarxa de distribució obté un graf amb informació de detall de cada circuit MT. El graf associat a cada circuit obtingut és connex i radial, i els seus vèrtexs corresponen a nodes de càrrega, nodes de capçalera situats als parcs de distribució de les subestacions i centres de maniobra, elements de control i fiabilitat, nodes T de derivació i altres nodes topològics, mentre que les arestes corresponen a trams de circuit i als transformadors MT/MT. S'ha considerat la demanda equilibrada entre fases. Cal assenyalar que el mòdul de modelització de xarxa estima l'estat d'operació dels elements de control i fiabilitat, ja que no està incorporat en la informació sol·licitada per la CNMC.

Els nodes amb càrrega del graf estan caracteritzats pel nombre de clients, la potència instal·lada i la potència contractada, així com el consum durant l'any 2011. Les característiques elèctriques de les línies, cables subterranis i transformadors s'han tipificat d'acord amb els estàndards dels gestors de la xarxa de distribució reflectits en les seves Normes Tècniques Particulars comunicades, i en algun cas aprovades, a la Generalitat de Catalunya. Cal mencionar que les característiques elèctriques tipificades inclouen les taxes d'incidència i de reparació, que serviran per al càlcul dels índexs de continuïtat del servei.

Cal assenyalar que la CNMC està centrant actualment els seus treballs en definir un format de petició de dades estable i, com a resultat d'aquest fet, s'observa que les modificacions que introdueix en les seves circulars anuals de sol·licitud d'informació als gestors de les xarxes de distribució tenen un abast menor a mesura que transcorren els anys. Aquest fet dóna molta estabilitat al mòdul de modelització de la xarxa de distribució implementat, limitant els canvis en el mateix per tractar la informació que segueixi l'especificació de futures circulars.

El mòdul de modelització de la xarxa de distribució té les següents limitacions:

- El mòdul no considera l'edat dels elements de la xarxa ni el seu envelliment durant el període de planificació en les taxes d'incidència. Cal tenir en compte que la informació que els gestors de les xarxes de distribució proporcionen a la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia no inclou el temps que els elements de xarxa han estat en servei.
- No s'han modelitzat les transformacions AT/MT, ja que es considera que les configuracions òptimes de les subestacions requereixen un tractament específic, en el que s'ha de tenir en compte la normativa vigent relativa als nivells de reserva de transformació.

El mòdul de modelització de la xarxa de distribució estructura la informació mitjançant un sistema d'informació geogràfic, el que permet tant la visualització de problemàtiques de subministrament com el tractament de la informació pels mòduls de planificació i de presentació de resultats.

Per altra banda, el sistema d'informació geogràfica també incorpora la informació geo-referenciada, actualitzada a 31 de desembre de 2011, de les infraestructures de transport d'energia elèctrica i de distribució AT (amb una tensió nominal igual o superior a 36 kV). Aquesta informació permet a l'usuari avaluar les possibilitats d'obertura de circuits per a noves injeccions AT/MT i proposar localitzacions al mòdul de planificació per tal que aquest avalui la necessitat temporal de reconfiguració de la xarxa MT cap a les noves subestacions, tal i com es descriurà posteriorment en l'especificació del mòdul de planificació dels desenvolupaments de xarxa a mig termini.

L'anàlisi dels circuits MT tracta els quatre aspectes que es descriuen a continuació:

#### **4.1.1. Anàlisi de repartiment de càrregues**

S'ha implementat un algoritme específic per a l'anàlisi de repartiment de càrregues en situació de demanda punta (màxima horària) específic per a circuits radials amb càrregues equilibrades entre les fases i passives (sense presència de generadors que evacuen en elles ni elements de control automàtic), i amb la demanda independent del nivell de tensió. No s'ha implementat cap tractament d'indeterminacions.

Com a resultat de l'anàlisi de repartiment de càrregues s'obté el nivell de càrrega màxim del circuit i el nivells de tensió mínim en el mateix. Els límits legals d'aquests paràmetres estan establerts en el Reial Decret 1955/2000, de 1 de desembre.

#### **4.1.2. Anàlisi de continuïtat de subministrament**

S'ha implementat una anàlisi de continuïtat de subministrament determinista basada en processos de Markov per a la determinació dels paràmetres TIEPI i NIEPI de continuïtat de subministrament. Aquests paràmetres només tenen en compte les interrupcions amb una durada superior a 3 minuts i les fallades permanents.

El Reial Decret 1955/2000, de 1 de desembre, conté la definició dels paràmetres TIEPI i NIEPI, així com també els seus valors màxims de referència.

Com ja s'ha mencionat anteriorment, es disposa de la localització i estat d'operació habitual dels elements de fiabilitat i control de xarxa, així com de les taxes de fallada dels elements de xarxa. S'ha considerat que les reserves entre circuits permeten atendre tot el mercat de cada un d'ells (reserva total). Així mateix, s'ha ajustat el temps de reparació a partir dels valors de qualitat del subministrament zonal.

### 4.1.3. Anàlisi de marge de creixement

S'ha implementat el càlcul de l'índex de marge de creixement, que permet determinar la capacitat per atendre el creixement d'un mercat qualsevol (conjunt de nodes de demanda i valor de la seva demanda punta) en funció de la topologia i tipologia de la xarxa que li dóna subministrament.

El marge de creixement es defineix com el sumatori dels marges de creixement dels nodes de càrrega, definits com la potència aparent en què la demanda del node pot augmentar fins saturar algun element de xarxa que es troba aigües amunt d'aquest, tot mantenint constant la demanda dels altres nodes.

### 4.1.4. Anàlisi de punts crítics de subministrament

S'ha implementat la determinació de punts crítics de subministrament, associats a una manca de qualitat de subministrament de la demanda. Els punts crítics són els màxims locals de la funció definida per la següent expressió:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \text{FPCoef}_i \cdot e^{-100 \cdot \text{FPCoef}_i \cdot \text{dist}(x,y)_i} \quad [1]$$

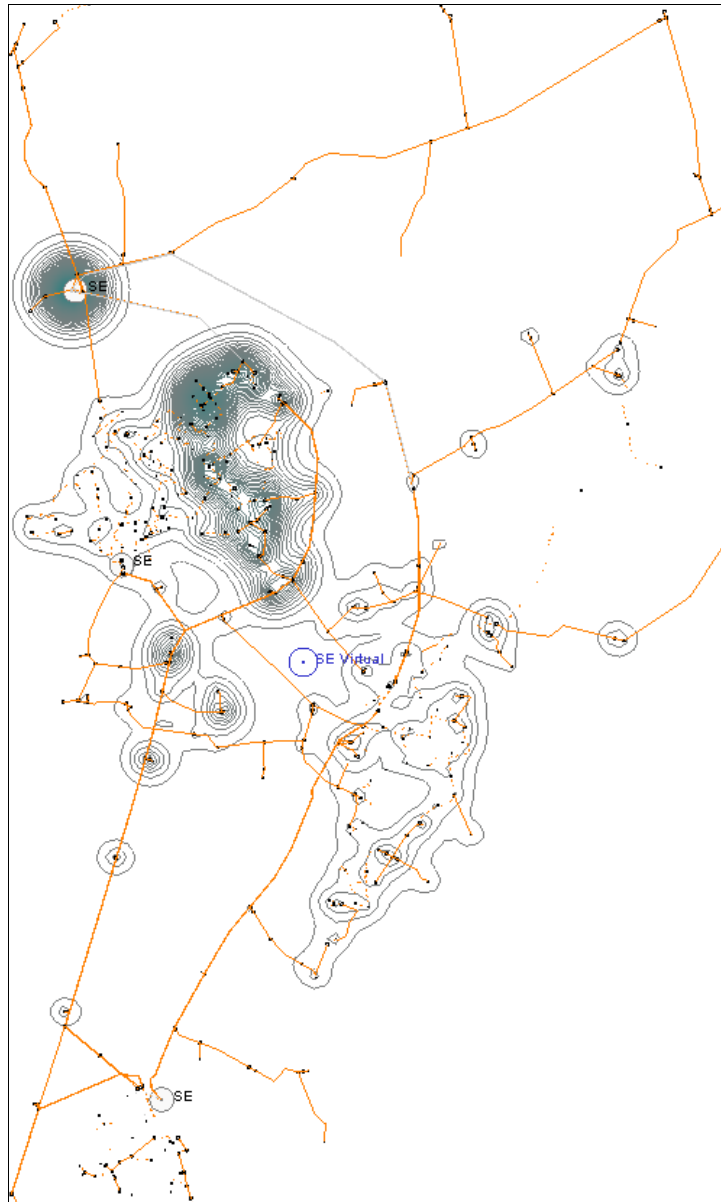
On:

- $\text{FPCoef}_i$  és el factor de contribució a la punta del node de càrrega  $i$ , que està definit per la següent expressió:

$$\text{FPCoef}_i = 1000 \cdot (1 - v_i) \cdot S_{c_i} \quad [2]$$

- $v_i$  és el mòdul de la tensió del node de càrrega  $i$ , en p.u.
- $S_{c_i}$  és la demanda aparent del node de càrrega  $i$ , en p.u.

El sistema d'anàlisi i planificació genera una visualització de la funció de criticitat de subministrament, el que permet la identificació dels punts crítics i orienta l'usuari en el procés de localització de subestacions i centres de maniobra "virtuals" als que el mòdul de planificació dels desenvolupaments de la xarxa MT podrà reassignar part del mercat actual de la zona. A la il·lustració següent, la funció de criticitat es mostra en color verd i la xarxa de distribució MT en color marró.



**Il·lustració 2:** Avaluació de la funció de criticitat de la xarxa de distribució MT en una zona urbana.

## 4.2. Mòdul de previsió a mig termini

S'ha implementat un mòdul de previsió a mig termini del consum elèctric, la demanda de potència punta (màxima horària) i el nombre de clients. La metodologia implementada és del tipus determinista, està basada en metodologies econòmiques i anàlisis de sèries temporals i s'estructura en tres etapes d'execució seqüencial:

- Anàlisi de les sèries històriques de consum elèctric, potència contractada i nombre de clients a nivell comarcal per identificar la correlació entre elles i amb la sèrie històrica del Producte Interior Brut (PIB) comarcal.
- Previsió del consum elèctric, potència contractada i nombre de clients a nivell comarcal a partir de la previsió de PIB comarcal i de les correlacions històriques.
- Previsió de la demanda de potència punta (màxima horària) a partir de les previsions de consum elèctric, potència contractada i nombre de clients.

La base d'anàlisi geogràfica d'aquestes previsions és comarcal, degut a la necessària significació estadística de les agrupacions de dades. El nivell municipal està massa condicionat a comportaments singulars de les càrregues presents que poden desvirtuar la necessària significació estadística de les previsions.

Com ja s'ha indicat anteriorment, es disposa de la potència contractada i del nombre de clients totals de cada node MT en situació de 31 de desembre de 2011. S'han diferenciat els subministraments en baixa tensió dels subministraments en mitjana tensió. Aquesta informació permet caracteritzar la situació inicial de la previsió.

Per a determinar l'evolució de la demanda de potència nodal en situació de demanda punta (màxima horària) per circuit MT s'han aplicat els coeficients comarcals obtinguts en les etapes anteriors i s'ha considerat l'efecte de la simultaneïtat mitjançant els coeficients de simultaneïtat detallats en la documentació de referència del model Bulnes (veure HC (1997)), d'aplicació per part l'Administració General de l'Estat en la metodologia retributiva de l'activitat de distribució.

Com ja s'ha mencionat anteriorment, només s'han considerat els increments vegetatius verticals de la demanda de potència; és a dir: l'aparició de nova demanda que cal atendre mitjançant l'extensió de la xarxa de mitjana tensió és assimilada en els nodes existents en la situació inicial analitzada.

#### **4.3. Mòdul de planificació dels desenvolupaments de xarxa a mig termini**

El mòdul de planificació a mig termini té per objectiu determinar les planificacions òptimes i eficients del desenvolupament d'un circuit de mitjana tensió, donats els següents paràmetres d'entrada:

- Model de xarxa obtingut en el mòdul de modelització de la xarxa de distribució.
- Previsió de creixement de la demanda de potència, consum i nombre de clients del mercat que aquest atén obtinguda en el mòdul de previsió a mig termini.
- Valors límit anuals de nivell de càrrega màxim, caiguda de tensió màxima i valors màxims del TIEPI i NIEPI.
- Localització de subestacions i centres de maniobra "virtuals", obtingudes amb ajuda de l'anàlisi dels punts crítics de subministrament.

En l'elecció de les localitzacions de les noves subestacions i/o centres de maniobra "virtuals", l'usuari ha de tenir en compte la normativa vigent pel que fa a l'obertura de circuits AT, bé siguin de transport o de distribució, així com la relativa a la implementació de noves infraestructures AT d'entrada i sortida de les subestacions.

Més enllà del detall de l'evolució anual de la xarxa de mitjana tensió, les planificacions de desenvolupament dels circuits de mitjana tensió identifiquen les actuacions que cal sotmetre al circuit de mitjana tensió analitzat. Aquestes actuacions són les es troben en els plans d'inversió que els gestors de les xarxes de distribució sotmeten a la Generalitat de Catalunya per a la seva aprovació, i que responen als criteris recollits en la normativa i en la pràctica habitual de planificació del sector.

Per altra banda, la periodicitat anual de les planificacions de desenvolupament ve determinada pel format dels plans d'inversió que es volen analitzar. En aquest sentit, els resultats del sistema d'anàlisi i planificació han de permetre avaluar la conveniència de l'avançament i/o endarreriment de les inversions previstes pels gestors de les xarxes de distribució.

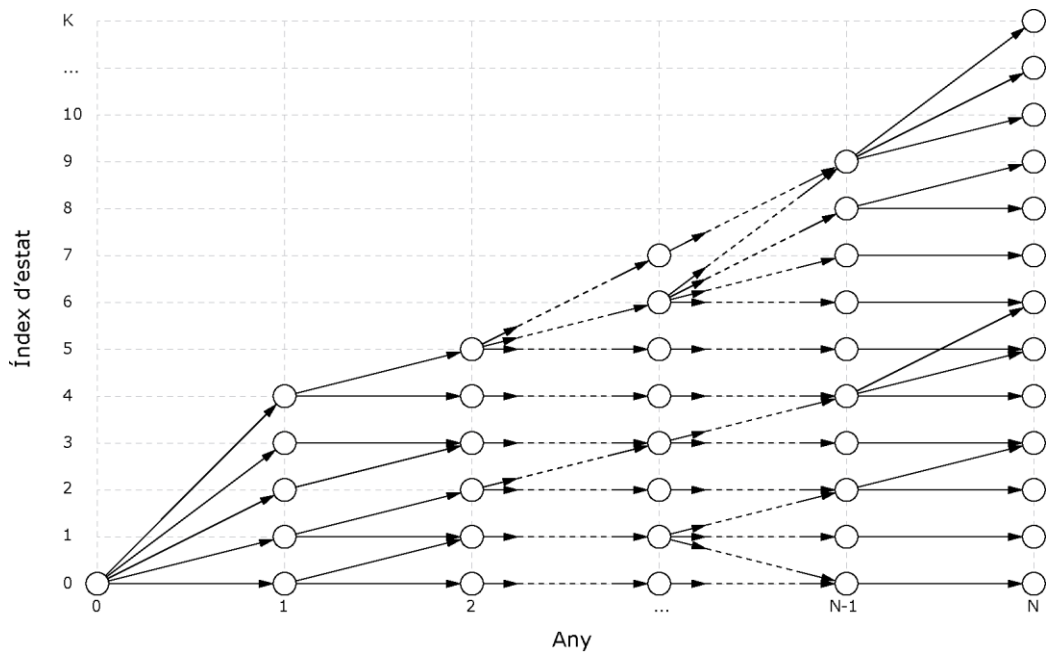
#### **4.3.1. Metodologia de determinació de les planificacions òptimes de desenvolupament d'un circuit de mitjana tensió**

La determinació de les planificacions òptimes de desenvolupament d'un circuit de mitjana tensió s'obté en tractar-lo com un problema de programació dinàmica multi-objectiu. L'algoritme de Bellman permet resoldre els problemes de programació dinàmica. En el mòdul de planificació s'ha adaptat l'algoritme de Bellman per considerar les especificitats del problema a tractar, el que ha permès disminuir el cost computacional d'obtenció dels resultats.

L'algoritme de Bellman (veure Cormen i altres (2009)) determina el camí de cost mínim entre un node i la resta de nodes d'un graf dirigit, etiquetat i sense cicles. Un graf dirigit és aquell en què les arestes tenen una orientació, i un graf etiquetat és aquell en què les arestes tenen un pes assignat. Alhora, el graf que modelitza el problema de programació dinàmica genèric no conté cicles.

La il·lustració 3 mostra un graf genèric que modelitza un problema de programació dinàmica genèric.





**II-lustració 3:** Graf genèric dirigit i orientat que modelitza un problema de programació dinàmica.

L'algoritme de Bellman per a la determinació del camí de cost mínim entre un node origen i qualsevol altre node d'un graf dirigit, etiquetat i sense cicles consisteix en l'aplicació de la següent fórmula:

$$F(E_0, E_j) = \text{mínim}_{(m = 0 \text{ fins a } L-1)} [ F(E_0, E_m) + F(E_m, E_j) ] \quad [3]$$

On:

- $E_i$  és el node  $i$ .
- $L$  és el nombre total de nodes del graf.
- $F(E_a, E_b)$  és el cost associat a la seqüència d'arestes que conformen la transició de cost mínim entre els nodes  $E_a$  i  $E_b$ .

Si no existeix una aresta òptima entre els nodes  $E_a$  i  $E_b$ , el cost que és infinit.

En tractar-se d'un graf que modelitza un problema de programació dinàmica, la determinació del cost associat a una transició òptima es pot realitzar per fites temporals; és a dir: una vegada determinades totes les transicions

òptimes entre el node  $E_0$  i els nodes associats a un any  $n$  qualsevol, es procedeix a determinar les transicions òptimes entre el node  $E_0$  i els nodes associats a l'any  $n+1$ , tot considerant el cost de transició entre el node inicial i els nodes associats a l'any  $n$  anterior.

Cal destacar dos fets en relació a l'algoritme de Bellman aplicat a la programació dinàmica:

- L'algoritme de Bellman permet generar el graf a mesura que s'avança en l'anàlisi de les fites temporals. És a dir: no cal haver avaluat totes les transicions amb caràcter previ a l'aplicació de l'algoritme de Bellman.
- L'algoritme de Bellman no determina quin node associat a la darrera fita temporal és el "millor".

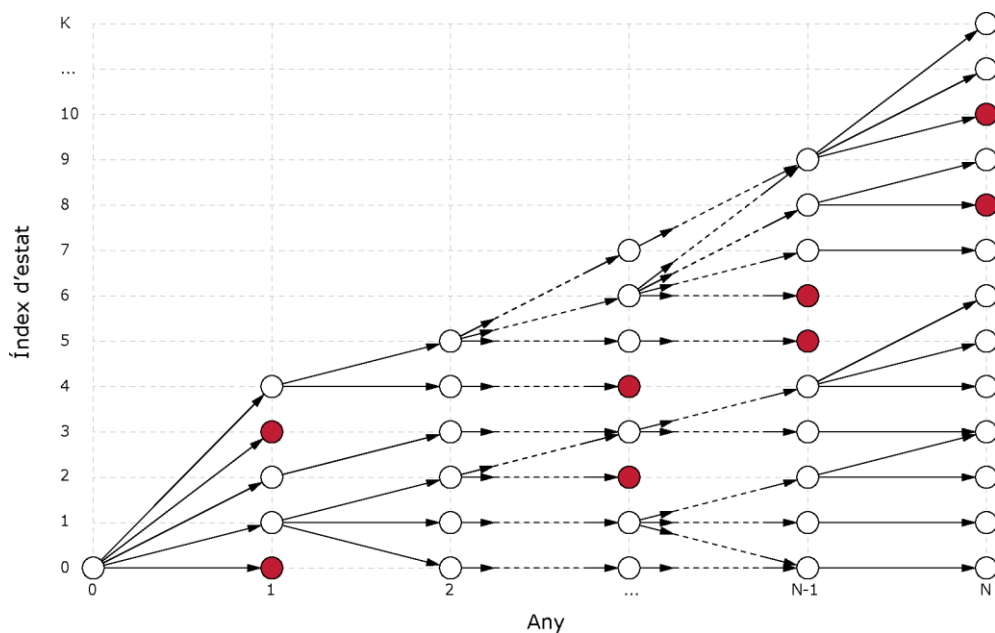
L'aplicació de l'algoritme de Bellman al problema de la determinació de les planificacions òptimes d'actuacions anuals per al desenvolupament d'un circuit MT és immediata:

- Els nodes del graf de modelització del problema de programació dinàmica estan associats, cada un d'ells, a un estat del circuit MT analitzat, definit per una configuració topològica i tipològica determinada d'aquest, i per un nivell de demanda nodal del mercat subsidiari que depèn de la fita temporal concreta.
- Les arestes del graf de modelització del problema de programació dinàmica representen les transicions entre els estats del circuit MT analitzat. Les arestes estan orientades i només són permeses les transicions des d'un estat de l'any  $t$  a un estat de l'any  $t+1$ . Per altra banda, el cost de transició entre estats és sempre igual o superior a 0 i ve determinat únicament per l'estat concret i la planificació anual de desenvolupament al que li és aplicat.

El mòdul de planificació dels desenvolupaments de xarxa a mig termini implementat optimitza el valor de la inversió anual en noves instal·lacions, a preus constants de l'any 0, actualitzada mitjançant una taxa real d'actualització (exclòs l'efecte de la inflació), definida per l'usuari (per defecte el sistema estableix una taxa del 5% anual). No s'han considerat

altres costos, tals com els associats a les pèrdues tècniques o a l'energia no subministrada, ja que l'elecció de l'estat final al que ha d'evolucionar el circuit MT, amb uns determinats nivells de qualitat i continuïtat de subministrament associats, recau en l'usuari del sistema. És a dir, l'algoritme de Bellman permet caracteritzar el front de Pareto de solucions no dominades.

Per altra banda, els estats que s'obtenen durant el període de planificació han de complir els nivells reglamentaris de qualitat i continuïtat de subministrament i els límits establerts per l'usuari. En aquest sentit, el sistema implementat avalua la suficiència dels nivells de qualitat i continuïtat de subministrament associats a un estat respecte els límits normatius i els establerts per l'usuari del sistema. En cas que els nivells associats a un estat no siguin suficients, el sistema descartarà l'estat per a l'expansió del graf a la fita temporal següent. Al graf de la il·lustració següent, els nodes associats als estats amb un comportament no suficient s'han identificat amb el color vermell.



**Il·lustració 4:** Graf genèric dirigit i orientat que modelitza els estats de xarxa i la determinació de les planificacions de desenvolupament del circuit MT. En vermell els nodes associats a estats amb un comportament no suficient.

Aquesta poda dels estats no suficients acota l'expansió del graf d'anàlisi i disminueix el cost computacional de la determinació de les planificacions òptimes de desenvolupament. Aquesta adaptació de l'algoritme de Bellman

forma part d'un conjunt d'adaptacions que es descriurà posteriorment en aquest capítol.

#### **4.3.2. Transicions entre estats: Operadors de circuit**

Les transicions entre estats s'obtenen per aplicació al circuit de mitjana tensió seleccionat d'operadors que modelen l'efecte dels criteris de planificació de les xarxes radials de distribució d'energia elèctrica de mitjana tensió establerts en la normativa vigent i en la pràctica comuna dels gestors de les xarxes de distribució de Catalunya.

Els operadors de circuit modifiquen la topologia (estructura) i/o la tipologia (paràmetres elèctrics) del circuit analitzat. Alguns dels operadors de circuit implementats generen nous circuits als que s'assignarà part del mercat que atén inicialment el circuit analitzat. El sistema també preveu actuacions de desenvolupament d'aquests circuits associats al llarg del període de planificació; és a dir: els operadors de circuit tenen per objecte, a la pràctica, el mercat inicial que atén el circuit analitzat.

Per altra banda, s'han introduït unes regles de seqüenciació d'operadors de circuit amb dos objectius:

- Modelitzar la complexitat de les planificacions de desenvolupament de xarxa que tenen lloc en un mateix any.
- Modelitzar les planificacions de desenvolupament dels nous circuits que es creen per reassignació de part del mercat del circuit inicial.

En aquest capítol es descriuen els operadors de circuit implementats i les seves regles de seqüenciació.

Cal mencionar que en la implementació dels operadors de circuit s'han tingut en compte les tipologies i els costos estàndard d'inversió declarats per cada gestor de la xarxa de distribució a la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia.

#### **4.3.2.1. Operador de circuit de canvi de tensió**

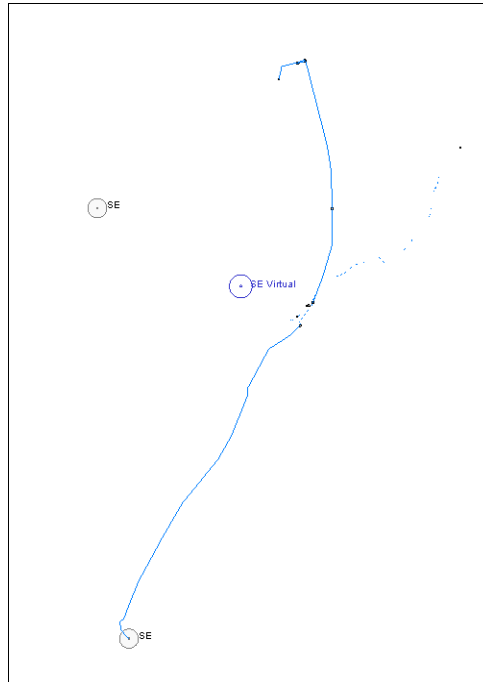
L'operador de circuit de canvi de tensió realitza la conversió de la tensió nominal del circuit analitzat al nivell superior estàndard aprovat per la Generalitat de Catalunya.

L'operador de canvi de tensió substitueix els elements de xarxa que operen a una tensió nominal inferior al nivell superior estàndard autoritzat i elimina les transformacions MT/MT existents. En la implementació d'aquest operador no s'ha incorporat el cost de substitució dels centres de transformació, ja que es desconeix la propietat real dels mateixos i, en a banda, existeixen problemàtiques específiques que poden provocar variacions molt significatives del cost de substitució d'aquests centre de transformació.

La conversió del nivell de tensió nominal de la xarxa de distribució a un nivell superior incrementa la capacitat d'atendre nous subministraments i millora la possibilitat de reserva entre circuits gràcies a la homogeneïtzació dels nivells de tensió nominals en una zona concreta.

L'expansió de les xarxes de distribució preparades per operar amb un nivell de tensió estàndard és una estratègia de desenvolupament generalitzada de tots els gestors de la xarxa de distribució que operen a Catalunya. Per altra banda, l'article 10.5.f de la Llei 18/2008, de 23 de desembre, *de garantia i qualitat del subministrament elèctric* estableix que els plans d'inversió dels gestors de les xarxes de distribució han de preveure la unificació dels nivells de tensió de les xarxes de distribució cap a l'estàndard de cada empresa distribuïdora aprovat per la Generalitat de Catalunya, de manera que les expansions de la xarxa i la substitució d'instal·lacions obsoletes s'ha de realitzar a la tensió estàndard aprovada.

La il·lustració següent mostra el circuit de 6 kV tipus al que s'aplica l'operador de canvi de tensió:



**Il·lustració 5:** Circuit tipus en situació prèvia a l'aplicació de l'operador de canvi de tensió al circuit tipus de 6 kV.

El resultat de l'aplicació de l'operador de canvi de tensió al circuit tipus de 6 kV es mostra a la taula següent:

Paràmetre	Situació inicial	Situació final	Variació
Injecció capçalera [MW]	0,41	0,40	-0,80%
Injecció capçalera [MVar]	0,20	0,19	-4,49%
Injecció capçalera [MVA]	0,45	0,45	-1,54%
Pèrdues [MW]	0,86	0,06	-93,46%
Tensió mínima [p.u.]	0,981	0,999	0,018
Nivell de càrrega màxim [%]	12,52	83,16	-10,24
Marge creixement [MVA]	0,36	8,63	502,68%
TIEPI [hores interrup. / any]	0,71	0,71	0
NIEPI [nombre interrup. / any]	1,40	1,40	0
Inversió [M€]		0,426	

**Taula 1:** Resum de l'aplicació de l'operador de canvi de tensió al circuit tipus de 6 kV.

L'operador canvi de tensió s'ha identificat amb l'anotació {10} i el sistema el pot aplicar només una vegada a un circuit durant tot el període de planificació.

#### 4.3.2.2. Operador de circuit de desdoblament

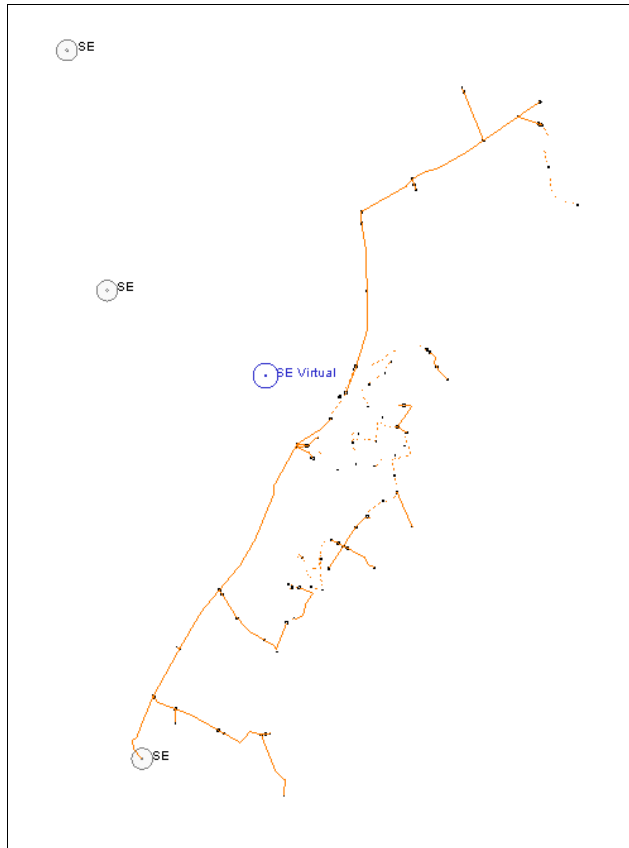
L'operador de circuit de desdoblament genera un nou circuit al que s'assigna part del mercat que atén el circuit analitzat. Aquest nou circuit s'alimenta des de la mateixa subestació que el circuit analitzat.

La implementació de l'operador consisteix en l'execució seqüencial dels següents passos:

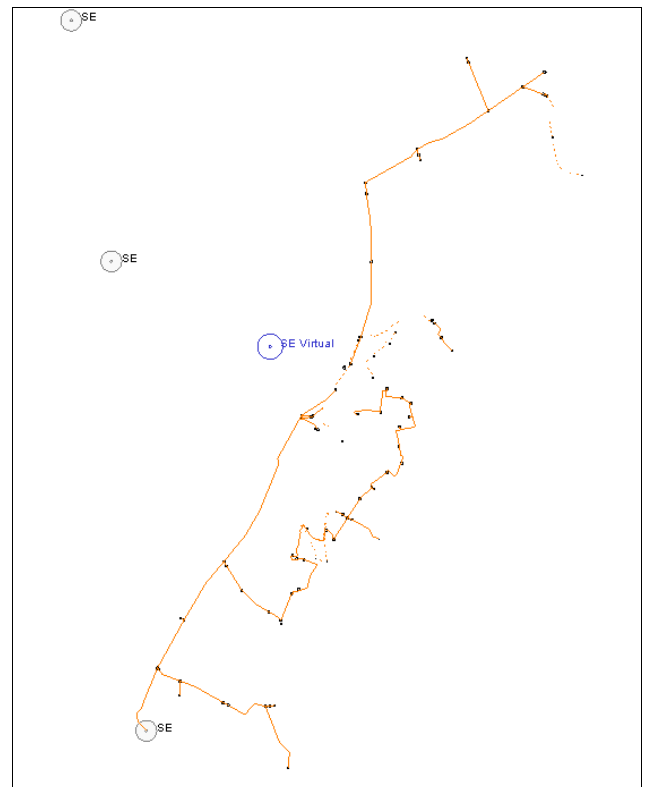
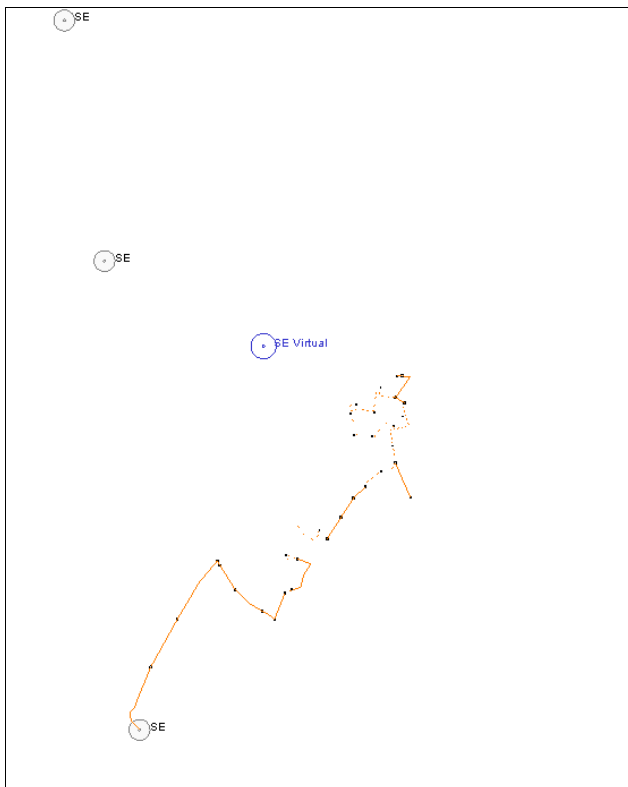
- Pas 1: *Determinació del tronc del circuit*: El sistema determina el tronc del circuit com el conjunt connex de trams del circuit que tenen la màxima circulació de potència.
- Pas 2: *Identificació dels ramals*: El sistema identifica els ramals del circuit com tots aquells sub-grafs que tenen per capçalera un node del tronc principal i no contenen cap tram de circuit que pertanyi al tronc principal.
- Pas 3: *Determinació del nou circuit associat*: El nou circuit associat és aquell que conté la combinació de ramals del circuit inicial tals que es compleixin les dues condicions:
  - a) La longitud del tronc del nou circuit associat ha de ser la mínima possible.
  - b) El sistema assignarà al nou circuit associat un mínim del 50% de la demanda de potència del circuit inicial, tot respectant la connectivitat i la radialitat dels dos circuits resultants.

Els trams de tronc del nou circuit associat que cal instal·lar per a connectar-hi els ramals que provenen del circuit inicial tindran la mateixa tipologia que els trams del tronc analitzat. El sistema introdueix un element de control (seccionador normalment obert) entre els dos circuits per permetre la reserva d'alimentació entre ells.

Les il·lustracions següents mostren un exemple d'aplicació de l'operador de desdoblament de circuit a un circuit de 25 kV (en endavant circuit tipus de 25 kV) de la zona urbana analitzada en l'apartat 4.1.4.



**Il·lustració 6:** Circuit tipus de 25 kV en situació prèvia a l'aplicació de l'operador de desdoblament.



**Il·lustració 7:** Circuits resultants de l'aplicació de l'operador de desdoblament al circuit tipus de 25 kV.



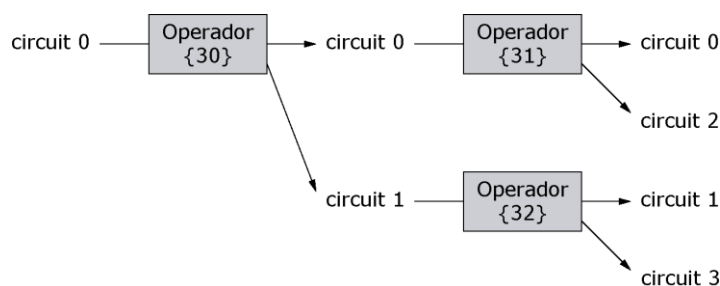
El resultat de l'aplicació de l'operador de desdoblament de circuit al circuit tipus de 25 kV es resumeix a la taula següent:

Paràmetre	Situació inicial	Situació final	Variació
Injecció capçalera [MW]	13,19	13,09	-0,75%
Injecció capçalera [MVar]	6,65	6,49	-2,50%
Injecció capçalera [MVA]	14,77	14,61	-1,10%
Pèrdues [MW]	2,05	1,31	-36,24%
Tensió mínima [p.u.]	0,962	0,973	0,012
Nivell de càrrega màxim [%]	115,20	83,16	-32,04
Marge creixement [MVA]	4,46	8,63	93,69%
TIEPI [hores interrup. / any]	1,50	0,98	-34,94%
NIEPI [nombre interrup. / any]	2,93	1,91	-34,83%
Inversió [M€]		0,426	

**Taula 2:** Resum de l'aplicació de l'operador de desdoblament de circuit al circuit tipus de 25 kV.

Cal notar que els valors de la situació final que apareixen a la taula corresponen a la combinació dels paràmetres dels dos circuits resultants.

El sistema pot aplicar l'operador de desdoblament fins a tres vegades al mateix circuit durant el període de planificació, generant fins a un màxim de tres circuits MT nous associats. En conseqüència, l'operador de reassignació de càrregues s'ha identificat amb les anotacions {30}, {31} i {32}, tal com es mostra a la il·lustració següent:



**Il·lustració 8:** Esquema d'aplicació de l'operador de desdoblament en funció del circuit associat al circuit analitzat.

En cas que el tronc del circuit 0 tingui una tipologia aèria, s'estima que el tronc del nou circuit estarà sobre la mateixa traça que el circuit 0 i el tronc dels circuits 2 i 3 discorrerà en una traça paral·lela adjacent a la dels circuits 0 i 1; És a dir: el sistema no avalua les possibilitats d'estesa d'una nova traça per als circuits 2 i 3, sinó que la pressuposa viable.

#### 4.3.2.3. Operador de circuit de reassignació de càrregues

L'operador de circuit de reassignació de càrregues implementa la reassignació de càrregues als parcs MT de les subestacions en servei o de les subestacions i centres de maniobra "virtuals" per als que el sistema determinarà la seva entrada en servei durant el període de planificació, donades unes localitzacions prioritàries definides per l'usuari obtingudes prèviament amb ajuda de la metodologia d'anàlisi de punts crítics descrita en l'apartat 4.1.4.

L'operador de circuit de reassignació de càrregues implementat consisteix en l'execució seqüencial dels següents passos:

- *Pas 1:* El sistema escull la subestació a la que reassignarà part del mercat d'entre les més properes al centre de càrregues del circuit.

En concret, el sistema considera només aquelles subestacions properes al centre de càrregues del circuit fins a una distància corresponent a la que hi ha entre el centre de càrregues del circuit i la subestació des de la qual s'alimenta inicialment ja que, d'altra manera, resultaria tècnicament millor reassignar sobre la mateixa subestació (és a dir, desdoblar el circuit). Així mateix, el sistema prioritza les subestacions que ja estan en servei per després analitzar les subestacions i centres de maniobra "virtuals" que es poden posar en servei en el període de planificació.

- *Pas 2:* el sistema escull el node del circuit actual més proper a la subestació seleccionada, en endavant node de contacte, i genera un nou circuit amb tota la xarxa que es troba aigües avall d'aquest node i la xarxa que es troba aigües amunt mínima fins que el nou circuit assoleix el 50% de la demanda de potència del circuit inicial.
- *Pas 3:* El sistema afegeix un nou tram de circuit entre el parc de la subestació a la que es reassigna el nou circuit i el node de contacte. Aquest tram de circuit té la mateixa tipologia que els trams de circuit que estan connectats al node de contacte. El traçat d'aquest tram s'ha de considerar orientatiu, ja que el sistema no té en compte les restriccions d'estesa de noves traces al territori.

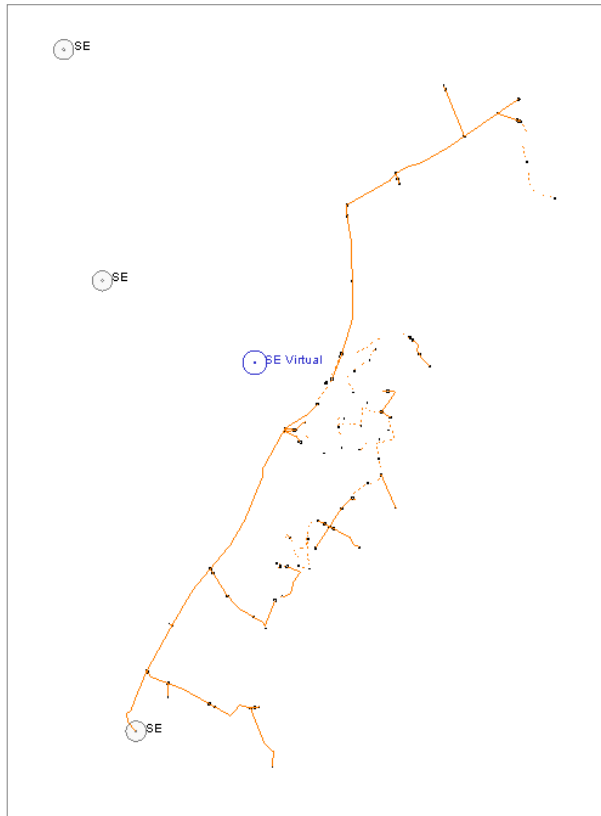
El sistema introdueix un seccionador normalment obert entre el circuit inicial i el nou circuit per tal que els dos circuits es donin reserva d'alimentació mútua.

Les il·lustracions de la pàgina següent mostren el resultat de l'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues al circuit tipus de 25 kV. Cal notar l'existència d'una subestació virtual a la vora del centre de càrregues del circuit. La localització s'ha obtingut en analitzar els resultats de la funció de criticitat del subministrament de la zona i, en concret, en observar l'existència de dos màxims locals de la funció de criticitat (veure la il·lustració 2).

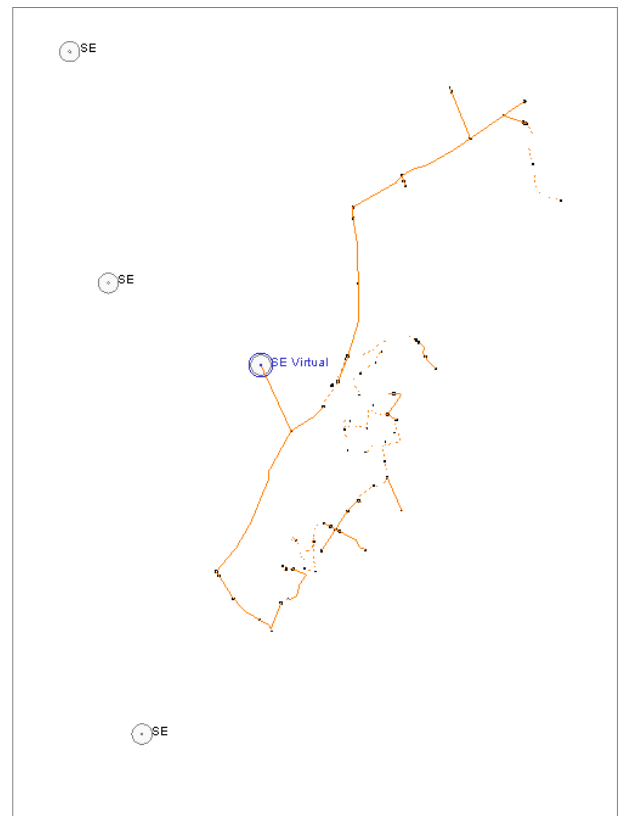
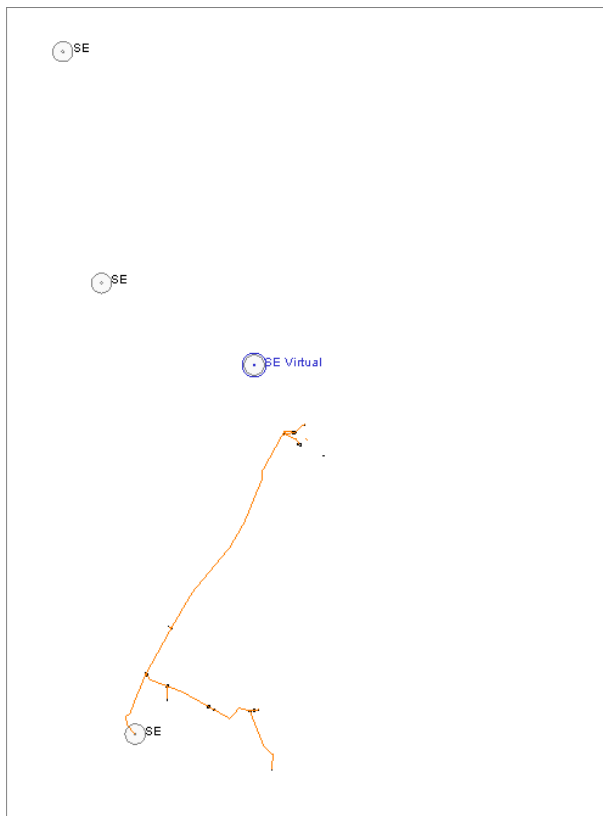
El resultat de l'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues al circuit tipus de 25 kV es resumeix a la taula següent:

<b>Paràmetre</b>	<b>Situació inicial</b>	<b>Situació final</b>	<b>Variació</b>
Injecció capçalera [MW]	13,19	13,06	-0,94%
Injecció capçalera [MVA]	6,65	6,44	-3,16%
Injecció capçalera [MVA]	14,77	14,57	-1,38%
Pèrdues [MW]	2,05	1,12	-45,26%
Tensió mínima [p.u.]	0,962	0,977	0,015
Nivell de càrrega màxim [%]	115,20	71,74	-43,46
Marge creixement [MVA]	4,46	6,14	37,70%
TIEPI [hores interrup. / any]	1,50	1,13	-24,45%
NIEPI [nombre interrup. / any]	2,93	2,21	-24,62%
Inversió [M€]		4,795	

**Taula 3:** Resum de l'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues al circuit tipus de 25 kV.

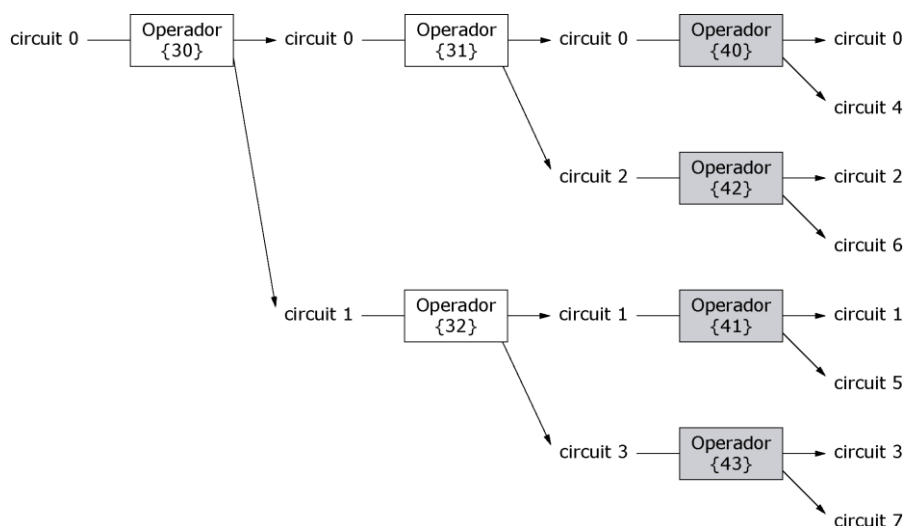


**Il·lustració 9:** Circuit en situació prèvia a l'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues.



**Il·lustració 10:** Circuits resultants a l'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues al circuit tipus.

El sistema pot aplicar l'operador de reassignació de càrregues fins a quatre vegades durant el període de planificació als circuits associats que s'obtenen d'aplicar l'operador de desdoblament de circuit, generant fins a un màxim de quatre nous circuits addicionals. D'aquesta manera, l'operador de reassignació de càrregues s'ha identificat amb les anotacions {40}, {41}, {42} i {43}, tal com es mostra a la il·lustració següent:



**II·lustració 11:** Esquema d'aplicació de l'operador de reassignació de càrregues en funció del circuit associat al circuit analitzat.

#### 4.3.2.4. Operador de circuit d'augment de capacitat

L'operador de circuit d'augment de capacitat implementa l'augment de secció dels trams de circuit que tenen un nivell de càrrega en situació de demanda punta superior a un llindar definit per l'usuari (per defecte el 80%). Aquest augment de secció es realitza mitjançant la substitució del conductor identificat per un altre amb una secció major, tot mantenint el nivell de tensió nominal i la tipologia bàsica (conductor aeri o subterrani) del conductor a substituir.

En la implementació d'aquest operador s'han tingut en compte les tipologies estàndard dels conductors de cada gestor de xarxa de distribució.

En virtut de l'article 10.5.f de la Llei 18/2008, de 23 de desembre, el sistema no considera l'aplicació d'aquest operador si el circuit conté trams que operen amb un nivell de tensió inferior al nivell de tensió estàndard de desenvolupament de cada gestor de xarxa de distribució.

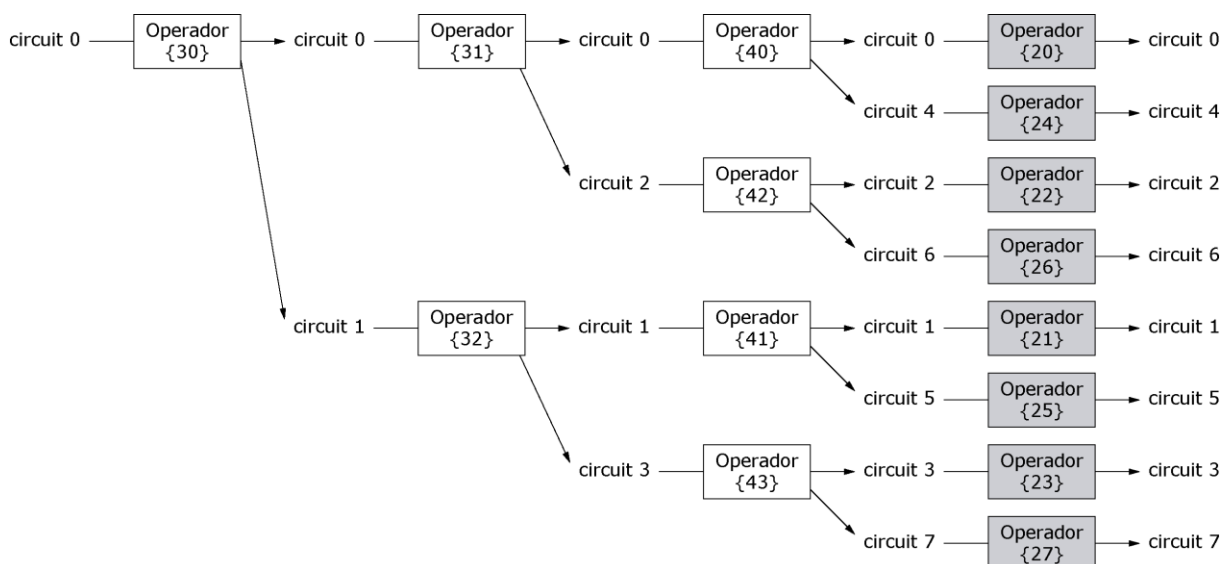
La taula següent mostra el resultat de l'aplicació de l'operador d'augment de capacitat al circuit tipus de 25 kV:

Paràmetre	Situació inicial	Situació final	Variació
Injecció capçalera [MW]	13,19	13,13	-0,42%
Injecció capçalera [MVar]	6,65	6,65	-0,10%
Injecció capçalera [MVA]	14,77	14,72	-0,36%
Pèrdues [MW]	2,05	1,63	-20,27%
Tensió mínima [p.u.]	0,962	0,967	0,005
Nivell de càrrega màxim [%]	115,20	78,61	-36,59
Marge creixement [MVA]	4,46	5,96	33,81%
TIEPI [hores interrup. / any]	1,50	1,50	0
NIEPI [nombre interrup. / any]	2,93	2,93	0
Inversió [M€]		0,09	

**Taula 4:** Resum de l'aplicació de l'operador d'augment de capacitat al circuit tipus de 25 kV.

Com a resultat de l'aplicació de l'operador d'augment de capacitat al circuit tipus de 25 kV, s'ha augmentat la capacitat en una longitud total de 1,278 km de circuits aeris i de 0,28 km de circuits subterranis.

El sistema pot aplicar l'operador d'augment de capacitat fins a set vegades cada any, una per a cada circuit associat al circuit analitzat obtingut per aplicació dels operadors de desdoblament de circuit i de reassignació de càrregues. D'aquesta manera, l'operador d'augment de capacitat s'ha identificat amb les anotacions {20} a {27}, tal com es mostra a la il·lustració següent:



**II-Il·lustració 12:** Esquema d'aplicació de l'operador d'augment de capacitat en funció del circuit associat al circuit analitzat.

#### 4.3.2.5. Operador de circuit de soterrament

L'operador de circuit de soterrament implementa el soterrament de la totalitat dels trams aeris del circuit analitzat, canviant les tipologies aèries d'aquests trams per les tipologies de cables soterrats estàndards de cada gestor de la xarxa de distribució, tot mantenint la topologia del circuit analitzat i escollint una tipologia del conductor soterrat tal que la seva capacitat tèrmica sigui igual o superior a la del conductor aeri substituït.

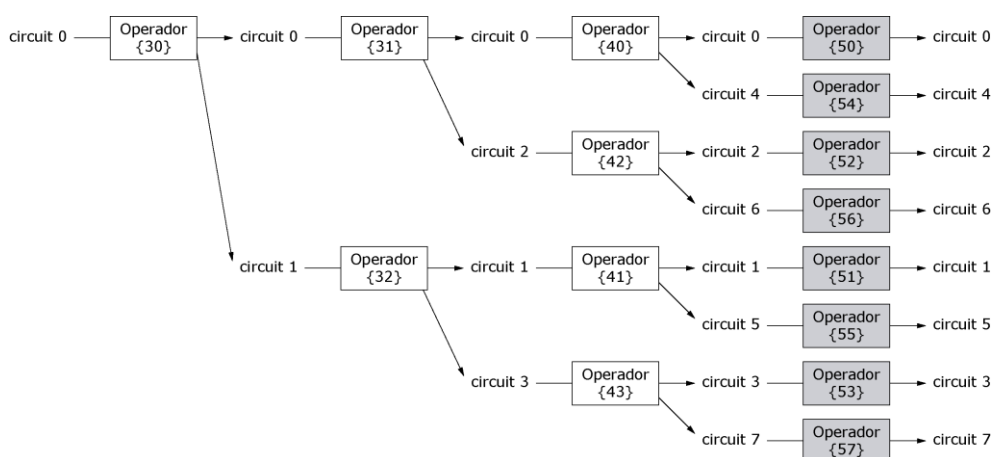
La taula següent mostra el resultat de l'aplicació de l'operador de soterrament al circuit tipus de 25 kV:

Paràmetre	Situació inicial	Situació final	Variació
Injecció capçalera [MW]	13,19	13,07	-0,87%
Injecció capçalera [MVar]	6,65	6,39	-4,05%
Injecció capçalera [MVA]	14,77	14,55	-1,51%
Pèrdues [MW]	2,05	1,19	-41,93%
Tensió mínima [p.u.]	0,962	0,982	0,020
Nivell de càrrega màxim [%]	115,20	97,68	-17,52
Marge creixement [MVA]	4,46	0,34	-92,39%
TIEPI [hores interrup. / any]	1,50	1,30	-13,09%
NIEPI [nombre interrup. / any]	2,93	2,55	-12,98%
Inversió [M€]		1,68	

**Taula 5:** Resum de l'aplicació de l'operador de soterrament al circuit tipus de 25 kV.

Com a resultat de l'aplicació de l'operador de soterrament en el cas concret de l'exemple, s'ha substituït un total de 15,20 km de trams aeris per trams subterranis.

El sistema pot aplicar l'operador de soterrament fins a set vegades, una per a cada circuit associat al circuit analitzat obtingut per aplicació dels operadors de desdoblament de circuit i de reassignació de càrregues. D'aquesta manera, l'operador d'augment de capacitat s'ha identificat amb les anotacions {50} a {57}, tal com es mostra a la il·lustració següent:



**Il·lustració 13:** Esquema d'aplicació de l'operador de soterrament en funció del circuit associat al circuit analitzat.

#### 4.3.2.6. Operador de circuit de millora de continuïtat de subministrament

L'operador de millora de continuïtat de subministrament introdueix nous seccionadors telecomandats normalment tancats amb l'objectiu d'incrementar les possibilitats de reconfiguració del circuit analitzat i, d'aquesta manera, millorar el paràmetre TIEPI associat a la continuïtat de subministrament.

La metodologia implementada consisteix en la instal·lació de nous seccionadors normalment tancats a la capçalera de les derivacions principals i secundàries, sempre que aigües avall d'aquests nous seccionadors existeixi la possibilitat de reserva d'alimentació des d'una altra línia (seccionador normalment obert).

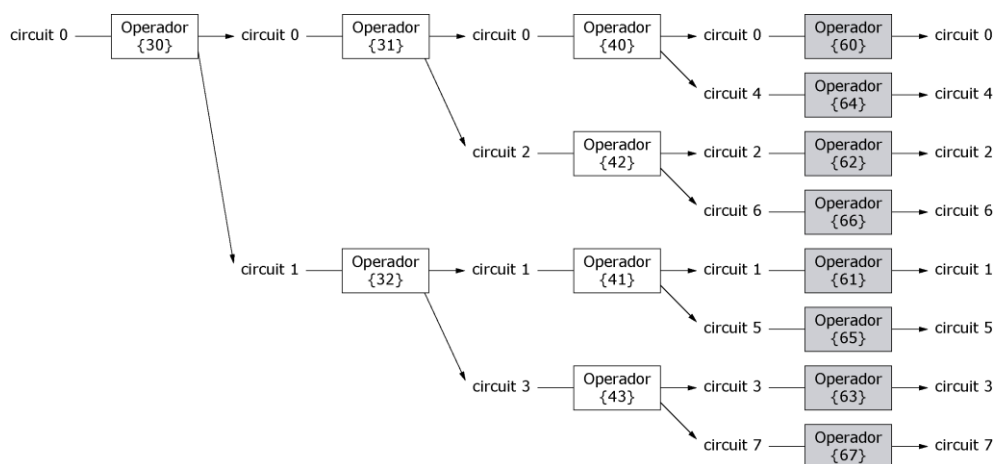


La taula següent mostra el resultat de l'aplicació de l'operador de millora de continuïtat de subministrament al circuit tipus de 25 kV:

Paràmetre	Situació inicial	Situació final	Variació
Injecció capçalera [MW]	13,19	13,19	0
Injecció capçalera [MVar]	6,65	6,65	0
Injecció capçalera [MVA]	14,77	14,77	0
Pèrdues [MW]	2,05	2,05	0
Tensió mínima [p.u.]	0,962	0,962	0
Nivell de càrrega màxim [%]	115,20	115,20	0
Marge creixement [MVA]	4,46	4,46	0
TIEPI [hores interrup. / any]	1,50	1,49	-0,70%
NIEPI [nombre interrup. / any]	2,93	2,93	0
Inversió [M€]		0,129	

**Taula 6:** Resum de l'aplicació de l'operador de millora de continuïtat de subministrament al circuit tipus de 25 kV.

El sistema pot aplicar l'operador de millora de continuïtat de subministrament fins a set vegades, una per a cada circuit associat al circuit analitzat obtingut en aplicació dels operadors de desdoblament de circuit i de reassignació de càrregues. D'aquesta manera, l'operador de millora de continuïtat de subministrament s'ha identificat amb les anotacions {60} a {67}, tal com es mostra a la il·lustració següent:



**Il·lustració 14:** Esquema d'aplicació de l'operador de millora de continuïtat de subministrament en funció del circuit associat al circuit analitzat.

#### 4.3.2.7. Operador de circuit de millora de reserva d'alimentació

L'objectiu de l'operador de millora de reserva d'alimentació és introduir una via alternativa d'alimentació entre línies per millorar el paràmetre TIEPI associat a la continuïtat de subministrament. L'objectiu concret d'aquest operador és afegir un segment al circuit analitzat, que el connecti amb un altre circuit, i equipar-lo amb un seccionador normalment obert en un dels seus extrems.

La metodologia implementada d'aquest operador consisteix en l'execució seqüencial dels següents passos:

- *Pas 1:* El sistema identifica el circuit amb el centre de càrregues més proper al centre de càrregues del circuit analitzat (en endavant circuit secundari). La distància entre la capçalera del circuit secundari i el centre de càrregues del circuit analitzat ha de ser igual o inferior a la que hi ha entre el centre de càrregues del circuit analitzat i la seva capçalera.
- *Pas 2:* El sistema identifica els nodes del tronc del circuit analitzat i del tronc del circuit secundari més propers.
- *Pas 3:* El sistema introdueix un segment al circuit analitzat que connecta els dos nodes identificats al pas 2. El sistema introdueix un seccionador normalment obert en un extrem d'aquest segment.

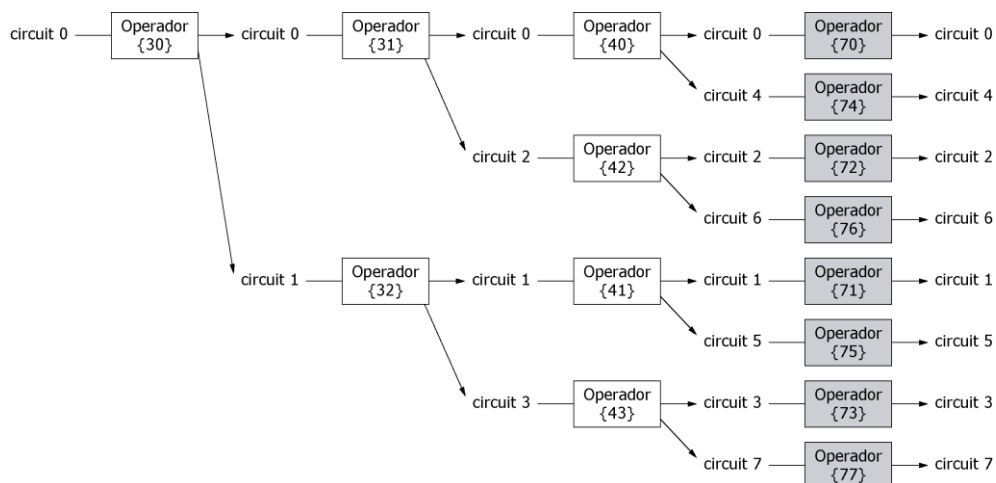
Si el sistema no detecta cap circuit secundari candidat en el pas 1, introdueix un nou circuit entre la subestació de capçalera des d'on s'alimenta el circuit analitzat i el node del tronc més proper al centre de càrregues d'aquest circuit.

La taula següent mostra el resultat de l'aplicació de l'operador de millora de reserva d'alimentació al circuit tipus de 25 kV:

Paràmetre	Situació inicial	Situació final	Variació
Injecció capçalera [MW]	13,19	13,19	0
Injecció capçalera [MVA]	6,65	6,65	0
Injecció capçalera [MVA]	14,77	14,77	0
Pèrdues [MW]	2,05	2,05	0
Tensió mínima [p.u.]	0,962	0,962	0
Nivell de càrrega màxim [%]	115,20	115,20	0
Marge creixement [MVA]	4,46	4,46	0
TIEPI [hores interrup. / any]	1,50	1,49	-0,74%
NIEPI [nombre interrup. / any]	2,93	2,93	0
Inversió [M€]		0,042	

**Taula 7:** Resum de l'aplicació de l'operador de millora de reserva d'alimentació al circuit tipus de 25 kV.

El sistema pot aplicar l'operador de millora de reserva d'alimentació fins a set vegades durant el període de planificació, una per a cada circuit associat al circuit analitzat obtingut per aplicació dels operadors de desdoblament de circuit i de reassignació de càrregues. En conseqüència, l'operador de millora de reserva d'alimentació s'ha identificat amb les anotacions {70} a {77}, tal com es mostra a la il·lustració següent:



**Il·lustració 15:** Esquema d'aplicació de l'operador de millora de reserva d'alimentació en funció del circuit associat al circuit analitzat.

#### 4.3.2.8. Regles de seqüenciació dels operadors de circuit

Com ja s'ha mencionat anteriorment, el graf d'anàlisi per a la determinació de les planificacions òptimes de desenvolupament es va construir a mesura que s'avança en l'anàlisi de les fites temporals.

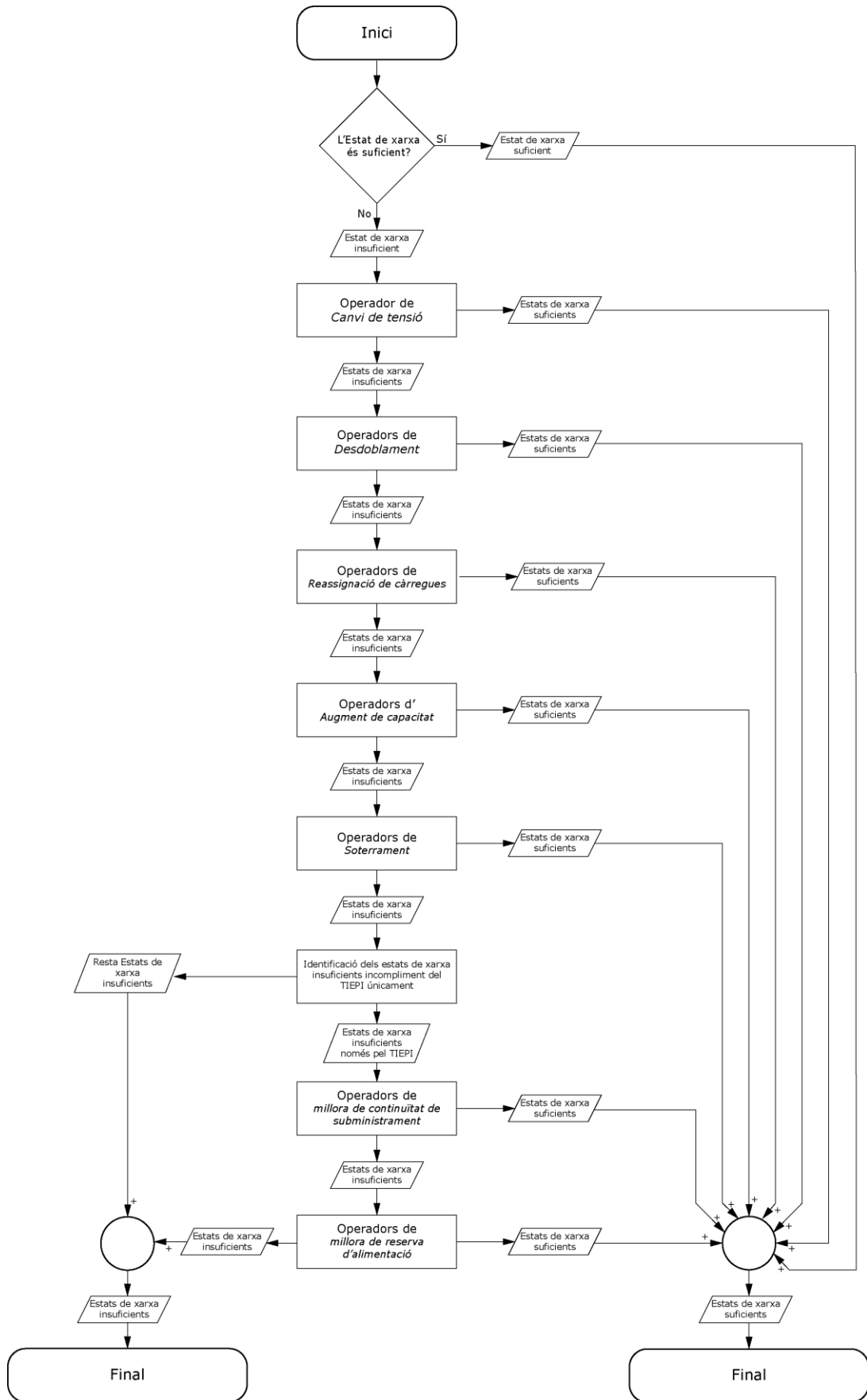
L'ús de seqüències d'operadors de circuit per generar els estats de l'any següent permet modelitzar la complexitat de les planificacions de desenvolupament de xarxa i les planificacions de desenvolupament dels circuits associats al circuit analitzat que són generats pel desdoblament del circuit i/o per la reassignació de càrregues.

S'ha implementat l'exploració seqüencial dels circuits que es mostra en el diagrama de fluxos de la pàgina següent.

Cal destacar que el sistema avalua la suficiència d'un estat abans d'aplicar un operador. Si abans d'aplicar cap operador l'estat ja és suficient respecte els límits de qualitat i continuïtat de subministrament, no s'aplica cap operador de circuit per cercar nous estats vàlids i l'estat inicial es considera vàlid. Aquest fet evita generar nous estats que comportin un avançament d'inversions innecessari.

S'ha implementat un conjunt de regles de seqüenciació dels operadors que tenen per objectiu introduir la racionalitat tècnica i econòmica recollida en els criteris de planificació dels gestors de les xarxes de distribució i la normativa vigent tot mantenint la diversitat necessària dels efectes dels operadors de circuit. Aquestes regles són:

- L'usuari estableix el nombre màxim d'operadors que pot tenir una seqüència. Per defecte, el sistema estableix un màxim de tres operadors.
- Els operadors d'una mateixa família només es poden aplicar respectant la seqüència associada a la seva codificació. És a dir: la seqüència {30, 31} és vàlida, no així la seqüència {31, 30}.



**II-lustració 16:** Diagrama de fluxos de la seqüenciació dels operadors que s'apliquen per a la generació d'estats de xarxa de la fita temporal següent.

- Es prohibeix aplicar un operador prèviament a l'operador de canvi de tensió, durant tot el període de planificació.

Aquesta regla respon a la necessitat de fer tendir el nivell de tensió nominal d'operació cap a l'estàndard aprovat per la Generalitat de Catalunya, tal com s'estableix a la Llei 18/2008, de 23 de desembre.

Aquesta regla s'aplica en totes les fites temporals del període de planificació; és a dir: l'operador de canvi de tensió no es pot aplicar en qualsevol estat de la xarxa de distribució si per arribar a aquest estat ha calgut aplicar algun altre operador prèviament.

- Tal com mostra el diagrama de fluxos, els operadors de millora de continuïtat de subministrament i de millora de reserva d'alimentació només es poden aplicar després de la resta d'operadors en un mateix any.
- L'operador d'augment de capacitat només es pot aplicar després dels altres operadors, amb excepció dels operadors de millora de continuïtat de subministrament i/o de millora de reserva d'alimentació.

Aquesta regla respon al fet que els nivells de càrrega es poden veure sensiblement reduïts com a conseqüència de l'aplicació d'operadors diferents al d'augment de capacitat i, per tant, fer innecessari aquest operador.

#### **4.3.3. Adaptacions a l'algoritme de Bellman**

S'han introduït un conjunt d'adaptacions a la implementació de l'algoritme de Bellman amb l'objectiu de disminuir el cost computacional associat a la cerca de les planificacions òptimes de desenvolupament del circuit seleccionat que deriva de la formulació descrita a l'apartat 4.3.1.

Aquestes adaptacions responen als criteris de planificació recollits en la normativa i a la consideració apriorística dels criteris habituals de planificacions de les xarxes de distribució. En aquest sentit, malgrat que alguna d'aquestes adaptacions porta a què el sistema no garanteixi

l'obtenció d'una planificació globalment òptima, ja que eviten l'avaluació de totes les transicions entre estats possibles, sí queda garantida l'obtenció de planificacions sub-òptimes que tenen el mateix interès per a l'usuari, tal com s'analitzarà a l'apartat següent.

L'impacte d'aquestes adaptacions s'analitzarà en l'exemple de l'apartat 4.5.

#### **4.3.3.1. Avaluació de la suficiència dels estats**

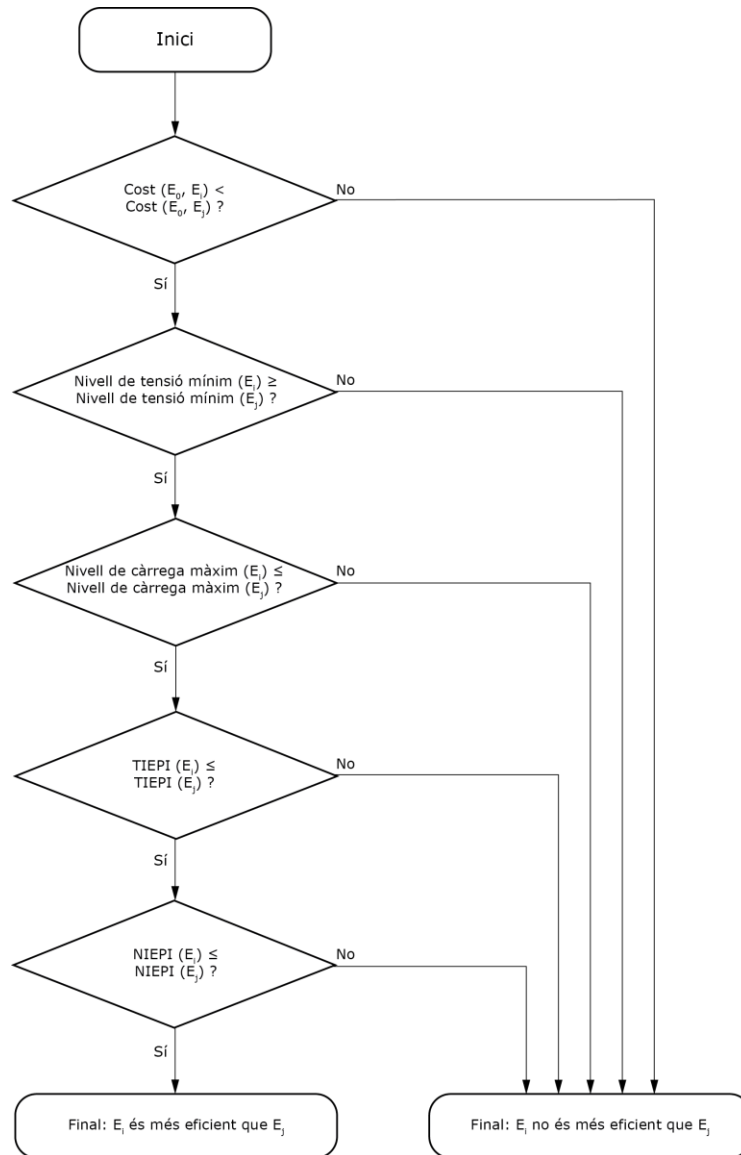
Com ja s'ha indicat a l'apartat 4.3.1, els estats que s'obtenen durant el període de planificació han de complir els límits reglamentaris de qualitat i continuïtat de subministrament i els límits establerts per l'usuari.

En aquest sentit, el sistema implementat avalua la suficiència dels nivells de qualitat i continuïtat de subministrament associats a un estat respecte els límits reglamentaris i els establerts per l'usuari del sistema. En cas que l'estat presenti uns nivells fora de límit, el sistema descartarà l'estat en l'expansió del graf a la fita temporal següent.

#### **4.3.3.2. Determinació de les transicions entre estats més eficients**

En finalitzar l'obtenció de tots els estats associats a una fita temporal qualsevol, el sistema escull aquells que estan associats a les transicions des de l'estat inicial més eficients. El sistema compara tots els estats del mateix any i desestima aquells que tenen, en relació amb qualsevol altre estat del mateix any, un comportament tècnic igual o pitjor i un cost superior de transició des de l'estat inicial.

Concretament, el mòdul de planificació compara els següents paràmetres associats de dos estats qualsevol: nivell de tensió mínim, nivell de càrrega màxim, TIEPI i NIEPI. La il·lustració següent mostra el diagrama de fluxos de la determinació de l'eficiència relativa entre dos estats  $E_i$  i  $E_j$  associats a la mateixa fita temporal:



**Il·lustració 17:** Diagrama de fluxos de la comparació d'eficiència de dos estats  $E_i$  i  $E_j$ .

Com a resultat, les planificacions de transició que assoleixen els estats del darrer any del període de planificació són les planificacions òptimes més eficients que el sistema determina any a any.

Aquesta adaptació introdueix el criteri d'eficiència econòmica aplicat pels gestors de les xarxes de distribució en les seves planificacions.



#### **4.3.3.3. Límit del nombre d'estats que passen d'una fita temporal a la següent**

En finalitzar l'obtenció de tots els estats associats a una fita temporal qualsevol, i una vegada filtrats aquests en funció de la seva eficiència, el sistema escull els  $N\_Estat\_màx$  estats amb el menor cost total de transició associat.

El paràmetre  $N\_Estat\_màx$  és fixat per l'usuari i, per defecte, el sistema el considera igual a 5.

#### **4.4. Mòdul de presentació de les planificacions òptimes de desenvolupament**

El mòdul de presentació de les planificacions òptimes de desenvolupament té per objectiu descriure les planificacions òptimes de desenvolupament trobades en el mòdul de planificació per desenvolupar el circuit MT seleccionat i fer front al creixement previst del seu mercat amb els requisits de qualitat i continuïtat de subministrament que l'usuari ha fixat prèviament.

Tal com s'ha mencionat en la metodologia de determinació de les planificacions òptimes, l'algoritme de Bellman no decideix quin dels estats que s'obtenen al final del període de planificació és el millor; és més: es limita a determinar la transició de cost mínim entre l'estat origen i l'estat final.

Així doncs, el mòdul mostra la relació de les planificacions òptimes de desenvolupament vàlides obtingudes en el mòdul de planificació, i detalla per a cada una d'elles les actuacions associades (operadors de circuit), la inversió total actualitzada i l'evolució prevista dels paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament. El mòdul també mostra una relació de les planificacions no suficients de desenvolupament i el detall de les actuacions associades, així com el seu impacte en els paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament associats.

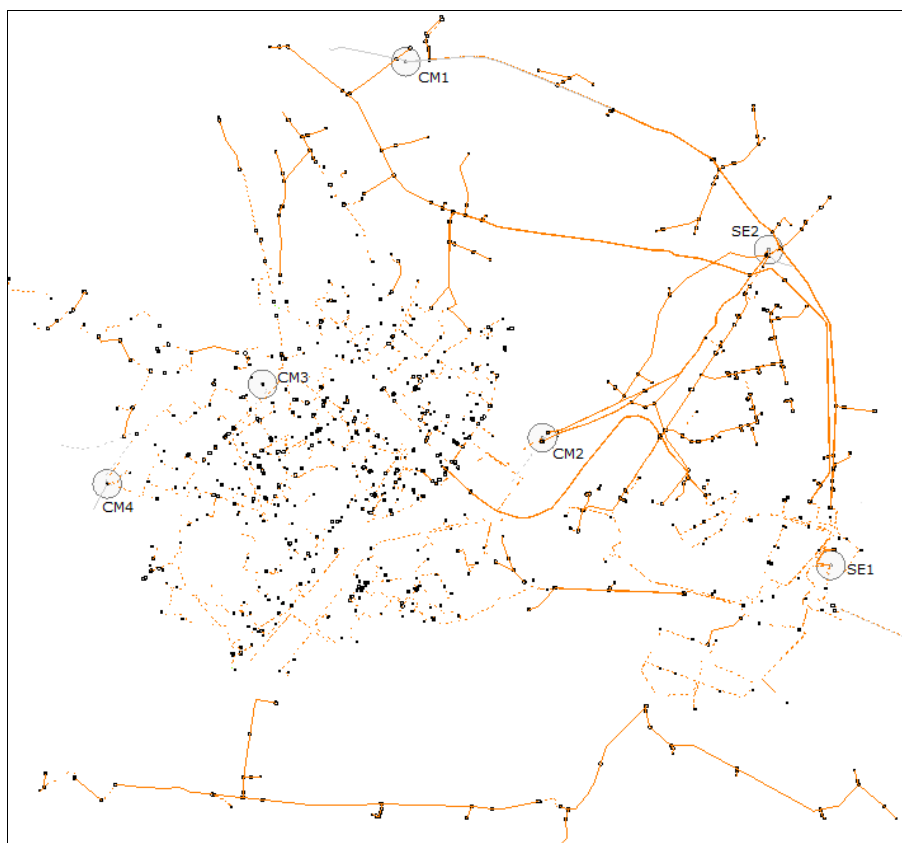
La informació generada pel mòdul de decisió permet a l'usuari:

- Identificar la planificació òptima i eficient de desenvolupament associada a la inversió total actualitzada mínima, la planificació òptima associada a la major millora dels paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament, o qualsevol altra planificació que resulti del compromís entre aquests dos objectius que l'usuari pugui establir.
- Identificar els nivells d'inversió total actualitzada en funció dels nivells de qualitat i continuïtat de subministrament que s'obtenen al final del període de planificació i així contrastar la suficiència de l'impacte de les planificacions de desenvolupament que els gestors de les xarxes de distribució han inclòs en els seus plans d'inversió.
- Avaluar la necessitat de noves subestacions i/o centres de maniobra durant el període de planificació, a partir de l'anàlisi de totes les planificacions de desenvolupament resultants. La necessitat de noves subestacions ha d'alimentar les planificacions de les xarxes de transport i distribució AT.

#### **4.5. Exemple d'aplicació**

Aquest mostra un exemple d'aplicació del sistema d'anàlisi i planificació per palesar l'efecte de les adaptacions a l'algoritme de Bellman introduïdes.

L'àmbit geogràfic d'anàlisi correspon a una zona urbana i, concretament, a una capital de comarca. Veure la il·lustració següent.



**Il·lustració 18:** Exemple d'execució. Xarxa de distribució de mitjana tensió, subestacions de capçalera i centres de maniobra.

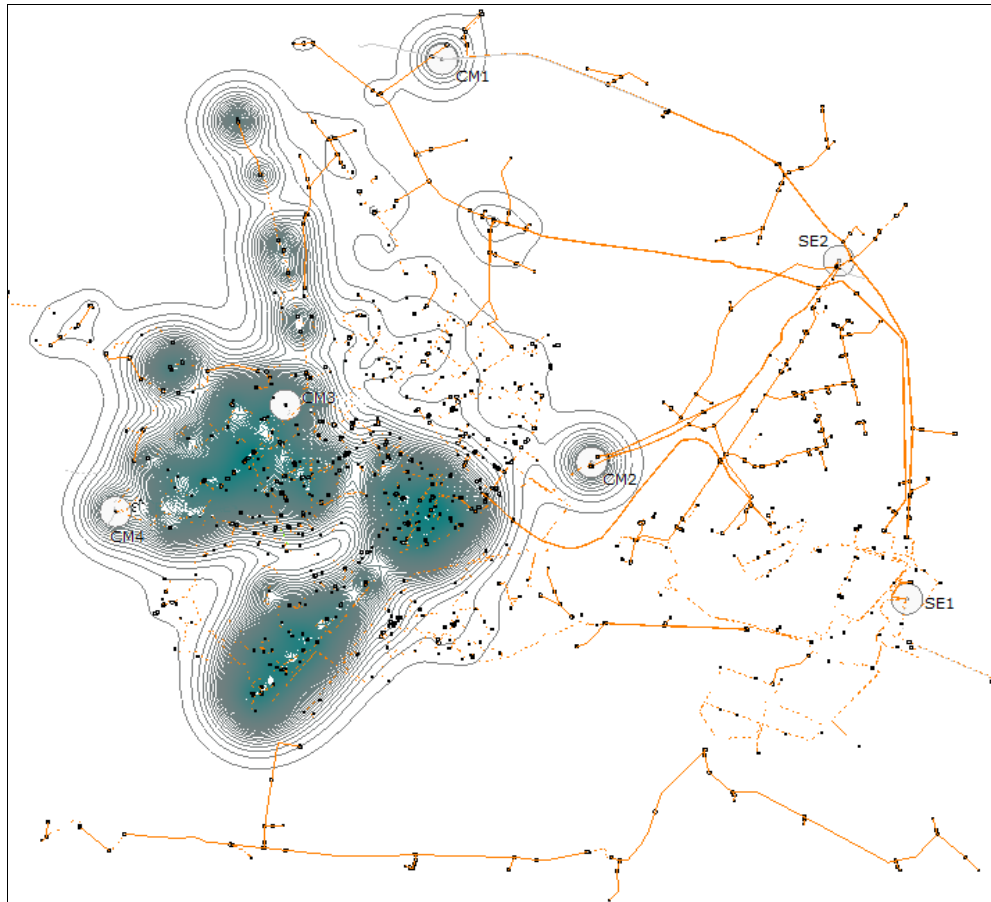
La xarxa de distribució de mitjana tensió opera a una tensió nominal de 25 kV, i s'alimenta des de les dues subestacions SE1 i SE2. La subestació SE1 alimenta els centres de maniobra CM1, CM3 i CM4, mentre que la subestació SE2 alimenta el centre de maniobra CM2. L'alimentació dels centres de maniobra es realitza mitjançant circuits dedicats sense cap altra càrrega.

La taula següent mostra els paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament associats al mercat subsidiari de cada subestació a 31 de desembre de 2011:

Paràmetre	Mercat subsidiari de la SE1	Mercat subsidiari de la SE2
Injecció capçalera [MW]	70,03	3,25
Injecció capçalera [MVar]	34,51	1,58
Injecció capçalera [MVA]	78,07	3,61
Pèrdues	2,02%	0,73%
Tensió mínima [p.u.]	0,941	0,990
Nivell de càrrega màxim [%]	106,6	29,7
TIEPI [hores interrup. / any]	1,480	0,470
NIEPI [nombre interrup. / any]	2,823	0,931

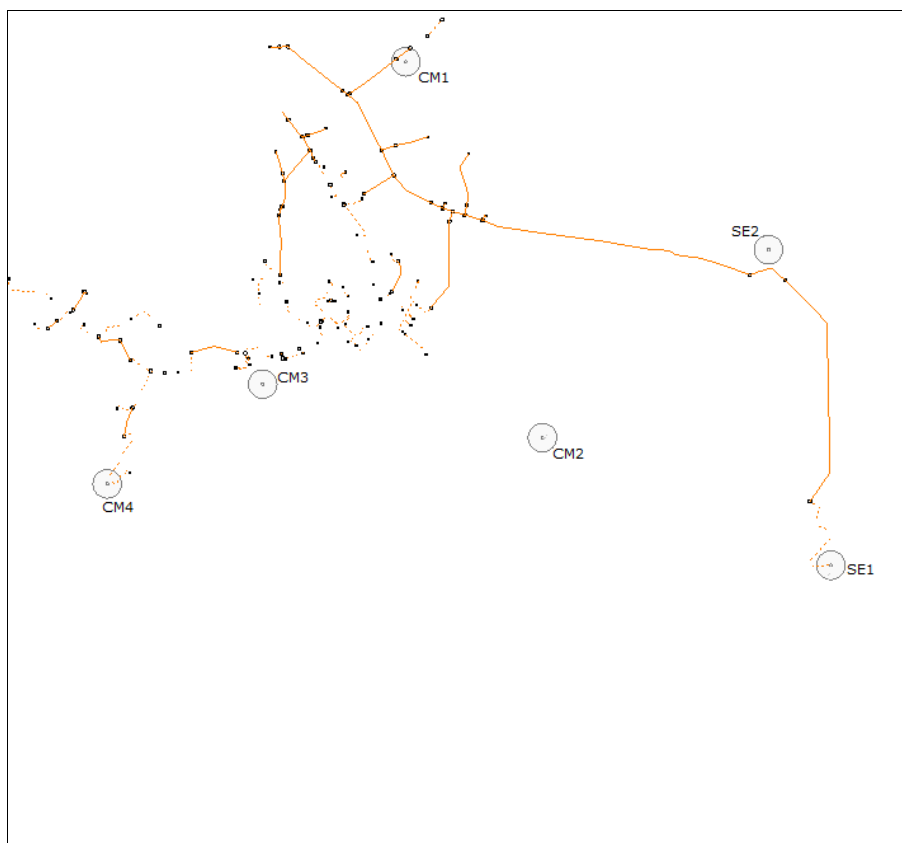
**Taula 8:** Paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament associats als mercats de les subestacions de l'exemple.

La il·lustració següent mostra el resultat de l'avaluació de la funció de criticitat de subministrament. Es detecten diversos màxims propers als centres de maniobra. Per aquests motius no es proposa cap nou centre de maniobra ni subestació.



**Il·lustració 19:** Exemple d'execució. Avaluació de la funció de criticitat en la zona d'anàlisi, en la situació inicial.

La subestació SE1 alimenta 20 circuits de mitjana tensió. La il·lustració següent mostra el traçat del circuit amb un nivell de càrrega superior i un nivell de tensió mínim inferior del mercat associat a la SE1. Aquest circuit és seleccionat per al seu desenvolupament.



**Il·lustració 20:** Exemple d'aplicació. Circuit seleccionat per al seu desenvolupament.

Per tal de forçar la necessitat d'actuacions de desenvolupament del circuit seleccionat, s'ha establert un taxa d'increment del 10% anual de la demanda de potència màxima horària. L'evolució tendencial prevista dels paràmetres elèctrics associats al circuit es mostra a la taula següent:

Any	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues [%]	Marge de creixement [MVA]
Any 0	0,941	106,6%	1,520	3,027	4,2%	-1,021
Any 1	0,935	117,9%	1,520	3,027	4,7%	-2,785
Any 2	0,928	130,6%	1,520	3,027	5,2%	-4,752
Any 3	0,920	144,7%	1,520	3,027	5,8%	-6,947
Any 4	0,912	160,5%	1,520	3,027	6,4%	-9,404

**Taula 9:** Exemple d'aplicació. Evolució tendencial prevista dels paràmetres elèctrics del circuit analitzat.

L'anàlisi de l'evolució tendencial permet destacar tres fets:

- El nivell de tensió mínim és inferior a 0,930 p.u. a partir de l'any 1.
- El nivell de càrrega màxim és superior al 100% durant tot el període de planificació.

- El nivell de TIEPI és superior a 1,5 hores/any i el nivell de NIEPI és superior a 3,0 interrupcions/any, límits corresponent a una zona urbana segons el Reial Decret 1955/2000, de 1 de desembre.

S'han formulat vuit casos d'anàlisi de l'exemple, associats cada un d'ells a unes condicions d'aplicació específiques. L'anàlisi d'aquests casos té per objectiu evidenciar l'efecte de les adaptacions de l'algoritme de Bellman proposades.

Les condicions d'aplicació comunes per a tots els casos són:

- Es limiten els paràmetres de qualitat de subministrament d'acord amb el que estableix la normativa vigent i les normes tècniques particulars dels gestors de la xarxa de distribució; és a dir: el nivell de tensió mínim ha de ser sempre superior a 0,930 p.u. i el nivell de càrrega màxim ha de ser sempre inferior al 100%.
- Es limita el nombre d'operadors per seqüència a un màxim de 3.
- Els estats que passen d'un any al següent estan associats a transicions des de l'estat inicial de menor cost.

Les condicions d'aplicació particulars es resumeixen a la taula següent i es detallen a continuació:

Cas	Límit TIEPI i NIEPI	Planificacions eficients	Nombre màxim d'estats
1	Sí	Sí	5
2	Sí	Sí	10
3	Sí	No	5
4	Sí	No	10
5	No	Sí	5
6	No	Si	10
7	No	No	5
8	No	No	10

**Taula 10:** Exemple d'aplicació. Condicions particulars per a cada cas de l'anàlisi.

- *Límit TIEPI i NIEPI:* Durant tot el període de planificació el TIEPI queda limitat a un màxim de 1,5 hores d'interrupció / any i el NIEPI a 3,0 interrupcions / any.

- *Planificacions eficients*: Una vegada obtingudes les planificacions òptimes de desenvolupament entre l'estat origen i els estats associats a un any qualsevol, el sistema determina el conjunt de planificacions òptimes i eficients i es descarten els estats associats a les planificacions òptimes que no són eficients.
- *Nombre màxim d'estats*: És el nombre màxim d'estats que, una vegada determinades les planificacions òptimes i eficients, passa a ser analitzats per generar les transicions a un estat de l'any següent.

La relació de les planificacions òptimes i eficients de desenvolupament resultants i el temps de càlcul de cada cas es mostra a la taula següent:

Cas	Temps [s]	Planificació òptima de reforçament										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	48	x				x						
2	48	x				x						
3	48	x				x						
4	48	x				x						
5	115	x	x			x	x				x	
6	116	x	x			x	x				x	x
7	139	x	x	x	x	x						
8	190	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

**Taula 11:** Exemple d'aplicació. Relació de planificacions òptimes de desenvolupament resultants i temps de càlcul associat a cada cas.

La taula següent mostra la relació d'actuacions associada a cada planificació òptima de desenvolupament resultant, així com la inversió total actualitzada a l'any 0. L'annex conté la previsió d'evolució dels paràmetres elèctrics associada a cada planificació òptima.

Estratègia	Inversió total actualitzada [M€]	Actuació				
		Any 0	Any 1	Any 2	Any 3	Any 4
1	0,259	{40} Reassignació càrregues	Cap actuació	{24} Augment capacitat circuit associat	{24} Augment capacitat circuit associat	{24} Augment capacitat circuit associat
2	0,347	{20} Augment capacitat	{40} Reassignació càrregues	{24} Augment capacitat circuit associat	{24} Augment capacitat circuit associat	{24} Augment capacitat circuit associat
3	0,526	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{40} Reassignació càrregues	{24} Augment capacitat circuit associat	{24} Augment capacitat circuit associat
4	0,605	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat
5	0,741	{30} Desdoblament	Cap actuació	Cap actuació	Cap actuació	Cap actuació
6	0,798	{20} Augment capacitat	{30} Desdoblament	Cap actuació	Cap actuació	Cap actuació
7	0,826	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{40} Reassignació càrregues	{24} Augment capacitat circuit associat
8	0,948	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{30} Desdoblament	Cap actuació	Cap actuació
9	1,241	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{20} Augment capacitat	{30} Desdoblament	Cap actuació
10	1,522	{20} Augment capacitat	{50} Soterrament	Cap actuació	{40} Reassignació càrregues	{24} Augment capacitat circuit associat
11	1,956	{20} Augment capacitat	{50} Soterrament	Cap actuació	{30} Desdoblament	Cap actuació

**Taula 12:** Exemple d'aplicació. Relació d'actuacions associada a cada planificació òptima de desenvolupament. Inversió total actualitzada a l'any 0 de cada planificació.

La taula següent mostra els paràmetres del sistema al final del període de planificació.

Planificació	Inversió total actualitzada [M€]	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]
1	0,259	0,9715	99,47%	1,1804	2,3470
2	0,347	0,9715	99,47%	1,1804	2,3470
3	0,526	0,9715	99,47%	1,1804	2,3470
4	0,605	0,9320	99,91%	1,5191	2,3470
5	0,741	0,9508	92,30%	1,1161	2,2235
6	0,798	0,9514	92,30%	1,1160	2,2234
7	0,826	0,9715	99,47%	1,1804	2,3470
8	0,948	0,9536	92,30%	1,1152	2,2218
9	1,241	0,9598	92,28%	1,1152	2,2218
10	1,522	0,9810	99,09%	1,0938	2,1749
11	1,956	0,9691	91,90%	0,9988	1,9896

**Taula 13:** Exemple d'aplicació. Paràmetres del sistema al final del període de planificació.



L'anàlisi dels resultats permet formular les següents conclusions:

- La limitació dels paràmetres de continuïtat de subministrament als valors establerts en la normativa vigent comporta que només siguin vàlides dues planificacions de desenvolupament òptimes d'entre les que es detecten si no es limiten aquests paràmetres de continuïtat (planificacions 1 i 5).
- Les adaptacions a l'algoritme de Bellman implementades no tenen cap efecte sobre el temps de càlcul per obtenir les planificacions de desenvolupament 1 i 5. Aquest fet s'atribueix a tres factors:
  - Les planificacions són eficients entre sí durant tot el període de planificació, ja que la planificació 1 té associats uns nivells de tensió mínims superiors als de la planificació 5 i, per contra, la planificació 5 té associats uns nivells de càrrega màxima superiors als de la planificació 1.
  - Les resta de planificacions que es generen durant la cerca, associades a l'increment de capacitat inicial del circuit, comporten l'incompliment dels paràmetres de continuïtat.

Per tant, durant l'execució no es generen noves planificacions per a les que s'hagi d'avaluar la seva eficiència relativa ni tampoc que superin el nombre màxim de planificacions a partir del qual s'hagin de descartar.

- Una vegada reassignat part del mercat del circuit (operador {40}) o desdoblant el circuit (operador {30}), no és necessària cap actuació al circuit analitzat per donar compliment amb els requeriments imposats.
- La no limitació dels paràmetres de continuïtat de subministrament comporta que siguin vàlides les planificacions anteriorment descrites i, a més, d'altres addicionals, totes elles amb la característica comuna que preveuen l'increment de capacitat d'algun tram del circuit analitzat durant els primers anys.

- El sistema determina que, a l'any 1, les planificacions òptimes 3, 4, 7, 8 i 9 siguin menys eficients que la planificació òptima 1. Per aquest motiu els casos 5 i 6 no contenen aquestes les planificacions 3, 4, 7, 8 i 9. Les taules següents mostren les evolucions fins l'any 1 de les planificacions mencionades:

- Planificació òptima 1 fins a l'any 1. Inversió total actualitzada = 0,095 M€.

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{40}	0,978	86,5%	1,181	2,348	1,0%	4,544
Any 1	{0}	0,976	95,3%	1,181	2,348	1,1%	3,258

**Taula 14:** Exemple d'aplicació. Evolució fins l'any 1 dels paràmetres del sistema associats a la planificació òptima 1.

- Planificacions òptima 3, 4, 7, 8 i 9 fins a l'any 1. Inversió total actualitzada = 0,276 M€.

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{20}	0,940	97,9%	1,519	3,025	4,1%	0,401

**Taula 15:** Exemple d'aplicació. Evolució fins l'any 1 dels paràmetres del sistema associats a les planificacions òptimes 3, 4, 7, 8 i 9.

- Les adaptacions a l'algoritme de Bellman implementades influeixen significativament en el temps de càlcul per obtenir aquestes planificacions de desenvolupament:
  - En considerar l'eficiència relativa de les planificacions de desenvolupament, el temps de càlcul s'ha reduït en un 39% (cas 6 respecte el cas 8).
  - En considerar la reducció del límit d'estats que passen d'un any a l'altre, el temps de càlcul s'ha reduït en un 27% (cas 7 respecte el cas 8).

- En considerar l'eficiència relativa de les planificacions de desenvolupament i la reducció del límit d'estats que passen d'un any a l'altre, el temps de càlcul s'ha reduït en un 40% (cas 5 respecte el cas 8).

És a dir, l'efecte de les dues adaptacions està pràcticament superposat en l'exemple analitzat.

## 5. Conclusions

La planificació òptima dels treballs anuals de desenvolupament d'una xarxa de distribució d'energia elèctrica de mitjana tensió, per atendre l'evolució de la demanda amb uns nivells màxims de qualitat i continuïtat del subministrament i amb una inversió mínima, ha estat objecte de l'interès de la comunitat acadèmica durant els darrers quaranta anys. Les metodologies més avançades disponibles a dia d'avui, les metodologies heurístiques i les metodologies meta-heurístiques clàssiques i modernes, presenten inconvenients que poden dificultar la seva aplicació en el cas real que es pretén tractar: la planificació del desenvolupament de la xarxa de distribució d'energia elèctrica de mitjana tensió de Catalunya.

Aquesta tesi recull el disseny del sistema d'anàlisi i planificació de xarxes de distribució reals, que incorpora una nova metodologia heurística per a l'obtenció de planificacions òptimes i eficients de desenvolupament d'un circuit de mitjana tensió real, amb l'objectiu final d'avaluar la suficiència de les actuacions incloses en els plans d'inversió que els gestors de les xarxes de distribució sotmeten per a la seva preceptiva aprovació. Entre d'altres, el sistema permet avaluar l'impacte dels endarreriments de les actuacions de desenvolupament de xarxa, així com la necessitat de l'entrada de noves subestacions en un determinat moment.

Aquesta nova metodologia heurística és multi-objectiva i dinàmica multi-etapa: determina les planificacions eficients d'actuacions anuals de desenvolupament d'un circuit real de mitjana tensió, globalment òptimes per a un període de 5 anys. Aquestes actuacions permeten atendre l'evolució prevista de la demanda amb uns nivells màxims de qualitat i continuïtat del subministrament i amb una inversió mínima.

La nova metodologia heurística desenvolupada es basa en la formulació clàssica de l'algoritme de Bellman i incorpora adaptacions per a la millora de la seva eficiència que no s'han trobat en la literatura especialitzada:

- a) La tipificació de les actuacions de desenvolupament segons els criteris de planificació establerts en la normativa vigent i en la pràctica habitual dels gestors de les xarxes de distribució.

Aquesta tipificació de les actuacions està implementada a la metodologia heurística en forma d'operadors de circuit tals com el canvi de tensió, el desdoblament, la reassignació de càrregues a una nova subestació o centre de maniobra l'augment de capacitat. En relació a la reassignació de càrregues, el sistema determina la necessitat de l'entrada en servei de noves subestacions, i escull la localització apropiada d'aquesta subestació a partir de les proposades per l'usuari, amb l'ajut de la funció de criticitat implementada en el sistema d'anàlisi.

b) L'avaluació de l'eficiència relativa de les planificacions òptimes durant el procés de cerca.

D'entre les planificacions òptimes que s'obtenen durant un any qualsevol, el sistema determina aquelles que assoleixen uns millors nivells de qualitat i continuïtat del subministrament amb una inversió menor.

Aquestes adaptacions de l'algoritme de Bellman suposen una reducció molt significativa del temps. En l'exemple d'aplicació inclòs en aquest document i aplicant les adaptacions a l'algoritme de Bellman implementades, el sistema obté les planificacions òptimes de cost mínim amb un 40% menys del temps respecte a no considerar aquestes adaptacions.

## 6. Futurs desenvolupaments

El disseny modular del sistema d'anàlisi i planificació de les xarxes de distribució d'energia elèctrica de mitjana tensió implementat permetrà el tractament futur, mitjançant nous mòduls, de les següents problemàtiques:

- Impacte i avaluació de possibilitats de desenvolupament del parc de generació que evacua a la xarxa de distribució (generació distribuïda). Es tracta de determinar quines de les planificacions òptimes i eficients obtingudes generen més capacitat d'evacuació de generació als circuits de mitjana tensió.
- Impacte de les incerteses inherents a la previsió de la demanda i a la disponibilitat de noves subestacions. Es tracta de determinar quines de les planificacions òptimes i eficients obtingudes són més robustes respecte increments no previstos de la demanda del mercat, o bé són més robustes respecte els endarreriments en l'entrada en servei de noves subestacions.
- Tractament de l'extensió de xarxa, una vegada s'aprovin els procediments d'operació de la xarxa de distribució, entre d'altres: el *Procedimiento de Operación de Distribución 1.1 - Caracterización de la Demanda*, el *Procedimiento de Operación de Distribución 1.2 - Previsión de la demanda* i el *Procedimiento de Operación de Distribución 2 - Determinación del punto de conexión de suministros* que concreten la previsió de creixement de la demanda i l'extensió de la xarxa associada a càrrec del sistema retributiu.



## 7. Referències bibliogràfiques

- Adams, R.N. and M.A. Laughton, (1974). "*Optimal planning of power networks using mixed-integer programming*". Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 121(2), pp. 139-147.
- Aoki, K., K. Nara, T. Satoh, M. Kitagawa and K. Yamanaka, (1990). "*New approximate optimization method for distribution system planning*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5(1), pp. 126-132.
- Ben-Dov, E., R.G. Harley and W.J. Seymore, (1987). "*Design of an optimal reticulation system for a residential area*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2(1), pp. 210-217.
- Bernal, J.L. (1999). "*Aplicación de algoritmos genéticos al diseño óptimo de sistemas de distribución de energía eléctrica*". Tesi doctoral per la Universidad de Zaragoza.
- Carvalho, P.M.S., L.A.F. Ferreira, F.G. Lobo and L.M.F. Barruncho, (1997). "*Distribution network expansion planning under uncertainty: a hedging algorithm in an evolutionary approach*". Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Power Industry Computer Applications (PICA 97), Columbus (Ohio), pp. 10-15.
- Coello, C.A., G.B. Lamont and D.A. Van Velhuizen, (2007). "*Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*". Springer Science+Business Media, LLC (2007).
- Cormen, T.H., C.E. Leiserson, R.L. Rivest and C. Stein, (2009). "Introduction to algorithms". Third edition. Massachusetts Institute of Technology (The MIT Press) (2009).
- Cossi, A.M., L.G.W. da Silva, R.A.R. Lázaro and J.R.S. Mantovani, (2012). "*Primary power distribution systems planning taking into account reliability, operation and expansion costs*". IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 6(3), pp. 274-284.



- Crawford, D.L. and S.B. Holt, (1974). "A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations, and deriving their optimal service areas". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 94(2), pp. 230-235.
- Díaz-Dorado, E., J. Cidrás and E. Míguez, (2002). "Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of medium voltage". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17(3), pp. 879-883.
- Díaz-Dorado, E., J. Cidrás and E. Míguez, (2003). "Planning of Large Rural Low voltage networks using evolution strategies". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18(4), pp. 1594-1600.
- Domínguez, J.A., (2000). "Modelos para la planificación de redes de distribución de energía eléctrica asistida por computador aplicando técnicas matemáticas "Fuzzy"". Tesis doctoral per la Universidad de Zaragoza (2000).
- Dorigo, M., V. Maniezzo and A. Coloni, (1996). "The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents". IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics – Part B: cybernetics, Vol. 26(1), pp. 29-41.
- El-Kady, M.A., (1984). "Computer-aided planning of distribution substation and primary feeders". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103 (6), pp. 1183-1189.
- Gómez, J.F., H.M. Khodr, P.M. de Oliveira, L. Ocque, J.M. Yusta, R. Villasana and A.J. Urdaneta, (2004). "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19(2), pp. 996-1004.
- Gönen, T. and B.L. Foote, (1981). "Distribution-system planning using mixed-integer programming". IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 128(2), pp. 70-79.
- Gönen, T. and I.J. Ramírez-Rosado, (1986). "Review of distribution system planning models: A model for optimal multistage planning". IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 133(7), pp. 397-408.

- Gönen, T. and I.J. Ramírez-Rosado, (1987). "*Optimal multi-stage planning of power distribution systems*". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2(2), pp. 512-519.
- Hidroeléctrica del Cantábrico, (1997). "*Modelo de retribución a la distribución: Sistema Bulnes*". Hidroeléctrica del Cantábrico, Secretaría General Técnica (1997).
- Hillier, F.S., and G.J. Lieberman, (2010). "Introducción a la investigación de operaciones". Novena edición. Ed. Mc Graw Hill (2010).
- Hindi, K.S. and A. Brameller, (1977). "*Design of low-voltage distribution networks: A mathematical programming method*". Proceedings of the IEE, Vol. 124(1), pp. 54-58.
- Ippolito, M.G., E.R. Sanseverino and F. Vuinovich, (2004). "*Multiobjective ant colony search algorithm for optimal electrical distribution system strategical planning*". Congress on Evolutionary Computation 2004, Vol. 2, pp. 1924-1931.
- Kaplan, M. and A. Braunstein, (1981). "*Contribution to the determination of the optimum site for substation*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100(5), pp. 2263-2270.
- Knight, U.G., (1960). "*The logical design of electrical networks using linear programming methods*". Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering, Vol. 33A, pp. 306-319.
- Lo, K.L. and I. Nashid, (1996). "*Interactive expert system for optimal design of electricity distribution systems*". IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143(2), pp. 151-156.
- Masud, E., (1974). "*An interactive procedure for sizing and timing distribution substations using optimization techniques*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 93(5), pp. 1281-1286.
- Míguez, E., J. Cidrás, E. Díaz-Dorado and J.L. García-Dornelas, (2002). "*An improved branch-exchange algorithm for large scale distribution network planning*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17(4), pp. 931-936.

- Mikic, O.M., (1986). "*Mathematical dynamic model for long-term distribution system planning*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1(1), pp. 34-40.
- Miranda, V., J.V. Ranito and L.M. Proença, (1994). "*Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9(4), pp. 1927-1933.
- Nara, K., T. Satoh, H. Kuwabara, K. Aoki and M. Kitagawa, (1991). "*Multi-year expansion planning for distribution systems*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6(3), pp. 952-958.
- Nara, K., T. Satoh, H. Kuwabara, K. Aoki, M. Kitagawa and T. Ishihara, (1992). "*Distribution systems expansion planning by multi-stage Branch Exchange*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7(1), pp. 208-214.
- Paiva, P.C., H.M. Khodr, J.A. Domínguez, J.M. Yusta and A.J. Urdaneta, (2005). "*Integral planning of primary – secondary distribution systems using mixed integer linear programming*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20(2), pp. 1134-1143.
- Partanen, J., (1990). "*A modified dynamic programming algorithm for sizing, locating and timing of feeder reinforcements*". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5(1), pp. 277-283.
- Peco, J.L. (2001). "Modelo de cobertura geográfica de una red de distribución de energía eléctrica". Tesis doctoral per la Universidad Pontificia de Comillas de Madrid.
- Peponis G.J. and M.P. Papadopoulos, (1997). "New dynamic, Branch Exchange method for optimal distribution system planning". IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144(3), pp. 333-339.
- Ponnavaikko, M. and K.S. Rao, (1981). "*Optimal distribution system planning*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100(6), pp. 2969-2977.

- Ponnavaikko, M., K.S. Rao and S.S. Venkata, (1987). "*Distribution system planning through a quadratic mixed integer programming approach*". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2(4), pp. 1157-1163.
- Ramírez-Rosado, I.J., R.N. Adams and T. Gönen, (1994). "*Computer aided design of power distribution systems: Multiobjective mathematical simulations*". International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 14(1), pp. 9-12.
- Ramírez-Rosado, I.J. and J.L. Bernal-Agustín, (1998). "*Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13(2), pp. 696-703.
- Ramírez-Rosado, I.J. and J.L. Bernal-Agustín, (2001). "*Reliability and costs optimization for distribution networks expansion using an evolutionary algorithm*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16(1), pp. 111-118.
- Ramírez-Rosado, I.J. and J.A. Domínguez, (1996). "*Distribution planning of electric energy using fuzzy models*". International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 16(2), pp. 49-55.
- Ramírez-Rosado, I.J., J.A. Domínguez and J.M. Yusta, (1999). "*A new model for optimal electricity distribution planning based on fuzzy set techniques*", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1999. Vol. 2, pp. 1048-1054.
- Ramírez-Rosado, I.J. and J.A. Domínguez, (2004). "*Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19(4), pp. 1801-1810.
- Ramírez-Rosado, I.J. and T. Gönen, (1991). "*Pseudodynamic planning for expansion of power distribution systems*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6(1), pp. 245-254.
- Rivier, J., (1999). "Calidad del servicio, regulación y optimización de inversiones". Tesis doctoral per la Universidad Pontificia de Comillas de Madrid.

- Sun, D.I., D.R. Farris, P.J. Cote, R.R. Shoults and M.S. Chen, (1982). "*Optimal distribution substation and primary feeder planning via the fixed charge network formulation*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 101(3), pp. 602-609.
- Tang, Y., (1995). "*Power distribution system planning with reliability modeling and optimization*". IEEE/PES 1995 Winter Meeting, New York, January 29-February 2, 1995, pp. 1-7.
- Thompson, G.L. and D.L. Wall, (1981). "*A Branch and Bound model for choosing optimal substation locations*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100(5), pp. 2683-2688.
- Wall, D.L., G.L. Thompson and J.E.D. Northcote-Green, (1979). "*An optimization model for planning radial distribution networks*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98(3), pp. 1061-1068.
- Willis, H. L., H.N. Tram and R.W. Powell, (1987). "*Substation site and capacity selection based on diversity maximization*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2(3), pp. 210-217.
- Youssef, H. K., R. Hackam and M.A. Abu-El-Magd, (1985). "*Novel optimization model for long range distribution planning*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 104(11), pp. 3195-3202.
- Youssef, H.K. and R. Hackam, (1988). "*Dynamic solution of distribution planning in intermediate time range*". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2(4), pp. 341-348.

## Annex. Evolució dels paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament associats a les planificacions de desenvolupament de l'exemple del capítol 4

En aquest annex es detalla l'evolució dels paràmetres de qualitat i continuïtat de subministrament associada a les planificacions òptimes de desenvolupament de l'exemple del capítol 4.

Els operadors de circuit que es mostren estan associats a les següents actuacions:

{0}: Cap actuació.

{20}: Augment de capacitat del circuit.

{24}: Augment de capacitat del circuit resultant de la reassignació.

{30}: Desdoblament del circuit.

{40}: Reassignació de càrregues.

{50}: Soterrament del circuit.

Les planificacions òptimes de desenvolupament de l'exemple del capítol 4 són:

- Planificació 1. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 0,259 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{40}	0,978	86,5%	1,181	2,348	1,0%	4,544
Any 1	{0}	0,976	95,3%	1,181	2,348	1,1%	3,258
Any 2	{24}	0,974	97,5%	1,181	2,348	1,2%	2,681
Any 3	{24}	0,972	99,7%	1,181	2,348	1,3%	2,089
Any 4	{24}	0,972	99,5%	1,180	2,347	1,2%	1,527

- Planificació 2. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 0,347 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{40}	0,976	95,3%	1,181	2,348	1,1%	3,349
Any 2	{24}	0,974	97,5%	1,181	2,348	1,2%	2,773
Any 3	{24}	0,972	99,7%	1,181	2,348	1,3%	2,180
Any 4	{24}	0,972	99,5%	1,180	2,347	1,2%	1,618

- Planificació 3. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 0,526 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{20}	0,940	97,9%	1,519	3,025	4,1%	0,401
Any 2	{40}	0,974	97,5%	1,181	2,348	1,2%	2,873
Any 3	{24}	0,972	99,7%	1,181	2,348	1,2%	2,280
Any 4	{24}	0,972	99,5%	1,180	2,347	1,2%	1,718

- Planificació 4. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 0,605 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{20}	0,940	97,9%	1,519	3,025	4,1%	0,401
Any 2	{20}	0,945	95,6%	1,519	3,025	3,3%	2,621
Any 3	{20}	0,939	90,7%	1,519	3,025	3,7%	2,101
Any 4	{0}	0,932	99,9%	1,519	3,025	4,1%	0,424

- Planificació 5. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 0,741 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{30}	0,967	62,8%	1,116	2,224	1,9%	14,220
Any 1	{0}	0,964	69,1%	1,116	2,224	2,1%	13,285
Any 2	{0}	0,960	76,1%	1,116	2,224	2,3%	12,253
Any 3	{0}	0,955	83,8%	1,116	2,224	2,6%	11,066
Any 4	{0}	0,951	92,3%	1,116	2,224	2,9%	9,742

- Planificació 6. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 0,798 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{30}	0,964	69,1%	1,116	2,223	2,1%	13,394
Any 2	{0}	0,960	76,1%	1,116	2,223	2,3%	12,362
Any 3	{0}	0,956	83,8%	1,116	2,223	2,6%	11,175
Any 4	{0}	0,951	92,3%	1,116	2,223	2,8%	9,851

- Planificació 7. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 0,826 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{20}	0,940	97,9%	1,519	3,025	4,1%	0,401
Any 2	{20}	0,945	95,6%	1,519	3,025	3,3%	2,621
Any 3	{40}	0,972	99,7%	1,181	2,348	1,2%	2,526
Any 4	{24}	0,972	99,5%	1,180	2,347	1,2%	1,965

- Planificació 8. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 0,948 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{20}	0,940	97,9%	1,519	3,025	4,1%	0,401
Any 2	{30}	0,962	76,1%	1,115	2,222	2,2%	12,492
Any 3	{0}	0,958	83,8%	1,115	2,222	2,4%	11,306
Any 4	{0}	0,954	92,3%	1,115	2,222	2,7%	9,982

- Planificació 9. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 1,241 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{20}	0,940	97,9%	1,519	3,025	4,1%	0,401
Any 2	{20}	0,945	95,6%	1,519	3,025	3,3%	2,621
Any 3	{30}	0,964	83,8%	1,115	2,222	2,1%	11,609
Any 4	{0}	0,960	92,3%	1,115	2,222	2,4%	10,288

- Planificació 10. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 1,522 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{50}	0,976	87,7%	1,374	2,736	1,7%	1,979
Any 2	{0}	0,973	96,7%	1,374	2,736	1,9%	0,609
Any 3	{40}	0,982	98,8%	1,094	2,176	0,9%	2,516
Any 4	{24}	0,981	99,1%	1,094	2,175	0,9%	1,901



- Planificació 11. Inversió total actualitzada a l'any 0 = 1,956 M€

Any	Operador de circuit	Nivell de tensió mínim [p.u.]	Nivell de càrrega màxim	TIEPI [hores int. / any]	NIEPI [nombre int. / any]	Pèrdues	Marge de creixement [MVA]
Any 0	{20}	0,942	99,1%	1,520	3,027	4,1%	0,168
Any 1	{50}	0,976	87,7%	1,374	2,736	1,7%	1,979
Any 2	{0}	0,973	96,7%	1,374	2,736	1,9%	0,609
Any 3	{30}	0,972	83,5%	0,999	1,990	1,6%	11,699
Any 4	{0}	0,969	91,9%	0,999	1,990	1,8%	10,316







## Acta de qualificació de tesi doctoral

Curs acadèmic:

Nom i cognoms

Jaume Gratacós Prats

Programa de doctorat

Enginyeria elèctrica

Unitat estructural responsable del programa

Departament d'Enginyeria Elèctrica

## Resolució del Tribunal

Reunit el Tribunal designat a l'efecte, el doctorand / la doctoranda exposa el tema de la seva tesi doctoral titulada

\_\_\_\_\_.

Acabada la lectura i després de donar resposta a les qüestions formulades pels membres titulars del tribunal, aquest atorga la qualificació:

NO APTE

APROVAT

NOTABLE

EXCEL·LENT

(Nom, cognoms i signatura)		(Nom, cognoms i signatura)	
President/a		Secretari/ària	
(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ d'/de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

El resultat de l'escrutini dels vots emesos pels membres titulars del tribunal, efectuat per l'Escola de Doctorat, a instància de la Comissió de Doctorat de la UPC, atorga la MENCIÓ CUM LAUDE:

SÍ

NO

(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)
President de la Comissió Permanent de l'Escola de Doctorat	Secretari de la Comissió Permanent de l'Escola de Doctorat

Barcelona, \_\_\_\_\_ d'/de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_