

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Enginyeria Tècnica Industrial: Especialitat Electrònica Industrial

Disseny d'heurística pel problema d'electrificació rural

**JUAN DANIEL CORTÉS GARCÍA
PONENT: JOAN TRIADÓ i AYMERICH**

PRIMAVERA 2012



TecnoCampus
Mataró-Maresme

Dedicatòria

Al meus Pares que sempre hi han estat quan els he necessitat, a la meva dona i a la meva filla per l'alè donat durant tota la carrera, a amics, i resta de família.

Agraïments

A tots els professors de l'EUPM amb els que he tingut la sort de compartir classe especialment a Carles Paul per motivar-me per traure'm la carrera i a Joan Triadó per la seva ajuda i guia en aquest treball.

Resum

Es proposa el disseny d'una heurística basada en *Corridor Method* per optimitzar el temps que es necessari per poder trobar una solució factible i suficientment acceptable, encara que no sigui la òptima, al problema de combinar d'equips individuals aïllats amb la generació y distribució d'electricitat mitjançant una o varies microxarxes. La localització dels diferents tipus d'aerogeneradors i generadors solars i el disseny de les microxarxes es decideix considerant el recurs eòlic de cada punt i la localització i demanda dels punts de consum. Aquesta alternativa de disseny incorpora la opció d'utilitzar equips de generació de més potència i proporcionalment més barats.

Resumen

Se propone el diseño de una heurística basada en *Corridor Method* para optimizar el tiempo que se necesario para poder encontrar una solución factible y suficientemente acceptable, aunque no sea la óptima, al problema de combinar equipos individuales aislados de generación y distribución de electricidad mediante una o varias microrredes. La localización de los diferentes tipos de aerogeneradores y generadores solares y el diseño de las microrredes se decide considerando el recurso eólico de cada punto y la localización y demanda de los puntos de consumo. Esta alternativa de diseño incorpora la opción de utilizar equipos de generación de más potencia y proporcionalmente más baratos.

Abstract

It is proposed to design a heuristic based on *Corridor Method* for optimizing the time needed to find a feasible solution and sufficiently acceptable, although not the optimum, for the problem of combining individual team isolated the generation and distribution electricity through one or more microgrids. The location of different types of wind turbines and solar generators and microgrids design is decided considering the wind resource and the location of each point of demand and consumption points. This alternative design incorporates the option of using computers to generate more power, proportionally cheaper.

Índex.

Índex de figures	III
Índex.de taules.....	V
Glossari de termes.	VII
1. Objectius.....	1
1.1 Propòsit	1
1.2 Finalitat	1
1.3 Objecte	1
1.4 Abast	2
2. Les energies renovables pel desenvolupament	3
2.1. Introducció	3
2.2. Energia Eòlica	3
2.2.1 Principis de conversió de l'energia eòlica	4
2.2.2 Potencial eòlic.....	6
2.3 Energia Solar Fotovoltaica.....	11
2.3.1 Principi de funcionament	11
3. Micro-Xarxes.	13
3.1. Concepte de Micro-Xarxa.....	13
3.2. Tipus de Micro-Xarxes.	14
3.3. Micro-xarxes en electrificacions rurals.....	14
3.4. Consideracions de disseny.	15
3.5. Sistemes híbrids.	15
3.6. Elements que integren una micro-xarxa.	16
3.6.1 Panells fotovoltaics.....	17
3.6.2. Inversors.	18
3.6.3. Reguladors.	19
3.6.4 Bateries.	20
3.6.5. Aerogenerador.	22
4. Metaheurístiques.	25

4.1 Qualificatiu d'heurístic.....	25
4.2 Heurística en Optimització	26
4.3 El terme Metaheurístic.....	26
4.4 Tipus de Metaheurístiques.....	27
4.4.1. Els quatre tipus fonamentals d'heurístiques.....	28
4.5 Metaheurístiques de Relaxació	28
4.6 Metaheurístiques de recerca.....	29
4.7 Metaheurístiques de recerca Local.....	30
5. Programació Lineal.....	31
5.1 introducció als problemes de Programació Lineal.....	31
5.2. L'algorisme del Simplex.....	32
5.3. Programació Lineal Entera (PLE).....	33
5.4 Programació Lineal entera i Mixta (PLEM).....	35
5.5 Resolució de model matemàtics lineals	35
6. Modelització matemàtica del sistema	37
6.1 Consideracions de disseny	37
6.1.1 Avaluació de recurs edlic.....	37
6.1.2 Avaluació de recurs solar.....	38
6.1.3 Esquema i disseny de la micro xarxa	38
6.1.4 Pèrdues en la instal·lació	39
6.1.5 Capacitat de les bateries.....	39
6.2 Formulació matemàtica plantejada	40
6.2.1 Paràmetres del model de PLEM	40
7. Solució del model mitjançant <i>Corridor Method</i>.....	49
7.1 Optimització local amb el Corridor Method.....	49
7.2 Espais de decisió del <i>Corridor Method</i>	50
7.3. Passos principals de l'algorisme.....	52
7.4. Seqüències detallades de l'algorisme	52
7.5. Diagrama de flux de l'algorisme 1er etapa.....	54
7.6. Diagrama de flux de l'algorisme 1er etapa.....	55
7.7 Codi d'algorisme per IBM ILOG CPLEX 12.2	56

8. Experiència computacional	59
9. Conclusions	69
10 Referències	71

Índex de figures

Figura 2.1 Aerobomba.....	4
Figura 2.2 Micro-generador (100 W) horitzontal de tres pales	5
Figura 2.3 Efecte del vent sobre les pales d'un aerogenerador	5
Figura 2.4 Densitat de potència en funció de la velocitat del vent.....	7
Figura 2.5 Valors típics del CP per diferents aeroturbines en funció de la VE.....	10
Figura 2.6 Corba de duració de la potència	10
Figura 3.1 Micro-xarxa.....	13
Figura 3.2 Esquema de micro-xarxa híbrida	16
Figura 3.3 Elements que integren una micro-xarxa.....	16
Figura 3.4 Panell de silici mono-cristal·lí.....	17
Figura 3.5 Panell de silici poli-cristal·lí.....	18
Figura 3.6 Panell de silici amorf y esquema explicatiu de l'obtenció d'energia....	18
Figura 3.7 Diferents tipus d'inversors presents al mercat	19
Figura 3.8 Diferents tipus de reguladors presents al mercat.....	20
Figura 3.9 Diferents tipus de bateries	21
Figura 3.10 Components d'un aerogenerador	23
Figura 7.1 Diagrama flux 1 ^a etapa.	54
Figura 7.2 Diagrama flux 2 ^a etapa	55
Figura 8.1 Grafica del temps d'una solució entera de 20 vivendes.....	60
Figura 8.2 Grafica del temps d'una solució factible de 20 vivendes.....	61
Figura 8.3 Grafica del temps d'una solució Corridor de 20 vivendes.....	61
Figura 8.4 Resultats solució Corridor amb 3 iteracions	62
Figura 8.5 Grafica del temps d'una solució entera de 30 vivendes.....	63

Figura 8.6 Grafica del temps d'una solució factible de 30 vivendes.....	63
Figura 8.7 Grafica del temps d'una solució Corridor de 30 vivendes.....	64
Figura 8.8 Grafica del temps d'una solució entera de 50 vivendes.....	66
Figura 8.9 Grafica del temps d'una solució factible de 50 vivendes.....	66
Figura 8.10 Grafica del temps d'una solució Corridor de 50 vivendes.....	67

Índex.de taules

Taula 8.1 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 10 vivendes.....	59
Taula 8.2 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 20 vivendes.....	62
Taula 8.3 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 30 vivendes.....	64
Taula 8.4 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 40 vivendes.....	65
Taula 8.5 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 50 vivendes.....	67
Taula 8.6 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 60 vivendes.....	68
Taula 8.7 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 70 vivendes.....	68
Taula 8.8 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 80 vivendes.....	68
Taula 8.9 Resultats de solucions enteres i solucions corredor de 90 vivendes.....	68

Glossari de termes.

PLEM	Programació lineal entera i mixta
R	Força de sustentació
Fasc	Força d'ascensió
Farr	Força de arrossegament.
m	Massa
v	Velocitat (m/s)
ve	Velocitat específica (m/s)
Ec	Energia cinètica
ρ	Densitat de l'aire (kg/m ³)
A	Àrea (m ²)
Pd	Potència disponible (Watts)
t	temperatura (C°)
h	altura (m)
Pa	potència eòlica aprofitada o recuperada
Cp	coeficient de conversió o de potència (adimensional)
F.R.E.D	Folkecenter for Renewable Energy de Dinamarca
RCS	Rectificador Controlat de Silici
IGBT	Comporta integrada amb transistors bipolars
IO	Investigació d'operacions

1 Objectius

1.1 Propòsit

Disseny d'un programa basat en l'heurística del *Corridor Method* per optimitzar el temps que es necessari per poder trobar una solució factible i suficientment acceptable

1.2 Finalitat

Dissenyar una heurística per optimitzar els temps necessaris per trobar una solució factible i acceptable, encara que no sigui l'òptima, al problema de combinar d'equips individuals aïllats amb la generació y distribució d'electricitat mitjançant una o varies microxarxes.

1.3 Objecte

L'objectiu d'aquest treball és resoldre un model matemàtic de programació lineal entera mixta d'un problema d'electrificació rural per determinar el tipus de tecnologia i la ubicació dels diferents equips per proveir la demanda energètica d'una comunitat rural, ja sigui mitjançant equips individuals com mitjançant unes micro-xarxes. La creació de microxarxes, permet l'ús d'equips de major potència en comparació a una generació situada a cadascun dels punts de consum, per la qual cosa es redueixen costos d'inversió inicial i no es limita a l'usuari al recurs energètic disponible de la seva ubicació. El model permet que l'usuari s'alimenti de la tecnologia més adequada en funció del recurs energètic de la zona. Com a dades de partida, el model utilitza el recurs energètic de la zona, tant eòlic com solar, i la demanda d'energia i potència dels usuaris.

1.4 Abast

En aquest treball es parteix de l'energia que podria generar cada tipus de aerogenerador i panell fotovoltaic en cada punt en cada punt de possible ubicació. El criteri de resolució considerat és la minimització de la inversió inicial de la instal·lació. Es desenvolupa un model de variables binàries i senceres, i dos tipus de tecnologia; solar i eòlica. I es proposa un model heurístic anomenat *Corridor method* per obtenir millors solucions.

La validació del model i la comparació de processos de resolució és realitza mitjançant l'aplicació de casos reals.

2. Les energies renovables pel desenvolupament

2.1 Introducció

L'energia, en les seves múltiples formes, constitueix un pilar bàsic en la vida de tota comunitat o país. En la majoria de països del món, la població que viu en àrees urbanes té accés a subministraments energètics moderns i eficients. Les poblacions rurals en canvi són tradicionalment menys afortunades i, especialment als països menys industrialitzats, el paper de l'energia recau sobre combustibles tradicionals o bé sistemes de producció d'energia i electricitat costosos e ineficients.

A l'Àfrica, per exemple, s'ha estimat que al voltant del 10 per cent de les llars urbanes té subministrament elèctric, sent la proporció de llars rurals amb subministrament molt menor.

A causa de les grans mancances que en aquest sentit solen tenir molts països en desenvolupament, son nombrosos els programes que contempnen entre els seus objectius l'abastament d'energia. Per a la regió d'Amèrica Central, les tecnologies i energia renovable a petita escala presenten una alternativa econòmica i ambiental factible per a la provisió d'energia a comunitats rurals remotes i per a l'expansió de la capacitat elèctrica instal·lada, ja sigui per mitjà de sistemes aïllats o per projectes connectats a la xarxa elèctrica. la regió compta amb suficients recursos per desenvolupar sistemes tant hidràulics com solars, eòlics o de biomassa. Addicionalment, aquestes tecnologies poden disminuir la contaminació del medi ambient causada per les emissions de gasos dels sistemes convencionals que utilitzen combustibles fòssils com el carbó i productes derivats del petroli. aquests gasos contribueixen a l'efecte hivernacle.

2.2 Energia Eòlica

L'energia eòlica es l'aprofitament de l'energia continguda en el vent. Igual que altres recursos renovables, la trobem abundantment disponible al planeta, però de manera

dispersa i variable. Aquesta energia va ser àmpliament utilitzada abans de la revolució industrial (Figura 2.1), però més tard va quedar desplaçada per l'ús dels combustibles fòssils a causa dels baixos costos i a la major fiabilitat dels sistemes. La crisi energètica dels anys 70 va promoure un renovat interès per les tecnologies eòliques, establint una nova generació d'aquests sistemes. Hi ha una varietat molt gran pel que fa al tipus de aeroturbines emprades per aprofitar l'energia del vent i transformar-la segons les necessitats locals. Les aeroturbines emprades per a la generació d'energia elèctrica són els anomenats aerogeneradors que disposen d'un generador elèctric.



Figura 2-1 Aerobomba

2.2.1 Principis de conversió de l'energia eòlica

Existeix una gamma molt diversa de diferents tipus d'aerogeneradors. A efectes pràctics es poden classificar en:

- Màquines d'eix horitzontal, en què l'eix de rotació és paral·lel a la direcció del vent, de forma similar a la dels clàssics molins de vent.
- Màquines d'eix vertical, en què l'eix de rotació és perpendicular a la direcció del vent.

El generador eòlic d'eix horitzontal és el més utilitzat, en aquest apartat es mostren molt breument els principis aerodinàmics sobre els quals es basa la seva funció. L'element encarregat de convertir l'energia cinètica del vent en energia mecànica de

rotació és el rotor, format per diverses pales que s'insereixen en una peça comú anomenada caixa (Figura 2.2).



Figura 2-2 Micro-generador (100 W) horitzontal de tres pales.

Les aeroturbines extreuen l'energia del vent transferint la força d'empenta de l'aire que passa a través de la turbina a les pales de l'aerogenerador. Les pales actuen de manera similar a les ales d'un avió, utilitzant l'anomenat principi de sustentació (Figura 2.3).

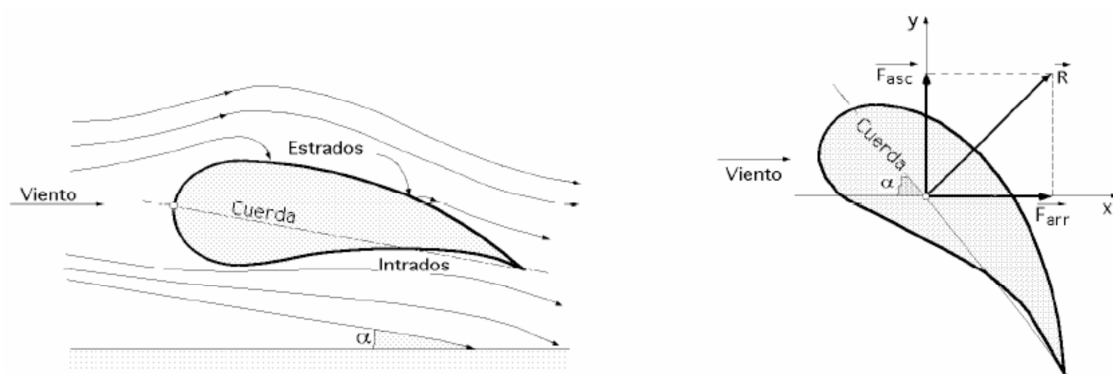


Figura 2-3 Efecte del vent sobre les pales d'un aerogenerador.

Com a efecte del flux d'aire, el costat barlovent del perfil aerodinàmic es troba en sobrepressió mentre el costat sotavento es troba en baixa pressió. Això és degut a la llei fonamental de la fluidodinàmica coneguda com el "principi de Bernoulli". Sabent que per a un líquid en moviment l'energia total específica (energia total per unitat de massa) que posseeix en un punt del seu recorregut és la suma de l'energia de pressió (p/ρ), la energia cinètica ($v^2/2$) i l'energia potencial ($g * z$) i ve donada per:

$$e = p/\rho + v^2/2 + g * z$$

El principi de Bernoulli expressa que en un fluid ideal, l'energia que posseeix el fluid roman constant al llarg del seu recorregut, pel que en el cas de les pales d'un aerogenerador, com les diferències d'energia potencial són menyspreables, resulta

$$k = p/\rho + v^2/2$$

Sent el recorregut de l'aire a la banda de barlovent de la pala major, del recorregut al costat de sotavent, la velocitat de l'aire a barlovent serà més gran de la velocitat a sotavent, per la qual cosa es genera una sobrepressió en el costat a sotavent. Fent referència a la figura 2.3, aquesta diferència de pressió, juntament amb els efectes de fregament, crea una força de sustentació (R) que és el producte d'una força d'ascensió (F_{asc}) i de una força de arrossegament (F_{arr}). Com a resultat, la força de sustentació es converteix en un parell mecànic que és el responsable de la rotació de l'eix de la turbina. La potència a l'eix es pot aprofitar de diferents maneres, en el cas d'un aerogenerador l'eix està connectat amb generador elèctric per a la producció d'energia elèctrica.

2.2.2 Potencial eòlic

L'energia aprofitada per una aeroturbina és l'energia cinètica continguda en el vent. Una massa d'aire fluid m amb una velocitat v posseeix una energia cinètica Ec que pot ser expressada com:

$$Ec = 1/2 * m * v^2$$

El cabal màssic d'aire de densitat ρ que flueix a través d'una superfície d'àrea A perpendicular a la direcció del flux, ve donat per l'equació de mecànica de fluids

$$m = \rho * A * v$$

La potència disponible Pd associat al cabal d'aire que travessa aquesta secció és

$$Pd = 1/2 * m * v^2 = 1/2 * \rho * A * v^3$$

De l'expressió anterior ens indica que la potència eòlica disponible és proporcional a la densitat de l'aire, a l'àrea exposada perpendicularment al flux de vent i al cub de velocitat d'aquest. La potència eòlica disponible és la màxima potència que podríem extreure si poguéssim convertir tota la seva energia cinètica en energia útil. Una forma de caracteritzar el potencial eòlic en una determinada zona o lloc és la densitat de potència o potència disponible per unitat d'àrea exposada perpendicularment a la direcció del vent que s'expressi com :

$$Pd/A = 1/2 * \rho * v^3$$

A la figura 2.4 es visualitza la variació d'aquest paràmetre en funció de la velocitat del vent.

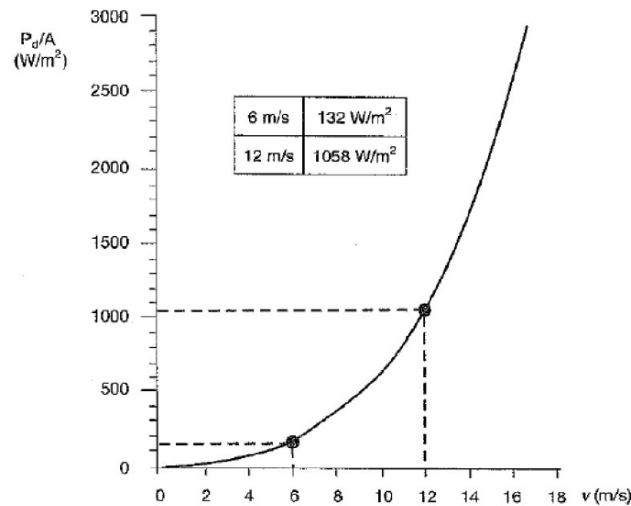


Figura 2.4 Densitat de potència en funció de la velocitat del vent.

Com es pot observar de l'expressió anterior, es pot arribar a les següents conclusions:

- La densitat de potència depèn del cub de la velocitat, així que si la velocitat augmenta del 10% la potència creix un 33%. Donada la variació de la potència amb respecte a la velocitat segons una llei cúbica, és molt important per decidir la instal·lació d'un aerogenerador disposar de mesures fiables de la velocitat a l'altura del centre de gir o caixa del aerogenerador respecte del sòl.
- La potència eòlica disponible és directament proporcional a l'àrea (A) considerada, és a dir al quadrat del diàmetre del cercle escombrat per les pales de l'aerogenerador, per això si es duplica el diàmetre del rotor de l'eòlica, l'energia obtinguda es veurà multiplicada per un factor igual a quatre.

- La densitat de potència depèn linealment de la densitat de l'aire, de manera que un aire fred presenta una densitat de potència superior a un més calent. Així mateix, i a igualtat de temperatura, un lloc situat a una cota propera al nivell del mar presentarà una densitat de potència superior a un altre a una major altitud pel fet que la densitat de l'aire disminueix amb l'altura. Per corregir els efectes de la temperatura i altitud sobre el nivell del mar sobre la densitat es pot utilitzar la expressió aproximada següent;

$$\rho = 1.225 * \left(\frac{288}{t + 273} \right) * e^{-\left(\frac{h}{8435} \right)}$$

Les densitats de potència mitjanes a 10 metres d'alçada al nivell del mar poden variar entre 10 i 400 W/m² i entre 5 i 300 W/m² a una alçada de 3000 m.

Donada la variabilitat de la velocitat, la caracterització del potencial eòlic disponible d'un lloc s'ha de realitzar a partir de la determinació dels valors de la potència corresponents a cada velocitat i fer la mitjana per un determinat període de temps, per exemple un any. D'aquesta manera es defineix el potencial eòlic disponible d'un lloc com la potència mitjana eòlica per unitat de superfície per a un determinat període de temps, generalment un any, suposada una densitat de l'aire constant:

$$\frac{Pd}{A} = \frac{1}{2} * \rho * \int_{-\infty}^{\infty} v^3 p(v) dv = \frac{1}{2} * \rho * (v^3)$$

(v^3) representa la mitjana de les cubs de les velocitats (velocitat mitjana cúbica) al període de temps considerat (un any mitjà).

Donat que s'ha de complir l'equació de continuïtat en el flux d'aire al seu pas pel rotor l'aerogenerador, no es pot extreure tota la potència eòlica disponible en el vent, ja que aquest conserva una certa velocitat aigües avall del rotor. El vent al seu pas per l'aerogenerador es frena, sortint d'aquest amb una velocitat menor que amb la qual ha entrat, però sempre diferent de zero. Per això hi ha un límit físic superior per a la potència aprofitable, segons el qual cap generador pot extreure del vent una potència superior a la fixada per aquest límit. Aquest límit és conegut com el límit de Betz, segons el qual la potència màxima que teòricament pot ser aprofitada d'un flux de vent és tan sols un 59,3% de la potència disponible en el mateix.

La potència eòlica extreta o captada del vent pel rotor de la màquina es coneix com potència eòlica aprofitada o recuperada (P_a).

$$P_a = C_p * P_d$$

Relació o fracció entre la potència aprofitada o recuperada per la màquina i la potència disponible en el vent. Aquest coeficient depèn del tipus de generador, de la geometria del mateix, de la seva velocitat de gir i de la velocitat del vent. El coeficient de potència C_p és funció de l'anomenada velocitat específica o "tip speed ràtio" (λ) definida com la relació entre la velocitat lineal o tangencial (u) de l'extrem de la pala del generador i la velocitat del vent (v). A la figura 2.5 es mostra la variació del coeficient C_p en funció de la velocitat específica λ per a diferents tipus d'aerogeneradors.

Com es pot observar en figura, hi ha un valor de la velocitat específica pel qual el coeficient de potència és màxim, amb valors entre 0,4 i 0,45 per grans aerogeneradors horitzontals a tres pales. El rendiment global es troba normalment entre el 20 i el 30% de la potència disponible.

Un aerogenerador es caracteritza per la seva corba de potència, que indica quina és la potència generada en funció de la velocitat del vent. Com es pot veure a la figura 2.6 en base a aquesta corba i a les característiques del vent de l'emplaçament, que es defineixen a través de la corba de durada es pot determinar com serà l'energia produïda pel aerogenerador.

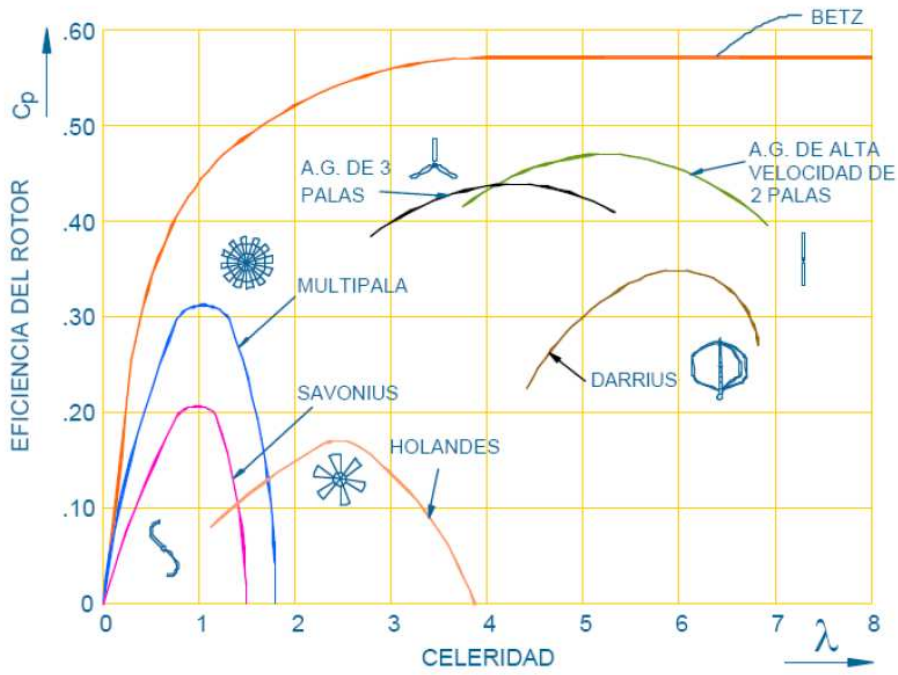


Figura 2-5 Valors típics del Cp per diferents aeroturbinas en funció de la velocitat específica

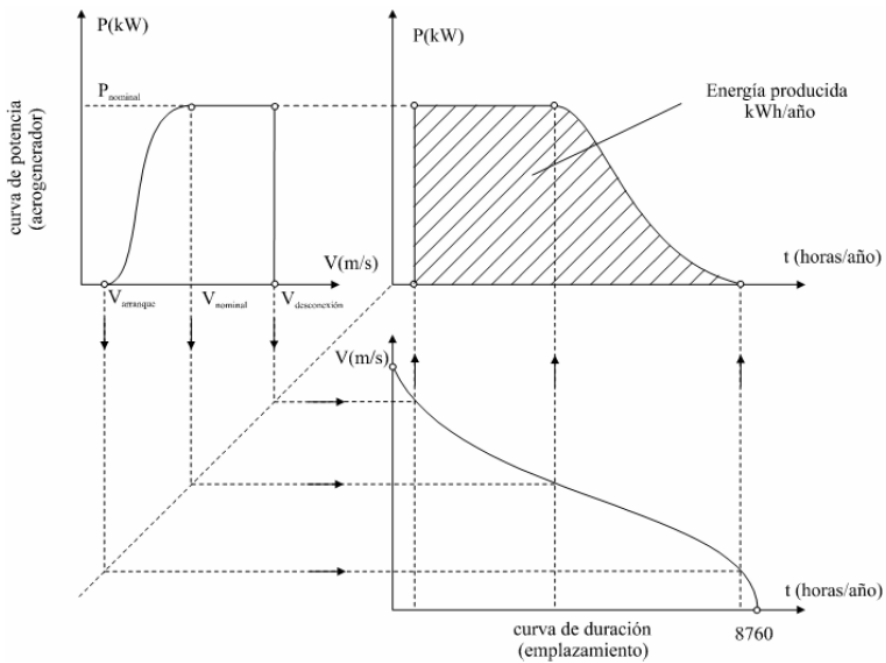


Figura 2-6 Corba de duració de la potència

2.3 Energia Solar Fotovoltaica

La potència de la irradiació varia segons el moment del dia, les condicions atmosfèriques que l'esmorteixen i la latitud. Es pot assumir que en bones condicions d'irradiació el valor és voltant als 1.000 W / m² a la superfície terrestre.

Espanya, per la seva privilegiada situació i climatologia, és especialment afavorida respecte al resta de països europeus, ja que sobre cada m² del seu sòl incideixen a l'any uns 1.500 kW / h de energia.

2.3.1 Principi de funcionament

L'energia solar fotovoltaica consisteix en l'aprofitament de la llum del sol per produir energia elèctrica per mitjà de cèl·lules fotovoltaïques.

La immensa majoria de cèl·lules solars que es comercialitzen actualment estan fabricades amb silici. El procés de fabricació es podria esquematitzar de la següent manera:

El silici de sorra ha de purificar-se, per a això es fon a una temperatura d'uns 1.400 ° C, s'eliminen les impureses i es deixa cristal·litzar formant un bloc de silici pur cristal·litzat. Aquest bloc es talla en fines capes de menys de mig mil·límetre, anomenades oblees, que es poleixen i es tracten químicament.

Posteriorment aquestes oblees es dopen lleugerament amb fòsfor per una cara i amb bor per la altra. D'aquesta manera es creen dues zones a l'oblea, anomenades respectivament zona n i zona p. La descompensació d'electrons causada per la introducció en el silici d'aquestes impureses origina l'aparició d'un camp elèctric a la regió d'unió de les dos zones. Aquesta disposició característica, al costat dels contactes que es disposen en totes cares de la oblea i una capa antireflectant per augmentar el percentatge de l'energia solar absorbida, donen lloc a la cèl·lula solar o cèl·lula fotovoltaica.

L'esmentat camp elèctric és el que fa possible que els electrons tendeixin a moure sempre en una direcció determinada quan reben la suficient energia per escapar de la

cèl·lula. Aquesta energia és proporcional als fotons que xoquen amb els electrons lliures que hi ha al silici. El corrent d'electrons és recollida a través d'un circuit extern, mitjançant la convenient disposició de contactes metàl·lics a les dues cares de la cèl·lula.

Els contactes metàl·lics són diferents en les dues cares. A la cara n han de ser el més estrets possible, per tal que tapin poca superfície de la cèl·lula, ja que si no impedirien l'arribada de llum sobre la part activa d'aquesta. Però d'altra banda, no han de ser tan estrets que augmentin massa la seva resistència, pel que tenen forma de graella. A la part p el contacte metàl·lic cobreix tota la superfície.

3. Micro-Xarxes.

3.1. Concepte de Micro-Xarxa.

En termes generals, una micro-xarxa és un sistema elèctric compost per un sistema de distribució de baixa o mitja tensió, amb generació distribuïda, dispositius d'emmagatzematge d'energia i demandes controlables connectades a la mateixa, i amb un sofisticat sistema de monitoratge i control que ofereix flexibilitat i versatilitat d'operació. Aquests sistemes poden operar vinculats a la xarxa de potència o bé en forma aïllada. L'operació en forma aïllada s'utilitza en casos de falles o col·lapses de la xarxa externa, i brinda la possibilitat de mantenir el subministrament a les demandes de la micro-xarxa. La figura 3.1 mostra un esquema general d'una micro-xarxa. En aquesta figura es mostren algunes fonts de generació distribuïda com una microturbina, cel·la de combustible i panells fotovoltaics, i la seva vinculació a la xarxa mitjançant convertidors electrònics.



Figura 3-1. Micro-xarxa.

La mida de les micro-xarxes poden variar des de petites aplicacions residencials que incloguin un sol consumidor fins a una ciutat petita amb una demanda de 50 MW.

Com a exemples hi ha: micro xarxes residencials, camps d'universitats, grans hospitals, parcs industrials, i micro xarxes que inclouen les instal·lacions de tota una petita localitat que serveixen a un gran nombre de consumidors. Depenent de l'aplicació, les micro-xarxes poden incloure l'ús de fonts de generació no convencionals com ara cel·les d'energia, aerogeneradors, panells fotovoltaics i l'ús de sistemes de recuperadors de calor residual, cogeneració o generació combinada de calor i electricitat (CHP) .

Per aconseguir una operació eficient que maximitzi els beneficis d'una micro-xarxa, es necessita d'un control coordinat de les diferents fonts de generació distribuïda, dels dispositius d'emmagatzematge d'energia i de les demandes controlables

3.2. Tipus de Micro-Xarxes.

Hi ha moltes possibles configuracions de micro-xarxes, que varien des de petits sistemes que s'apliquen a un sol client fins a grans sistemes que alimenten a milers de consumidors.

L'arquitectura de les micro-xarxes pot variar considerablement depenent dels objectius i requeriments de la mateixa i de les característiques del sistema on s'aplica (quantitat de clients connectats, tipus de càrrega, longitud dels circuits, etc.).

Independentment de la grandària i característiques físiques, tota micro-xarxa ha de poder controlar completament la seva operació. La generació de la mateixa, composta fonamentalment per Generació Distribuïda (GD), ha de poder controlar en forma adequada la freqüència i tensió, seguir les variacions de la càrrega i proveir un adequat suport de potència reactiva.

3.3. Micro-xarxes en electrificacions rurals.

Aquestes micro-xarxes no condicionen el consum d'una família al recurs eòlic disponible en la ubicació de la casa, es poden estalviar costos utilitzant equips grans, que distribueixin a diversos punts de consum, podent-se considerar demandes diferents de diferents punts i d'aquesta manera pot ser més fàcilment adaptar-se a increments de consum.

3.4. Consideracions de disseny.

La distribució d'electricitat des de les bateries dels llocs de consum es realitza en AC monofàsica, al voltatge de consum.

La micro-xarxa està formada per diferents trams que cada tram acaba en un punt de consum i s'estructuren en un esquema radial.

Un punt normalment pot tenir diversos conductors de sortida, però només un d'entrada.

3.5. Sistemes híbrids.

La característica principal d'un sistema híbrid és l'ús de dos o més fonts d'alimentació diferents. A més de l'energia solar, en els sistemes híbrids fotovoltaics s'utilitza generalment un generador dièsel, un aerogenerador, o la xarxa pública com a font d'alimentació. Els inversors amb carregadors de bateria integrats, que s'utilitzen als sistemes híbrids, alimenten els consumidors de corrent altern, o a partir de bancs de bateries, que utilitzen energia solar, o a partir de la segona font d'alimentació. Mitjançant aquest aparell també es pot recarregar la bateria a partir de la font d'alimentació addicional.

Els sistemes híbrids fotovoltaics presenten l'avantatge que no es necessita sobredimensionar notablement el generador solar per als períodes de baixa irradiació. Això suposa un estalvi de despeses considerable. En el sistema sempre s'usa prioritàriament l'energia produïda pel mòdul. En combinar amb una segona font controlable s'obté un subministrament d'energia fiable i disponible les 24 hores del dia durant els 365 dies de l'any.

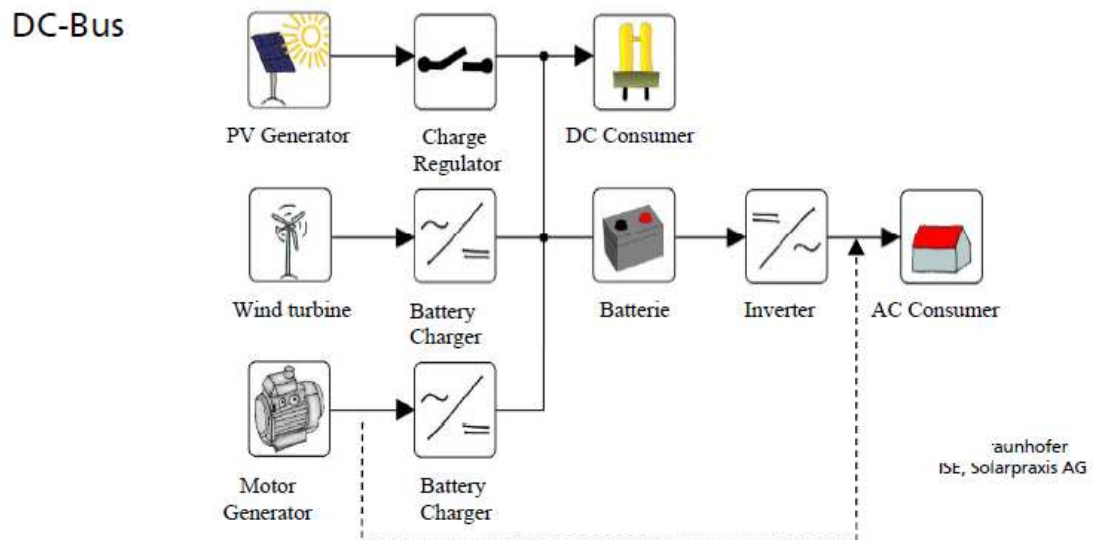


Figura 3-2. Esquema de Micro-xarxa híbrida.

3.6. Elements que integren una micro-xarxa.



Figura 3-3 Elements que integren una micro-xarxa.

- | | |
|-------------------------|------------------|
| 1 Panells fotovoltaics. | 2 Inversors. |
| 3 Reguladors. | 4. Bateries. |
| 5. Generador | 6. aerogenerador |

3.6.1 Panells fotovoltaics

Les cèl·lules es munten en sèrie sobre panells o mòduls fotovoltaics per aconseguir un voltatge adequat. Part de la radiació incident es perd per reflexió i una altra part per transmissió. El resta és capaç de fer saltar electrons d'una capa a l'altra creant un corrent proporcional a la radiació incident. La capa antireflectant augmenta l'eficàcia de la cèl·lula. La cèl·lula de silici, segons es tracti en el seu procés de fabricació, pot derivar varis tipus:

Silici pur mono-cristal·lí:

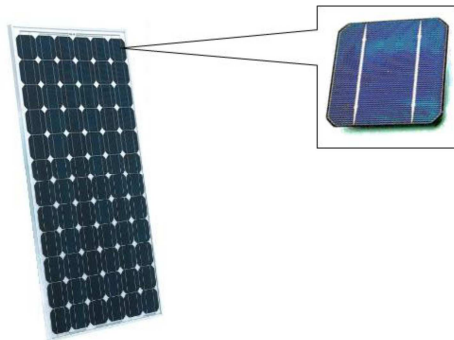


Figura 3.4 Panell de silici mono-cristal·lí

Silici poli-cristal·lí:

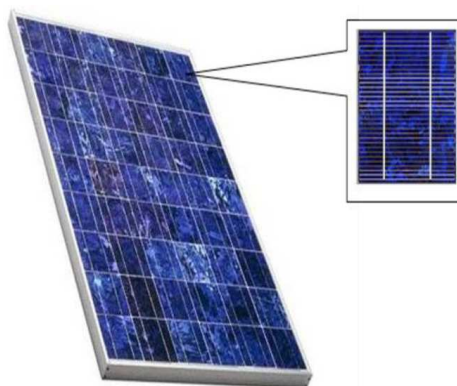


Figura 3.5 Panell de silici poli-cristal·li

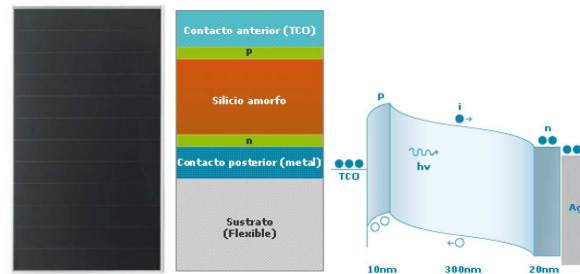
Silici amorf:

Figura 3.6 Panell de silici amorf y esquema explicatiu de l'obtenció d'energia

3.6.2. Inversors.

Els inversors transformen el corrent continu en corrent altern. Hi ha diversos inversors en el mercat, trobant-se entre els més utilitzats els inversors d'ona quadrada.

La majoria dels inversors funcionen fent passar el corrent continu a través d'un transformador, alternant el sentit de pas. El dispositiu de commutació que canvia la direcció del corrent ha d'actuar amb rapidesa. A mesura que el corrent passa a través de la cara primària del transformador, la polaritat canvia 100 vegades cada segon. Com a conseqüència, el corrent que surt del secundari del transformador va alternant, en una freqüència de 50 cicles complets per segon. Els inversors d'ona quadrada són més barats, però normalment són també els menys eficients. Produeixen massa harmònics que generen interferències (sorolls).

Inversors d'ona quadrada modificada: Són més sofisticats i cars que els anteriors. Utilitzen tècniques de pols ample. La tendència actual indica que d'aquí a molt poc temps el cost dels inversors d'ona sinusoidal s'acostarà més al dels altres, popularitzant la seva instal·lació i fent que augmenti el seu ús en aquestes instal·lacions.

Inversors d'ona sinusoïdal pura: Amb una electrònica més elaborada es pot aconseguir una ona sinusoïdal pura. Fins fa poc temps aquests inversors eren grans i cars, a més de ser poc eficients (de vegades només un 40% d'eficiència). Darrerament s'han desenvolupat nous inversors d'ona sinusoïdal amb una eficiència del 90%.



Figura 3.7 Diferents tipus d'inversors presents al mercat.

3.6.3. Reguladors.

El regulador és l'element que assegura el funcionament ideal de la bateria en condicions apropiades, evitant la sobrecàrrega i sobre-descàrrega de la mateixa, fenòmens ambdós molt perjudicials per a la vida de la bateria. El procediment que utilitza per a això és determinar l'estat de càrrega (SoC, per les sigles en anglès) de la bateria a partir de la tensió a la qual aquesta es troba. El regulador es programa en funció de la tecnologia d'emmagatzematge emprada per la bateria, per la qual cosa mesurant la tensió de la bateria, determina amb exactitud els llindars necessaris als que desconnecta la bateria per evitar la sobrecàrrega o descàrrega excessiva.

El regulador controla constantment la tensió de bateria. Quan aquesta tensió arriba a un valor per al qual es considera que la bateria es troba carregada (aproximadament 14/1 Volts per a una bateria de plom àcid de 12 Volts nominals) el regulador interromp el procés de càrrega. Això ho pot aconseguir obrint el circuit entre els mòduls fotovoltaics i la bateria (control tipus sèrie) o curtcircuitant els mòduls fotovoltaics (control tipus

shunt). Quan el consum fa que la bateria comenci a descarregar-se i per tant a baixar la seva tensió, el regulador torna a connectar el generador a la bateria i torna a començar el cicle. També existeixen els reguladors de càrrega l'etapa de control opera en dos passos, la tensió de càrrega a fons de la bateria pot ser una mica més gran a 14,1 Volts. A partir d'això, podem esmentar que el regulador quedés definit especificant el seu nivell de tensió (que coincidirà amb el valor de tensió del sistema) i el corrent màxima que haurà de manegar.



Figura 3.8 Diferents tipus de reguladors presents al mercat.

3.6.4 Bateries.

En sistemes que no es troben connectats a xarxa generalment es disposa d'alguns sistemes d'emmagatzematge per tal de disposar de l'energia en períodes de irradiació solar insuficient o vent fluix en el cas d'aerogeneradors.

Les bateries acumulen l'electricitat en forma d'energia química i la seva funció prioritària en un sistema d'electrificació autònom, és la d'acumular l'energia que es produeix durant les hores de lluminositat, per poder ser utilitzada en la nit o durant períodes prolongats de mal temps. Una altra funció important, és la de proveir una intensitat de corrent superior a la que el dispositiu fotovoltaic pot lliurar.



Figura 3.9 Diferents tipus de bateries.

Pel seu ús en sistemes fotovoltaics autònoms, les més representatives són les bateries de plom-àcid amb electròlit líquid, estacionàries (tubulars), SLI6 clàssiques, solar modificades, així com les d'electròlit gelificades.

A partir d'aquestes condicions generals procedirem a descriure els tipus de bateries més usats actualment a la indústria.

Bateries de plom-àcid: Dins d'aquesta categoria, les bateries més comunes són les de plom-antimoni, plom-seleni i plom-calci. Dins de les bateries de plom-àcid, les denominades estacionàries de baix contingut d'antimoni són una bona opció en sistemes fotovoltaics, perquè elles tenen uns 2500 cicles de vida quan la profunditat de descàrrega és d'un 20% (és a dir que la bateria estarà amb un 80% de la seva càrrega) i uns 1200 cicles quan la profunditat de descàrrega és del 50% (bateria amb 50% de la seva càrrega). Les bateries estacionàries posseeixen a més, una baixa auto-descàrrega (3% mensual aproximadament contra un 20% d'una bateria de plom àcid convencional) i un reduït manteniment. Dins d'aquestes característiques s'enquadren també les bateries de plom-calci i plom-seleni, que posseeixen una baixa resistència interna, valors

menyspreables de gasificació i una baixa auto descàrrega. El que caracteritza principalment a aquestes bateries és el seu baix cost i el manteniment que requereixen.

Bateries segellades gelificades: Aquestes bateries incorporen un electròlit del tipus gel amb consistència que pot variar des d'un estat molt dens al de consistència similar a un gel. Per la seva composició particular, no pateixen vessaments permetent així ser instal·lades en diferents posicions. Per contra no admeten descàrregues profundes.

Bateries de níquel-cadmi NiCd: Les principals característiques que presenten aquestes bateries són la seva composició amb electròlits alcalins, l'admissió de descàrregues profundes de fins al 90% de la capacitat nominal, els baixos coeficients d'auto descàrrega, un alt rendiment d'absorció de càrrega (major al 80%) i mostrar un rendiment molt elevat davant de variacions extremes de temperatura.

Com a principal desavantatge es pot esmentar el seu cost, notablement més elevat que el de les bateries àcides. Igual que les bateries de plom àcid, aquestes es poden aconseguir en les dues versions, estàndard i segellades, utilitzant la més convenient segons les necessitats de manteniment admissible per a l'aplicació prevista.

Té un baix coeficient d'auto-descàrrega, la càrrega ronda el 80%. Les cel·les tenen en general, un voltatge de 1,2 V. I com s'ha esmentat sobre el seu bon rendiment a temperatures extremes, la descàrrega que admeten se situa sobre el 90% de la seva capacitat nominal. Donat el seu alt cost, només es justifica la seva utilització en aplicacions rurals on la massa crítica de llocs d'instal·lació sigui elevada i les condicions geogràfiques i climatològiques ho exigeixin. L'electròlit que utilitzen és un alcalí.

3.6.5. Aerogenerador.

Depenent de la posició de l'eix de gir dels aerogeneradors respecte a la direcció del vent, els aerogeneradors es poden classificar en dos grans grups:

- a) **Aerogeneradors d'eix horitzontal o HAWT:** (Horizontal Axis Wind Turbine). En aquests models l'eix de rotació és paral·lel a la direcció del vent, de forma similar a la dels clàssics molins de vent.
- b) **Aerogeneradors d'eix vertical o VAWT:** (Vertical Axis Wind Turbine). En aquests l'eix de rotació es perpendicular a la direcció del vent i hi ha varis models: Tipus Savonius, tipus Windside i tipus Darrieus.

Components: Tècnicament les turbines de baix potencial eòlic tenen una estructura similar a les grans, només que el seu disseny és més simple. Com en general, l'aerogenerador més emprat és el d'eix horitzontal, tot seguit s'indiquen sobre la figura els components principals que constitueixen aquest tipus d'aerogenerador.

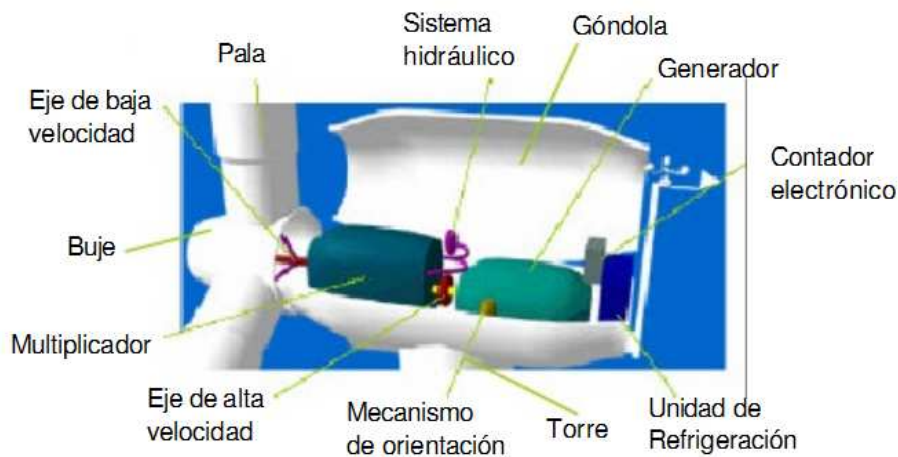


Figura 3.10 Components d'un aerogenerador d'eix horitzontal

4. Metaheurístiques.

4.1 Qualificatiu d'Heurístic.

L'idea més genèrica del terme heurístic està relacionada amb la tasca de resoldre intel·ligentment problemes reals usant coneixement. Aquest terme prové d'una paraula grega amb un significat relacionat amb el concepte de trobar i es vincula a la suposada exclamació *eureka* d'Arquímedes en descobrir el seu famós principi.

La concepció més comuna és interpretar que heurístic és el qualificatiu apropiat per als procediments que, emprant coneixement sobre un problema i de les tècniques aplicables, tracten d'aportar solucions usant una quantitat de recursos raonable (generalment temps).

En Intel·ligència Artificial s'utilitza el qualificatiu heurístic, en un sentit molt genèric, per aplicar-lo a tots aquells aspectes que tenen a veure amb l'ús de coneixement en la realització dinàmica de tasques.

Es parla d'heurística per referir-se a una tècnica, mètode o procediment intel·ligent de realitzar una tasca que no és producte d'un rigoros anàlisi formal, sinó de coneixement expert sobre la tasca. En especial, s'usa el terme heurístic per referir a un procediment que tracta d'aportar solucions a un problema amb un bon rendiment, pel que fa a la qualitat de les solucions i als recursos emprats.

En la resolució de problemes específics han sorgit procediments heurístics exitosos, dels quals s'ha tractat d'extreure el que és essencial en el seu èxit per aplicar-lo a altres problemes o en contextos més extensos. Aquesta línia d'investigació ha contribuït al desenvolupament científic del camp de les heurístiques i ha estendut l'aplicació dels seus resultats. D'aquesta manera s'han obtingut, tant tècniques i recursos computacionals específics, com estratègies de disseny generals per procediments heurístics de resolució de problemes. Aquestes estratègies generals per construir algorismes, que queden per sobre de les heurístiques, i van més enllà, es denominen metaheurístiques.

4.2 Heurística en Optimització

En un problema d'optimització, a part de les condicions que han de complir les solucions factibles del problema, es busca quina és l'òptima segons algun criteri de comparació entre elles. En Optimització Matemàtica, el terme heurístic s'aplica a un procediment de resolució de problemes d'optimització amb una concepció diferent:

es qualifica d'heurístic a un procediment per al qual es tingui un alt grau de confiança que troba solucions d'alta qualitat amb un cost computacional raonable, encara que no es garanteixi la seva optimitat o la seva factibilitat, i fins i tot, en alguns casos, no s'arribi a establir el prop que s'està d'aquesta situació.

En Optimització Matemàtica, s'usa el qualificatiu heurístic en contraposició a exacte, que s'aplica als procediments a què se'ls exigeix que la solució aportada sigui òptima i factible. Una solució heurística d'un problema és la proporcionada per un mètode heurístic, és a dir, aquella solució sobre la que es té certa confiança que és factible i òptima, o de que arriba a un alt grau d'optimitat i o factibilitat.

També és usual aplicar el terme heurística quan, utilitzant el coneixement que es té del problema, es fan canvis en el procediment de solució del problema que, tot i que no afecten a la complexitat d'aquest, milloren el rendiment en el seu comportament pràctic.

4.3 El terme Metaheurístic.

El terme metaheurístic s'obté d'anteposar a heurística el sufix "meta" que significa "més enllà" o "a un nivell superior". El terme metaheurística va aparèixer per primera vegada en l'article seminal sobre recerca tabú de Fred Glover el 1986. A partir de llavors han sorgit multitud de propostes de pautes per dissenyar bons procediments per resoldre certs problemes que, en ampliar el seu camp d'aplicació, han adoptat la denominació de metaheurístiques.

Els conceptes actuals del que és una metaheurística estan basats en les diferents interpretacions del que és una forma intel·ligent de resoldre un problema. Les

metaheurístiques són: estratègies intel·ligents per dissenyar o millorar procediments heurístics molt generals amb un alt rendiment. Es refereixen al disseny dels tipus fonamentals de procediments heurístics de solució d'un problema d'optimització. Les metaheurístiques principals es refereixen a mètodes de relaxació, processos constructius, recerques per entorns i procediments evolutius. Les metaheurístiques de recerca constitueixen el paradigma central d'aquestes tècniques en la resolució de problemes d'optimització.

4.4 Tipus de Metaheurístiques.

Les metaheurístiques són estratègies per a dissenyar procediments heurístics. Per tant, els tipus de metaheurístiques s'estableixen, en primer lloc, en funció del tipus de procediments a què es refereix. Alguns dels tipus fonamentals són:

a) Relaxació (Lagrangiana, Restriccions subrogades ...)

- Proposen solucions
- Guiar la recerca

b) Constructives

- Greedy, Aleatòria, GRASP

c) Recerca

- Recerca Local
- Recerca Global:
- MultiStart (*MS*)
- Entorn Variable (*VNS*)
- Memòria (*Tabú Search*)
- Estocàstiques (*Simulated Annealing*)

d) Evolutives

- Evolució estocàstica (*AG, Meméticos, EDAs*)
- Evolució determinística (*Scatter Search, Path-Relinking*)

Altres: Descomposició, memòria a llarg termini.

Mixtes: GRASP. Multi-Arrencada.

4.4.1. Els quatre tipus fonamentals de metaheurístiques.

- relaxació:** es refereixen a procediments de resolució de problemes que utilitzen relaxacions del model original (modificacions del model que fan al problema més fàcil de resoldre), la solució facilita la solució del problema original.
- constructives:** s'orienten als procediments que tracten de l'obtenció d'una solució a partir de l'anàlisi i selecció gradual dels components que la formen.
- recerca:** guien els procediments que fan servir transformacions o moviments per recórrer l'espai de solucions alternatives i explotar les estructures d'entorns associades.
- evolutives:** estan enfocades als procediments basats en conjunts de solucions que evolucionen sobre l'espai de solucions.

4.5 Metaheurístiques de Relaxació

Una qüestió rellevant a l'hora d'abordar un problema real és l'obtenció d'un model que permeti utilitzar una tècnica de resolució apropiada. Si amb aquest model el problema és difícil de resoldre es va a models modificats en els quals és més senzill trobar bones solucions o en els que els procediments són més eficients. Una relaxació d'un problema és un model simplificat obtingut al eliminar, debilitar o modificar restriccions (o objectius) del problema real. En qualsevol formulació sempre hi ha algun grau de simplificació, la qual pot afectar en major o menor mesura a l'ajust a la realitat dels

procediments de resolució i de les solucions del problema proposades. Els models molt ajustats a la realitat solen ser molt difícils de resoldre, i les seves solucions difícils d'implementar exactament, per la qual cosa s'acudeix a models relaxats.

Les metaheurístiques de relaxació es refereixen al disseny, tant de procediments que utilitzen formulacions relaxades del problema per proposar les seves solucions, com solucions del problema, com de procediments que fan servir aquestes relaxacions per guiar les operacions realitzades per a la seva resolució.

Moltes metaheurístiques de relaxació modifiquen elements del problema per proposar la solució d'aquestes modificacions com a solució heurística del problema original. Les bones relaxacions són les que simplifiquen el problema i fan més eficients els procediments de solució, però la resolució proporciona molt bones solucions del problema original.

Per exemple, per un problema de programació lineal entera, la seva relaxació lineal consisteix a ignorar la restricció que les variables siguin senceres.

S'apliquen procediments eficients de programació lineal, com el mètode del *Simplex*, a aquesta relaxació i es proposa una solució entera molt propera a la solució del problema relaxat.

4.6 Metaheurístiques de recerca

El tipus de metaheurística més important és el de les metaheurístiques de recerca, que estableixen estratègies per recórrer l'espai de solucions del problema transformant de manera iterativa solucions de partida.

La concepció primària de heurística més freqüent era la d'alguna regla intel·ligent per millorar la solució d'un problema que s'aplicava iterativament mentre fos possible obtenir noves millores. Tals processos es coneixen com recerques monòtones (descendents o ascendents), algorismes escaladors (*hill-climbing*) o recerques locals.

Aquesta última denominació obeeix al fet que la millora s'obté en base a l'anàlisi de solucions similars a la que realitza la recerca; denominades solucions veïnes.

Estrictament parlant, una recerca local és la que basa la seva estratègia en l'estudi de solucions del veïnat o entorn de la solució que realitza el recorregut..

4.7 Metaheurístiques de recerca Local

Les metaheurístiques de cerca local són les estratègies o pautes generals per dissenyar mètodes de recerca local, com l'estratègia voraç o greedy. Aquesta metaheurística estableix com a pauta, un cop considerades quines son les solucions que intervenen en l'anàlisi local, triar iterativament la millor d'aquestes solucions mentre hi hagi alguna millora possible. No obstant això, se sol assumir que les cerques locals només modifiquen la solució que realitza el recorregut mitjançant una millora en el seu propi entorn. El principal inconvenient d'aquestes recerques locals és que es queden atrapades en un òptim local, una solució que no pot ser millorada per una anàlisi local. Per això, el propòsit fonamental de les primeres metaheurístiques era estendre una recerca local per continuar-la més enllà dels òptims locals, denominant Cerca Global.

5. Programació Lineal.

5.1 introducció als problemes de Programació Lineal.

La programació lineal utilitza un model matemàtic per descriure el problema. L'adjectiu lineal, vol dir que totes les funcions matemàtiques del model han de ser funcions lineals. En aquest cas la paraula programació, en essència és sinònim de planificació. Així la programació lineal tracta la planificació de les activitats per obtenir un resultat òptim, és a dir, el resultat que més s'apropa a la meta especificada (segons el model matemàtic) entre totes les alternatives de solució.

Qualsevol problema que el model matemàtic s'ajusti al format general del model de programació lineal és un problema de programació lineal. Encara més, es disposa d'un procediment de solució extraordinàriament eficient anomenat mètode *Simplex*, per resoldre aquests problemes lineals fins i tot de grans dimensions. Aquestes són algunes raons del gran auge de la programació lineal a les últimes dècades.

Forma canònica:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Sujeto a;

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad , i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0$$

$$\text{Minimize } Z = CX$$

Sujeto a;

$$Ax \geq b$$

$$X \geq 0$$

On :

A = Es la Matriu de coeficients de les variables al sistema d'equacions de $(m \times n)$

a_{ij} = coeficient de la variable j a la restricció i

x = Vector solució $(n \times 1)$

x_j = Variable j

b_i = Costat dret de la restricció i (Limitació i)

C = Vector de costos o utilitats $(1 \times n)$

c_j = Coeficient de la variable j en la funció objectiu

La Programació Lineal es basa en una certa estructura, cal destacar quatre d'elements característics.

Paràmetres: Dades conegudes del problema necessaris per resoldre el model matemàtic.

Variàbles: Són els elements d'estudi que defineixen la solució, es desconeix el seu valor, han de complir les restriccions.

Funció Objectiu: L'objectiu del problema és maximitzar o minimitzar una funció, determina els valors de les variables per maximitzar o minimitzar aquesta funció.

Restriccions: Exigències que han de complir les variables. Són funcions lineals.

5.2. L'algorisme del Simplex.

L'algorisme del Simplex busca l'òptim d'un problema de PL recurrent només alguns dels vèrtexs del poliedre que representa el conjunt de solucions factibles. A cada iteració, l'algorisme es desplaça d'un vèrtex a un altre de manera que el valor de la funció objectiu millori amb el desplaçament, és a dir, que augmenti si el problema és de

maximització, o disminueixi si el problema és de minimització. L'optimització d'un P.L. pot donar lloc a quatre possibles resultats:

- a) Aconseguir un òptim únic.
- b) Assolir un òptim que no és únic (solucions alternatives o múltiples).
- c) Concloure que el problema és no factible, és a dir, que no existeix cap solució que satisfaci simultàniament totes les restriccions del problema.
- d) Concloure que el problema és no fitat, és a dir, que el valor de la funció objectiu en l'òptim és tan gran com es vulgui si el problema és de maximització, o tan petit com es vulgui si el problema és de minimització.

El mètode Simplex arriba sempre a un d'aquests resultats en un nombre finit d'iteracions. A cada iteració es passa d'una solució bàsica factible a una altra, de manera que en el procés, el valor de la funció objectiu millora en cada iteració. Quan es determina que no existeix cap SBF amb un millor valor de la funció objectiu que l'actual es deté el procés ja que s'ha arribat a l'òptim.

5.3. Programació Lineal Entera (PLE)

Els primers intents per resoldre un problema de PLE van sorgir de la metodologia utilitzada en la resolució de problemes de PL. El primer algorisme finit va ser donat per R. Gomory i es va denominar Mètode dels plans de tall.

Els avenços teòrics en la resolució de PLE han estat importants, tot i que no s'ha vist correspost en l'eficàcia del còmput. Això és a causa dels errors d'arrodoniment comesos en les successives iteracions i acumulats en el còmput que realitzen els ordinadors.

Un problema de PLE és un problema de PL en el qual algunes de les variables, o totes, han de ser nombres enters no negatius. L'objectiu és trobar el valor de la funció que maximitzi o minimitzi la funció objectiu:

Funció objectiu.

$$\text{Max (Min)} z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$$

subjecta a una sèrie de restriccions:

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n (\leq \geq =) b_1$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n (\leq \geq =) b_2$$

....

$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n (\leq \geq =) b_m$$

$$x_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

$$x_j \text{ enter}$$

Quan se'ns presenti la resolució d'un problema de PLE, el resollem com un problema de PL. Si les seves solucions són enteres, aquesta és la solució per al problema de PLE. En qualsevol problema es verifica que la solució òptima es:

$$z_{op} (PL) \geq z_{op} (PLE)$$

Aquesta relació es compleix sempre perquè qualsevol solució factible per a un problema de PLE és també una solució factible per a la seva relaxació lineal (PL).

El problema de PL que s'obté en ometre totes les restriccions senceres o variables 0-1 es diu relaxació de PL.

Una solució entera factible X_F és òptima per al problema de PLE si és solució òptima d'una relaxació lineal. En aquest cas es compleix que:

$$z_{op} (PL) = z_{op} (PLE) = Z_F$$

Un problema de PLE en el qual només algunes de les variables han de ser nombres enters, es diu un problema de PLEM.

Un problema de PLE en el qual totes les variables prenen valors 0 o 1, es denomina problema de PLB.

Per tant, la relaxació PL és una versió menys restringida, o més relaxada, de la PLE. Això significa que la regió factible per a qualsevol PLE ha d'estar inclosa a la regió factible de la relaxació de la PL corresponent.

5.4 Programació Lineal entera i Mixta (PLEM)

Les variables d'un model de programació matemàtica es poden classificar en els següents tipus: variables reals, variables enteres i variables binàries (només poden agafar el valor d'1 o 0).

En alguns problemes de PL és necessari que les variables hagin de tenir valors enters perquè la solució d'aquest problema tingui sentit. Si totes les variables són enteres direm que tenim un model de PLE. Si hi ha variables enteres o reals el problema es dirà PLEM.

La utilització tant de variables enteres com binàries dóna l'oportunitat d'ampliar el ventall de possibles problemes a resoldre però per contra la resolució de programes matemàtics amb aquestes variables es complica notablement.

5.5 Resolució de model matemàtics lineals

A diferència d'un model de variables reals els models de PLEM tenen un nombre limitat de solucions, de manera que podria plantejar trobar la solució mitjançant l'exploració de totes les solucions. Això és factible per problemes amb dimensions reduïdes però a mesura que augmenten les variables i restriccions això es fa impossible. Així que s'han desenvolupat metodologies que permeten explorar de manera més eficient que la mera enumeració del conjunt de solucions possibles. Part d'aquestes metodologies utilitzen la lògica del *branch and bound*, i estan incorporades a la majoria de programes informàtics que resolen models lineals.

Molts dels problemes d'optimització, en què la combinatòria juga un paper important admeten algorismes matemàtics exactes però ineficients en funció del temps. En el seu lloc s'utilitzen heurístiques que no garanteixen l'òptim però sí un valor proper a aquest,

sent eficients en funció del temps. Un d'aquests mètodes és el *Corridor Method*, basat en recerca local amb un solució inicial obtinguda mitjançant la relaxació.

Per al desenvolupament experimental del projecte s'ha utilitzat el programari especialitzat d'ILOG. Aquest programari utilitza dos programes que es connecten entre si: OPL i CPLEX 12.2.

CPLEX 12.2: Motor de resolució, executa el codi desenvolupat en l'OPL i resol el model.

OPL: En aquest programari s'escriu, mitjançant llenguatge de programació, el programa matemàtic lineal. És l'input i l'output per a l'usuari, en ell es visualitza tant l'entrada com la sortida del model.

6. Modelització matemàtica del sistema

A continuació es descriuen les consideracions sobre el disseny general del projecte d'electrificació que s'han tingut en compte en aquest treball, i es presenta la formulació matemàtica del problema amb el tipus de variable i les opcions tecnològiques considerades.

6.1 Consideracions de disseny

En aquest apartat es presenta les diferents consideracions i limitacions sobre un sistema general que es tindrà en compte en aquest projecte.

6.1.1 Avaluació del recurs eòlic

Per definir el recurs eòlic s'escull l'època de menor recurs eòlic, si es satisfà el subministrament d'energia en aquesta època el assegurarem la resta de l'any. Per a la modelització s'escull les dades d'aquesta època, registrats en el anemòmetre i es determina el recurs eòlic en cada punt de la comunitat mitjançant un programari, obtenint el mapa de vent de l'època de l'any més desfavorable. Amb el mateix programari, a partir d'aquestes dades s'extrapola l'energia generada en cada punt amb els diferents tipus d'aerogenerador. En treballar amb mitjanes d'èpoques no podem garantir el subministrament en períodes més curts, però si podem dir que ho garantirem durant totes les èpoques de l'any, considerant com època de l'any un període de temps en dies determinat pel modalitzador. Quan a més curt sigui aquest període de temps la probabilitat de garantir el servei cada instant de temps augmentarà. L'energia produïda per un aerogenerador depèn del model concret de màquina instal·lat a una certa alçada. El mateix model de màquina instal·lat a una alçada diferent es considera un tipus de aerogenerador diferent, ja que produeix una quantitat d'energia diferent.

6.1.2 Avaluació del recurs solar

Per a la selecció del recurs solar, com es fa amb el recurs eòlic, s'escull l'època de menor recurs solar per assegurar el subministrament la resta d'èpoques. Les dades de radiació solar s'obtenen de bases de dades publicades, on s'especifica les hores de radiació pic de la zona d'estudi. Tots els punts d'una comunitat té el mateix recurs solar.

6.1.3 Esquema i disseny de la micro-xarxa

La distribució d'electricitat des de les bateries als punts de consum es realitza en corrent altern monofàsica a la tensió de consum, considerant la tensió de consum entre dos valors estimats pel modalitzador en Volts. Abans de definir les consideracions es defineixen els tipus de punts que pertanyen al model:

- 1) Punts de consum: Són aquells que demanen tant energia com a potència.
- 2) Punts de generació: Són aquells que tenen la capacitat de generar energia, o el que és el mateix en els quals es permet col·locar aerogeneradors o panells solars.

Tots els punts de consum es consideren punts de generació. A més d'aquests s'inclouen diferents punts del terreny per aprofitar punts amb un alt recurs energètic, els que es diran de no consum. Per al disseny de la micro-xarxa s'han realitzat una sèrie de consideracions per a la simplificació del model.

Es limiten les connexions entre punts: Un punt de no consum només pot tenir conductors de sortida, i que aquests vagin a punts de consum, determinant una estructura radial per la xarxa.

Es limita la longitud màxima del conductor que uneix dos punts d'una microxarxa encara que no es limita la longitud màxima d'una micro-xarxa. Aquesta longitud es determina en funció de la situació geogràfica dels punts de consum i del mapa de vent de la comunitat. Per comunitats amb una dispersió elevada la longitud serà major. Si hi ha punts de consums aïllats amb un recurs eòlic baix és necessari que aquest punt pugui unir-se o tingui la possibilitat de fer-ho, per això aquesta longitud màxima no ha de limitar les seves unions.

6.1.4 Pèrdues en la instal·lació

Als sistemes microeòlics es produeixen diferents tipus de pèrdues i es poden dividir en:

- a) Pèrdues a l'inversor: Com ja s'ha comentat anteriorment l'inversor té un rendiment baix i sobretot sinó treballa a la seva potència de treball. Es considera un rendiment constant per a tot tipus d'inversors, considerant així les pèrdues de l'inversor constant i que afecten tots els usuaris per igual.
- b) Pèrdues als conductors: De la mateixa importància son les pèrdues als conductors produïdes per la caiguda de tensió entre punts. Quan dos punts estan units per un conductor hi ha una pèrdua d'energia al conductor. Per tots els punts que pertanyen a una micro-xarxa es considerarà una caiguda de t_{max} . D'aquesta manera es sobrevaloren les pèrdues a la micro-xarxa, sent molt restrictiu.
- c) Pèrdues en les bateries: Per les bateries també es considera un rendiment constant per tot tipus de bateries utilitzades i que afecta d'igual manera a tots els usuaris.
- d) Pèrdues de potència: Les pèrdues de potèncien es produeixen per la caiguda de tensió entre dos punts.
- e) Pèrdues als conductors: Aquestes pèrdues només es tindran en compte en aquells punts de consum que pertanyin a una micro-xarxa. De la mateixa manera que en les pèrdues d'energia als conductors, es considera la caiguda màxima admissible per tots els punts de la microxarxa sobrevalorant així les pèrdues de potència existents.

6.1.5 Capacitat de les bateries

L'energia s'emmagatzema en bateries situades en el mateix punt de generació. La capacitat mínima de les bateries ve determinada per la demanda dels punts de consum als quals proveeix, per l'autonomia requerida (nombre de dies sense proveïment a cobrir) i factor de descàrrega de les bateries.

S'assumeix que tots els punts de consum requereixen els mateixos dies d'autonomia. Si algun punt requerís més temps d'autonomia, per exemple un centre de salut, aquest es complementaria amb un sistema de suport individual, per exemple un grup dièsel. Aquesta possibilitat es tractaria una vegada resolt el model sense afectar la seva validesa. Es considera que tot tipus de bateria tenen el mateix factor de descàrrega.

6.2 Formulació matemàtica plantejada

En aquest apartat es presenta de manera detallada el model de PLEM utilitzat. Inicialment es presenten els paràmetres i a continuació, es descriu el model per desenvolupar el projecte híbrids (solar i eòlica).

6.2.1 Paràmetres del model de PLEM

El model que s'usarà i que es presenta a continuació està basat en el de *Ferrer-Martí et al.* (2012). És l'únic model conegut que resol el projecte d'electrificació rural i que es pretenem resoldre en aquest treball. *Ferrer-Martí* ha desenvolupat un model de PLEM d'electrificació rural que permet combinar microxarxes i generadors aïllats, i en el qual la generació pot ser tant eòlica com solar, que té en consideració els costos d'instal·lació de tots els elements del sistema, i que incorpora bateries i mesuradors d'energia consumida en els punts de consum de les microxarxes. Començarem, doncs, explicant aquest model matemàtic sobre el qual es desenvolupa la heurística del treball.

El model consta de les dades d'entrada que caracteritzen el problema; les variables del model; la funció objectiu i les restriccions.

Dades

Els paràmetres són els valors constants del model que el caracteritzen per diferenciar-ho de la resta de problemes del mateix tipus.

A continuació es llisten aquestes dades:.

Referents a la demanda:

D , Conjunt de punts de consum (domicilis, centres de salut, escoles).

P , Conjunt de punts de possible ubicació d'aerogeneradors (punts de consum i que coincideixen amb el conjunt D).

L_{pd} , Distància [m] entre el punt p i al punt de consum d ; $p \in P$; $d \in D$;

Q_p , Conjunt de punts d amb què un punt p pot unir-se directament amb un conductor; $p \in P$; $d \in D$; $p \neq d$.

PD_d , ED_d , Demanda de potència [W] i energia [Wh/dia] del punt de consum d ; respectivament $d \in D$.

FS , VB , Factor de simultaneïtat i temps d'autonomia que han de cobrir les bateries [dies], respectivament.

Referents a la acumulació:

B, NB , Tipus de bateries y número màxim de bateries d'un tipus que es poden instal·lar en un mateix punt respectivament.

DB , factor de descàrrega de les bateries [%].

CB_b , EB_b , Cost [\$] y capacitat equivalent [Wh] d'una bateria del tipus, respectivament. $b = 1, \dots, B$.

Referents a la definició de la xarxa:

C , Tipus de conductores

CC_c , Cost [€/m] del conductor del tipus c , inclòs el cost d'infraestructura, respectivament; $c = 1, \dots, C$.

RC_c, IC_c , Resistència [Ω /m] i intensitat [A] màxima admissible del conductor tipus c , respectivament $c = 1, \dots, C$.

V_n, V_{min}, V_{max} , Voltatge nominal, mínim y màxim a satisfer [v], respectivament.

cdt_{max} , Caiguda de tensió màxima permesa [%] $= \frac{V_{max} - V_{min}}{VN}$

η_c , Rendiment per caiguda de tensió [%] $\max \eta_c = 1 - cdt_{max}$.

Dades referents als altres equips:

I, NI , Tipus d'inversors i nombre màxim d'inversors d'un tipus que es poden instal·lar en un mateix punt, respectivament.

CI_i, PI_i , Cost [\$] i potència màxima [W] d'un inversor de tipus i , respectivament; $i = 1, \dots, I$.

CM , Cost d'un mesurador [\$].

hb, hi , Rendiment [%] de les bateries i dels inversors, respectivament.

Dades referents a la de generació eòlica.

A, NA , Tipus d'aerogeneradors i nombre màxim d'aerogeneradors que es poden instal·lar en un mateix punt, respectivament.

EAp_a , Energia generada [Wh/dia] per un aerogenerador situat en el punt p del tipus a ; $p \in P$; $a = 1, \dots, A$.

CA_a, PA_a , Cost [\$] y potència màxima [W] d'un aerogenerador del tipus a , respectivament; $a = 1, \dots, A$.

Dades referents a la generació solar.

S, NS , Tipus de panells i nombre màxim de panells que se poden instal·lar en un mateix punt, respectivament.

ES_s , Energia generada [Wh/dia] per un panell tipus s ; $s = 1, \dots, S$

CS_s, PS_s , Cost [\$] y potència màxima [W] d'un panell del tipus s , respectivament; $s = 1, \dots, S$

Z , Tipus de reguladores solars.

CZ_z, PZ_z , Cost [\$], potència màxima [W] de un regulador solar del tipus z , respectivament; $z = 1, \dots, Z$

Variables.

A continuació es presenten les variables de decisió del model:

x_p , Variable binària que indica si en el punt p s'instal·la algun aerogenerador. Pren el valor 1 en caso afirmatiu y valor 0 en caso contrari; $p \in P$

xa_{pa} , Variable entera que indica el nombre d'aerogeneradors que s'instal·len en el punt p del tipus a ; $p \in P$; $a = 1, \dots, A$

xb_{pb} , Variable entera que indica el nombre de bateries que s'instal·len del tipus b en el punt p ; $p \in P$; $b = 1, \dots, B$

xi_{pi} , Variable entera que indica el número de inversores que s'instal·len del tipus i en el punt p ; $p \in P$; $i = 1, \dots, I$

xr_{spz} , Variable entera que indica el nombre de reguladores solars que s'instal·len del tipus z en el punt p ; $p \in P$; $r = 1, \dots, Z$

xc_{pdc} , Variable binària que indica la unió dels punts p i d amb conductor tipus c

Pren valor 1 en caso afirmatiu, 0 en cas contrari; $p \in P$; $d \in Q_p$; $c = 1, \dots, C$

x_{cpd} , Variable binària que indica l'existència de conductor entre dos punts, independentment de si el conductor és d'un tipus o d'un altre. Pren el valor 1 en el cas afirmatiu, 0 en el cas contrari; $p \in P$; $d \in Q_p$.

f_{epd} , Variable real indica el flux d'energia [Wh/dia] entre els punts p i d ; $p \in P$; $d \in Q_p$.

f_{ppd} , Variable real indica el flux de potència [W] entre els punts p i d ; $p \in P$; $d \in Q_p$.

v_p , Variable real indica la tensió [v] en el punt p ; $v_p \in [V_{min}, V_{max}]$; $p \in P$.

x_{md} , Variable binària que indica si s'instal·la un mesurador en el punt d . Pren el valor 1 en cas afirmatiu, 0 en cas contrari; $d \in D$.

• Funció objectiu

La funció objectiu minimitza el cost de la Inversió inicial considerant tots els equips: aerogeneradors, panells, conductors, bateries, inversors, reguladors y mediadors.

$$\begin{aligned}
 [MIN]Z = & \sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A CA_a x_{a_{pa}} + \sum_{p=1}^P \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} CC_c x_{c_{pdc}} + \sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B CB_b x_{b_{pb}} + \sum_{i=1}^I CI_i x_{i_{pi}} + \\
 & + \sum_{p=1}^P CM x_{m_p} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S CS_s x_{s_{ps}} + \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z CZ_z x_{z_{pz}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

• Les restriccions

– Generació i emmagatzemament d'energia

Les restriccions 2 i 3 limiten el nombre d'aerogeneradors en un mateix punt i determinen que no hi hagi generadors si el punt no és de generació.

$$\sum_{a=1}^A x_{a_{pa}} \leq NA x_p \quad (p \in P) \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^S x_{s_{ps}} \leq NS x_p \quad (p \in P) \quad (3)$$

La restricció 4 imposa que almenys hi hagi un aerogenerador o un generador solar a cada punt si x_p és igual a 1.

$$\sum_{a=1}^A xa_{pa} + \sum_{s=1}^S xs_{ps} \geq x_p \quad (p \in P) \quad (4)$$

La restricció 5 imposa les condicions de conservació de l'energia i la satisfacció de la demanda d'energia.

$$\sum_{d|p \in Q_p} fe_{dp} + \sum_{a=1}^A EA_{pa} xa_{pa} + \sum_{s=1}^S ES_{ps} xs_{ps} \geq \frac{ED_p}{\eta_b \eta_i} \left(\frac{1}{\eta_c} + \left(1 - \frac{1}{\eta_c} \right) x_p \right) + \sum_{q \in Q_p} fe_{pq} \quad (p \in P) \quad (5)$$

La restricció 6 són anàlogues a les restriccions 5 per a la conservació i satisfacció de la demanda de potència i és on es determina el tipus i la quantitat d'inversors a instal·lar.

$$\sum_{d|p \in Q_p} fp_{dp} + \sum_{i=1}^I PI_i xi_{pi} \geq FS PD_p \left(\frac{1}{\eta_c} + \left(1 - \frac{1}{\eta_c} \right) x_p \right) + \sum_{q \in Q_p} fp_{pq} \quad (p \in P) \quad (6)$$

El càlcul de la capacitat de les bateries depenent de la demanda, de l'autonomia i de la descàrrega permesa es realitza en les restriccions 7. També imposen que hi hagi bateries si hi ha generació al punt p.

$$\sum_{b=1}^B EB_b xb_{pb} + \left(\frac{VB}{DB} \sum_{j=1}^P \frac{ED_j}{\eta_b \eta_i \eta_c} \right) (1 - x_p) \geq \left(\frac{VB}{DB} \sum_{q \in Q_p} fe_{pq} ED_p \right) \quad (p \in P) \quad (7)$$

- Microxarxa

Les restriccions 8 i 9 relacionen els fluxos d'energia i potència respectivament amb l'existència de conductors.

$$fe_{pd} \leq \left(\sum_{j=1}^P \frac{ED_j}{\eta_b \eta_i \eta_c} \right) \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \quad (p \in P; d \in Q_p) \quad (8)$$

$$fp_{pd} \leq \left(\sum_{j=1}^P \frac{PD_j}{\eta_c} \right) \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \quad (p \in P; d \in Q_p) \quad (9)$$

La restricció 10 es força determina la distribució radial de la microxarxa.

$$\sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C x_{c_{dpc}} + x_p \leq 1 \quad (p \in P) \quad (10)$$

La restricció 11 calcula i limita la caiguda de tensió entre dos punts considerant el tipus de conductor que els uneix.

$$v_p - v_d \geq \frac{L_{pd} RC_c f_{p_{pd}}}{V_n} - (V_{\max} - V_{\min}) (1 - x_{c_{pdc}}) \quad (p \in P; d \in Q_p : c = 1, \dots, C) \quad (11)$$

La restricció 12 defineix que el corrent que circula per un conductor ha de ser menor que la màxima intensitat de corrent admissible segons el tipus de conductor instal·lat.

$$\frac{f_{p_{pd}}}{V_n} - \left(\sum_{j=1}^P \frac{PD_j}{V_{\min} \eta_c} \right) (1 - x_{c_{pdc}}) \leq IC_c \quad (p \in P; d \in Q_p : c = 1, \dots, C) \quad (12)$$

- Equipament

La restricció 13 defineix el nombre de reguladors solars depenent de la potència dels generadors solars corresponents.

$$\sum_{z=1}^Z PZ_z x_{rs_{pz}} \geq \sum_{a=1}^A PS_a x_{ps} \quad (p \in P) \quad (13)$$

La restricció 14 determina que els inversors només es poden col·locar on hi ha generació, i que el seu nombre no pot superar un nombre màxim establert.

$$x_{i_{pi}} \leq NI x_p \quad (p \in P) \quad (14)$$

Les restriccions 15 i 16 estableixen la col·locació de mesuradors de consum d'electricitat en els punts de consum alimentats per una microxarxa (no pas en els punts de consum aïllats).

$$\sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C x_{c_{dpc}} \leq (|P| - 1) x_{m_p} \quad (p \in P) \quad (15)$$

$$\sum_{d|p \in Q_p} \sum_{c=1}^C xc_{dpc} \leq xm_p \quad (p \in P) \quad (16)$$

- **Auxiliars:**

La equació 17 defineix unes variables auxiliars que són 1 si hi ha conductor entre els punts p i d i 0 si no n'hi ha.

$$xcc_{pd} = \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \quad (p \in P; d \in Q_p) \quad (17)$$

7. Solució del model mitjançant *Corridor Method*

7.1 Optimització local amb el *Corridor Method*

Conceptualment, hi ha dues maneres de descriure el *Corridor Method*. La primera centra l'atenció en el fet que el desplegament de seqüències de moviments elementals admissibles es només una manera de generar grans veïnats que es poden cercar fàcilment per mètodes d'optimització existents.

Es a dir, el *Corridor Method* es pot descriure com un mètode de cerca local iterativa en que $N(X)$ es un conjunt relativament gran (comparat amb veïnats basats en un sol moviment) les estructures i les mides del qual son compatibles amb el mètode d'optimització que opera sobre ell, M (que es el mètode de resolució que desenvolupem a través de la programació matemàtica, PLEM, realitzada sobre CPLEX.)

Una altra manera de descriure el *Corridor Method* es el següent: el problema $P(X)$ pot ser fàcilment resolt per alguns mètodes d'optimització si X no es massa gran. Però ara suposem que el mètode M pot resoldre el problema $P(Y)$, però no per al conjunt de decisió ($Y=X$) que es massa gran, sinó que ho pot fer per espais de decisió que son molt més petits que el propi X . En aquest cas podríem provar de solucionar el problema X a partir d'una cerca local iterativa, però no de forma exacta, però subjecta als recursos de temps de CPU i memòria, el mètode M pot resoldre el problema $P(X)$, llavors no cal aplicar aquest mètode de cerca local iterativa, en aquest cas M es pot aplicar directament al problema $P(X)$.

Tot això implica que el Corridor Method està dissenyat per a situacions on el mètode M no es pot aplicar directament sobre $P(X)$ perquè X es massa gros, però pot ser aplicat al problema $P(Y)$ si el conjunt Y es molt més petit \leq que X . El preu que es paga és que, en general, no hi ha garantia que el procediment iteratiu ens proporcioni una solució òptima del problema $P(x)$. Es per això que aquest mètode es una heurística.

7.2 Espais de decisió del *Corridor Method*

A continuació es presenten les dues maneres de definir els espais de decisió, o veïnat, Y que són molt més petits que el conjunt de decisió X sobre el problema $P(X)$ d'electrificació rural:

Donada una solució prèvia x , es pot definir un veïnat com un corredor al voltant del nombre de generadors. Es faran dues propostes del *Corridor Method*:

a) Per cada tipus de generador i en cada punt $p=1,\dots,P$

$$\text{Max}(0, x_{apa} - R) \leq x_{apa} \leq x_{apa} + R, p = 1..P, a = 1..A$$

$$\text{Max}(0, x_{sps} - R) \leq x_{sps} \leq x_{sps} + R, p = 1..P, s = 1..S$$

Amb $R \in \mathbb{Z}$

En altres paraules: El veïnat es defineix dient el nombre de generadors (aerogeneradors o panells solars) i per a cadascun dels tipus ha de ser en un rang al voltant de la solució trobada d'inici (la solució prèvia x).

Exemple.

Suposem dos punts. En el primer punt hi ha 3 aerogeneradors del tipus 1 i n'hi ha 1 de tipus 2, i 2 generadors solars del tipus 1 i cap del tipus 2,

$$x_{a11}=3 \quad x_{a12}=1,$$

$$x_{a11}=2 \quad x_{a12}=0,$$

En l'altre punt hi ha 4 aerogeneradors del tipus 1 i no hi ha cap de tipus 2, i 3 generadors solars del tipus 1 i 4 del tipus 2,

$$x_{a21}=4 \quad x_{a22}=0,$$

$$x_{a21}=3 \quad x_{a22}=4,$$

Si llavors el rang del corredor el fem $R=1$, el veïnat quedarà:

Punt 1

$$2 \leq x_{a11} \leq 4 \quad 0 \leq x_{a12} \leq 2,$$

$$1 \leq x_{a11} \leq 3 \quad 0 \leq x_{a12} \leq 1,$$

Punt 2

$$3 \leq x_{a21} \leq 5 \quad 0 \leq x_{a22} \leq 1,$$

$$2 \leq x_{a21} \leq 4 \quad 3 \leq x_{a22} \leq 5,$$

b) Per al nombre de generador a cada punt $p=1, \dots, P$

$$\text{Max} (0, \sum_{a=1}^S x_a - R) \leq x_a \leq (\sum_{a=1}^S x_a + R, p = 1..P)$$

$$\text{Max} (0, \sum_{a=1}^S x_s - R) \leq x_s \leq (\sum_{a=1}^S x_s + R, p = 1..P)$$

Amb $R \in \mathbb{Z}$

Suposem el mateix exemple anterior:

$$x_{a11}=3 \quad x_{a12}=1,$$

$$x_{a11}=2 \quad x_{a12}=0,$$

i

$$x_{a21}=4 \quad x_{a22}=0,$$

$$x_{a21}=3 \quad x_{a22}=4,$$

Si llavors el rang del corredor el fem $R=1$, el veïnat quedarà:

Punt 1

$$3 \leq x_{a11} + x_{a12} \leq 5$$

$$1 \leq x_{a11} + x_{a12} \leq 3$$

Punt 2

$$3 \leq x_{a11} + x_{a12} \leq 5$$

$$6 \leq x_{a11} + x_{a12} \leq 8$$

Un cop definit el veïnat es podrà aplicar un procediment d'optimització local. Probablement cada iteració sigui massa lenta per ser pràctic. Es limita el temps de resolució a un t_{\max} , amb la qual cosa en comptes de tornar el millor veí (exploració exhaustiva) tornaria un veí millor o igual de bo que la solució actual de partida (exploració no exhaustiva).

No obstant, ja que les experimentacions requereixen un temps important les farem només amb el mètode a.

7.3. Passos principals de l'algorisme.

A continuació s'explica com s'encararà l'algorisme del *Corridor Method*, es plantejaran els següents 4 passos fonamentals.

Pas 1. Es tracta de partir d'una primera solució x inicial trobada per un mètode de relaxació, l'anomenarem solució factible (podria ser que no fos la optima).

Pas 2. Després es defineix un veïnat partint de x_a i x_s a través de les restriccions incorporades pel *Corridor Method*, a partir de aquest veïnat es definirà el corredor.

Pas 3. Se soluciona el model de PLEM per aquest veïnat de x_a i x_s trobant la solució optima dins d'aquest veïnat. $x_{a\text{òptim}}$ i $x_{s\text{òptim}}$

Pas 4. Es torna al punt 1 fent que $x_{a\text{òptim}} = x_a$ i $x_{s\text{òptim}} = x_s$ fins que la solució nova ja no millori la que teníem en l'anterior iteració, en aquest cas s'atura.

7.4. Seqüències detallades de l'algorisme

Primer de tot l'algorisme busca una solució inicial, aquest serà el resultat de generà una solució entre el model *varent.mod* (model original amb les variables sense relaxar) més l'exemplar, aquest resultat es guardaran a *exemplar_var_ent.txt* i *exemplar_Z_ent.txt* per poder al final de tot comparar amb la solució *Corridor* i comprovar si l'algorisme realitza la seva funció, que serà la d'optimitzar la solució en un temps raonable, tot

seguit es busca una altra solució, aquest cop amb un model amb totes les variables relaxades (no enteres) a excepció de x_s i x_a , el model s'anomena *varentTR.mod*, les variables es guardaran com a x_{ss} i x_{aa} , i s'utilitzaran per fer el següent pas, que serà agafar l'exemplar en curs i fixar aquestes variables, d'aquesta manera es defineix el veïnat o el que s'anomenarà corredor, aquest arxiu l'anomenarà *Exemplar_fix.dat*, seguidament es genera una solució amb *Exemplar_fix.dat* i *varent*, model amb les variables mixtes, d'aquesta manera poden saber el valor real de Z , tot seguit es crea una variable on es guardarà el millor resultat de Z a les diferents iteracions, que serà Z_{fin} , i amb el qual l'algorisme anirà comparant els diferents resultats que anirà trobant, s'inicialitza amb un valor alt, per exemple: 999999999999.

Un cop definit el corredor es passa a l'algorisme *Corridor method*, Es busca una solució utilitzant el model *varent_corri_”Rang”.mod* que es el model amb totes les variables enteres a més de les restriccions Corridor, aquestes restriccions per les experimentacions s'han utilitzat Rang=1 i Rang=2, aquest rang es el que se li permet a la variable moure's a dintre del corredor fixat inicialment, tot seguit s'inicialitzen el número màxim d'iteracions que es vol que faci el programa, es marca el temps max de recerca de la solució, el gap mínim al que ens donarà una solució, la memòria que es vol que el programa disposi per treballar, etc.

Un cop definit tot això, es passa a generar una primera solució. Si el programa no troba una solució, el programa sortirà dient que no s'ha trobat cap solució, i si el programa troba una solució, aquesta es guardarà a *exemplar_var_ite_n°.txt* i *exemplar_Z_ite_n°.txt* per tenir constància del conjunt de variables a cada iteració, tot seguit el programa compara *exemplar_Z_ite_n°.txt* amb Z_{fin} que es va definir anteriorment, si Z_{fin} es més petita que la solució en curs, el programa indicarà que no es millora la solució i sortirà del programa, si no es així, i la solució actual es millor que Z_{fin} , el valor de la Z actual passarà a ser la nova Z_{fin} a comparar, també es reescriuran les variables a l'arxiu *exemplar_fix.dat*, ja que aquestes seran diferents, d'aquesta manera es torna a definir un altre veïnat o corredor, s'incrementa en 1 unitat la iteració i continua el bucle, fins un màxim de iteracions establertes a l'inici.

7.5. Diagrama de flux de l'algorisme 1^a etapa

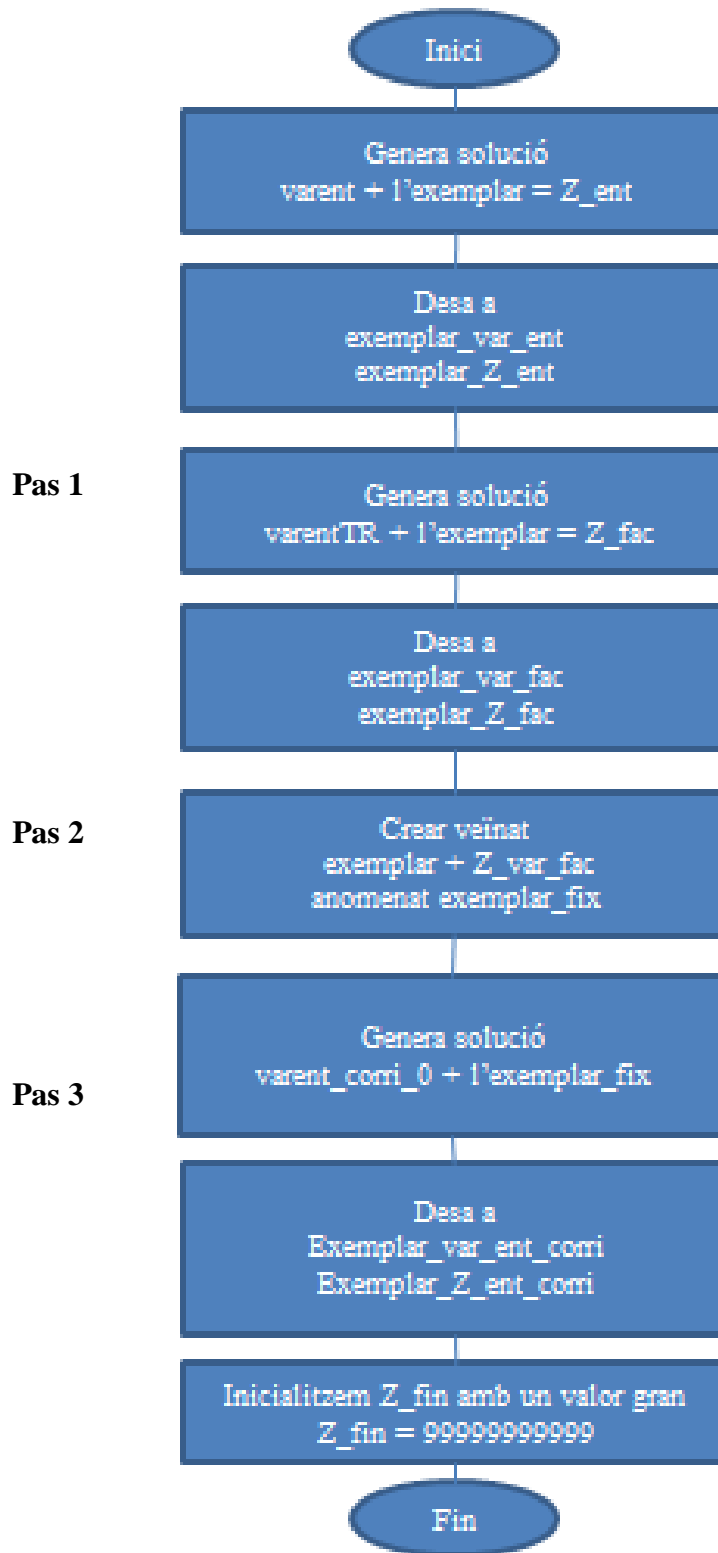


Figura 7.1 Diagrama flux 1^a etapa.

7.6. Diagrama de flux de l'algorisme 2^a etapa

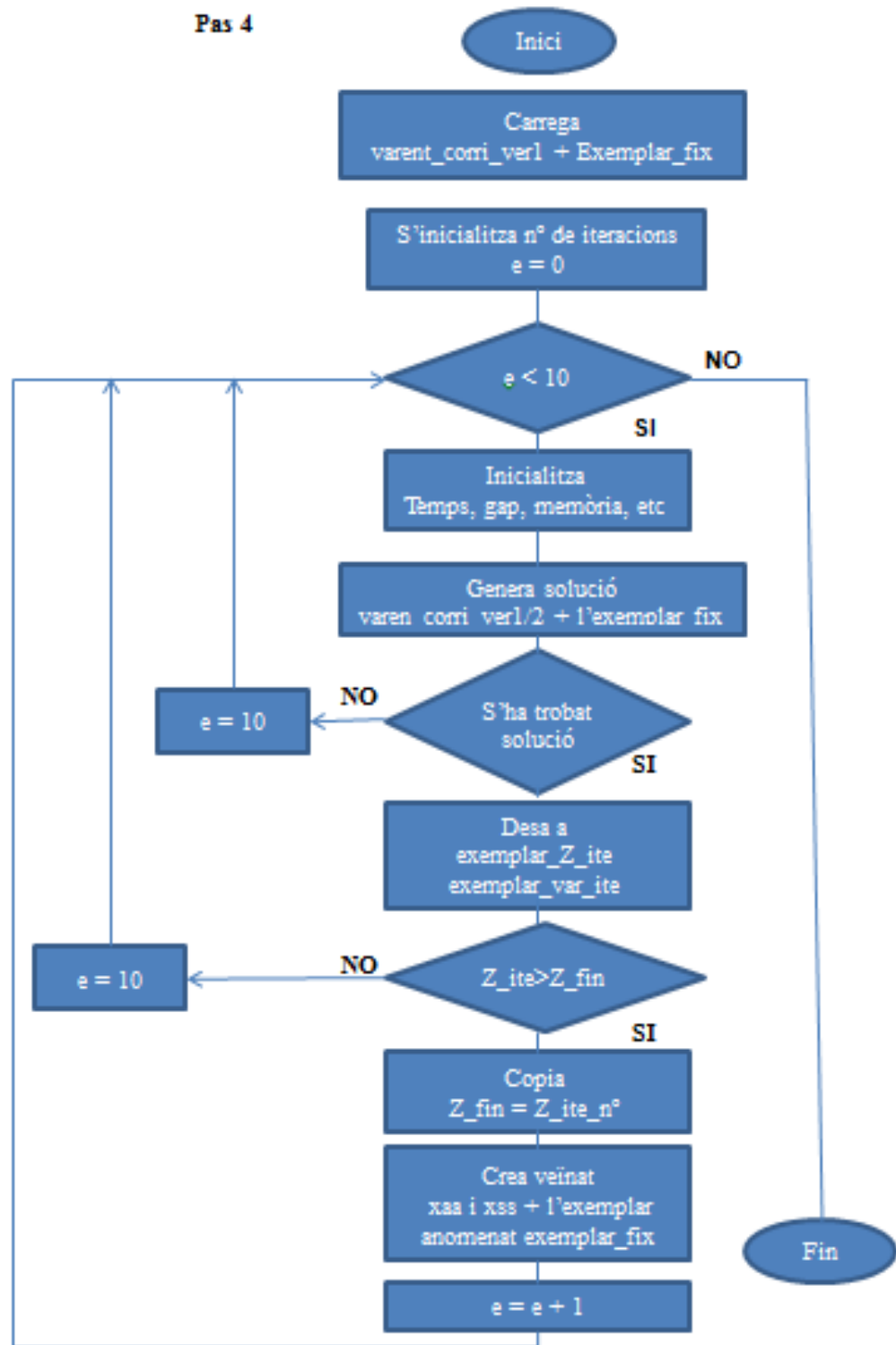


Figura 7.2 Diagrama flux 2^a etapa.

7.7 Codi d'algorisme per IBM ILOG CPLEX 12.2

```

execute      {
                function CrearData(m, f)
                {
                    f.writeln("xaa=" + m.xa + ";");
                    f.writeln("xss=" + m.xs + ";"); }
            }

main {var data_names = new Array(
      "C2_10_CONC050_DM_PE15_3");
      var data_names_b = new Array("varent_corri_ver2");
      var zfin;
      var e;
      zfin = 999999999999999;
      e=0
      while (e<10)
      {
          cplex.tiLim = 1000;
          cplex.epGap = 0.1;
          cplex.nodeFileInd = 3;
          cplex.treLim = 110000;
          cplex.workMem = 512;

          var basis = new IloOplCplexBasis();
          var source = new IloOplModelSource
          ("C:\\10_vivendes\\"+data_names_b[0]+".mod");

          var def = new IloOplModelDefinition(source);
          var time_o;
          var time_f;
          var fdat = new IloOplOutputFile
          ("C:\\10_vivendes\\resultats\\"+data_names[0]+"_var_cor.txt
          ");
          var fdat2 = new IloOplOutputFile
          ("C:\\10_vivendes\\resultats\\"+data_names[0]+"_var_ite"+e+".txt
          ");
          var ofile = new IloOplOutputFile
          ("C:\\10_vivendes\\resultats\\"+data_names[0]+"_Z_ite"+e+".txt"
          );
          var opl = new IloOplModel(def, cplex);
          var data = new IloOplDataSource
          ("C:\\10_vivendes\\resultats\\"+data_names[0]+"_fix_ini.dat");

          opl.addDataSource(data);
          opl.generate();
          basis.getBasis(cplex);
          time_o = ((new Date()).getTime()) / 1000.0;

          if(cplex.solve()){
              file.writeln("Resultat=" +
              cplex.getBestObjValue() + "/T="+time_f);
              CrearData(opl, fdat);
              CrearData(opl, fdat2);

              if(zfin>cplex.getObjValue()){
                  zfin=cplex.getObjValue();

                  var f = new IloOplInputFile();
                  f.open ("C:\\10_vivendes\\"+data_names[0]+".dat");
            }
          }
      }
}

```



```

var f1 = new IloOplInputFile();

f1.open("C:\\10_vivendes\\"+data_names[0]+"_var_cor.txt");
var f2 = new IloOplOutputFile();

f2.open("C:\\10_vivendes\\"+data_names[0]+"_fix_ini.dat");
if (f.isOpen){writeln("//f is open");
var s;
while (!f.eof){s=f.readline();f2.writeln(s);}
var s1;
while (!f1.eof){s1=f1.readline();f2.writeln(s1);}
f2.writeln(" ")
f.close();
f2.close();
}else {
writeln("f is closed");}
if (f.isOpen) writeln("f is open");
else writeln("f is closed");
e=e+1;
writeln ("e=",e);      writeln ("Z=",zfin);
time_f = (((new Date()).getTime())/1000.0)-time_o;
writeln(data_names[0]+"/iteració="+e+"/"+
"T="+time_f+"/"+cplex.getObjValue()+"/"+cplex.getBest
ObjValue()+"/"+basis.Ncols+"/"+basis.Nrows);
}else {
writeln("Z iteracio"+e+"="+cplex.getObjValue()
+">Z iteracio anterior="+zfin);
writeln("El programa finalitza");
e=10;
}
}else {
time_f = (((new Date()).getTime())/1000.0)-time_o;
writeln(data_names[0]+"/iteració="+e+"/"+
"T="+
time_f+"/"+cplex.getObjValue()+"/"+cplex.getBestObjValue()+"/"+b
asis.Ncols+"/"+basis.Nrows);
writeln("no s'ha trobat solució a la iteracio "+e);
writeln("El programa finalitza");
ofile.writeln("Resultat="+cplex.getBestObjValue()+
"/T="+time_f);
e=10;
}
fdat.close();
fdat2.close();
opl.endAll();
data.end();
}
ofile.close();
def.end();
source.end();
cplex.end();
}

```


8. Experiència computacional

Es genera mitjançant el solve d'IBM ILOG CPLEX12.2, un joc de dades a partir dels models i els diferents exemplars des dels més petits de 10 habitatges fins als de 90 habitatges cadascun d'ells en funció del nombre d'habitatges se'ls va limitar el temps des dels 300 segons dels més petits a 1 hora els més grans.

A continuació es mostra una taula de resultats amb uns exemplars de 10 vivendes

exemplar 10	solució entera	temps (s)	solució corredor			temps total (s)
			iteració 1	iteració 2	iteració 3	
C1_10_CONC050_DB_PE1_2.dat	15180	5	15180			13
C2_10_CONC025_DM_PE1_3.dat	21031	27	21031			80
C2_10_CONC025_DM_PE1_4.dat	21031	8	21031			28
C2_10_CONC050_DB_PE1_1.dat	15180	18	15180			32
C2_10_CONC050_DM_PE1_3.dat	21030	18	21030			32

Taula 8.1 Resultats de solucions enteres i solucions Corridor d'exemplars amb 10 vivendes.

Observacions: Es evident que per solucions amb exemplars amb poques vivendes el mètode Corridor no serveix, arriba a la mateixa solució que el mètode enter, però en un temps superior.

A continuació es detalla una de les experiències realitzades amb 20 vivendes.

En primer lloc es va escollir un exemplar “C1_20_CONC025_DB_PE1_1_bis.dat”, i es va executar l'arxiu oplrun “model30.bat” que contenia els quatre programes utilitzats, des de la carpeta “C:\ILOG\CPLEX_Studio_AcademicResearch122\opl\bin\x86_win32”, cal aclarir que oplrun es un arxiu executable .bat el qual utilitzem per poder executar seqüencialment els quatre programes que utilitzem per arribar a la solució corredor.

El primer dels programes que s'executa es el “*solucio_entera_20.mod*”, aquest ens proporciona utilitzant variables enteres i el model sense relaxar una solució Z_{min} , en un temps com es veu a la (figura 8.1) de 1.000 segons. Aquesta solució es busca per poder tenir una solució entera amb la qual comparar la solució corredor, i es guardarà a “*C1_20_CONC025_DB_PE1_1_bis_var_ent.txt*”

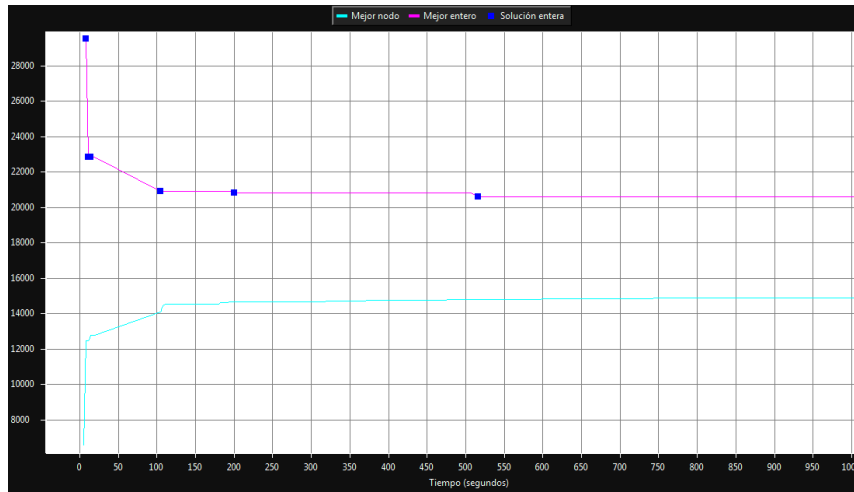


Figura 8.1 Gràfica del temps d'una solució entera de 20 vivendes

Tot seguit s'executa el programa “*solució_factible_20.mod*”, aquest utilitza un model amb totes les variables relaxades amb excepció del n° de panell solars “*xs*” i n° d'aerogeneradors “*xa*”, s'executa amb un temps de 200 segons (figura 8.2), donant una solució de Z_{fac} , que es guardarà a “*C1_20_CONC025_DB_PE1_1_bis_var_fac.txt*”

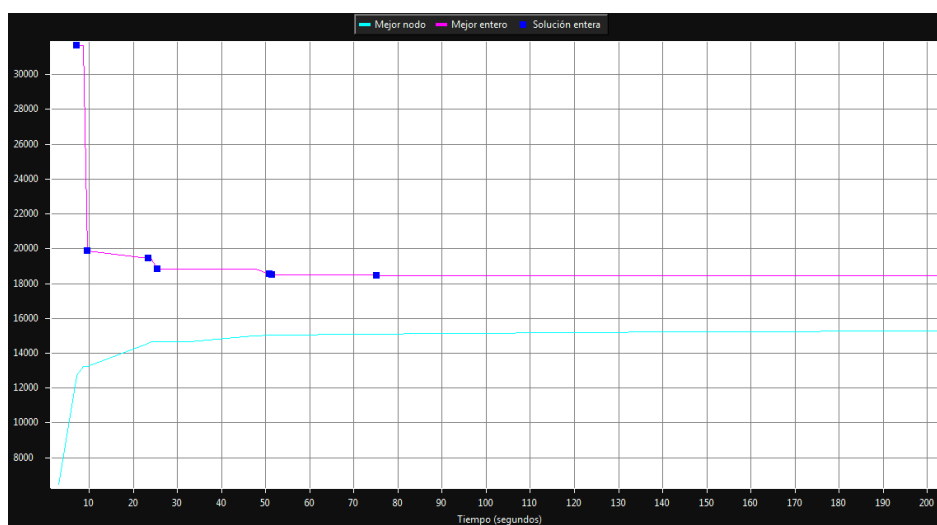


Figura 8.2 Gràfica del temps d'una solució factible de 20 vivendes

A continuació amb el tercer programa unim en un mateix arxiu, les variables *xss* i *xaa* generades pel programa anterior amb l'exemplar original, aquest es guardarà a "C1_20_CONC025_DB_PE1_1_bis_fix_ini.dat". D'aquesta manera fixem les variables al voltant d'on ens volem moure amb el *Corridor method*.

Amb l'exemplar anterior s'executa l'últim arxiu el "solucio_corridor_20.mod" aquest model conte les restriccions *Corridor Method*, també fixem el rang del corredor pel qual ens volem moure, en aquest cas Rang=2.

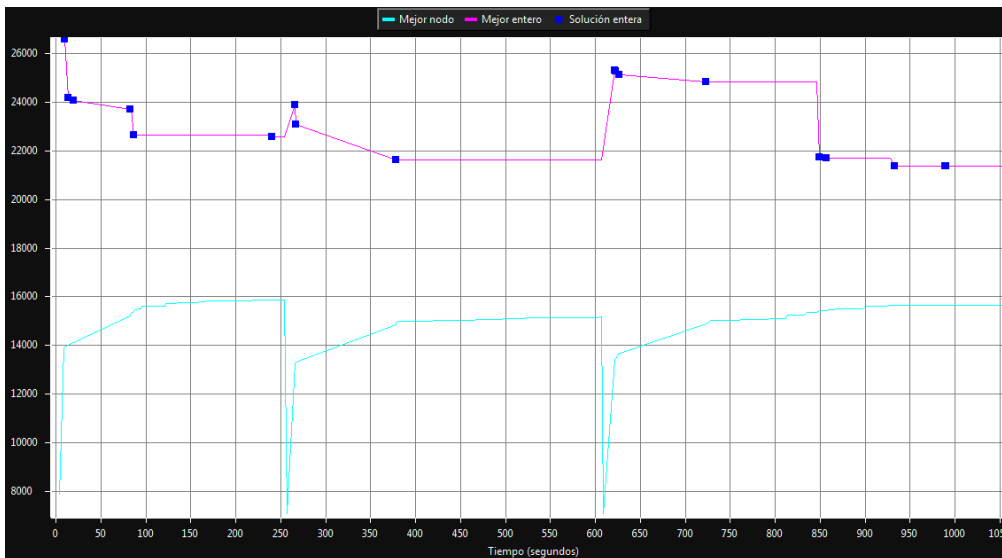


Figura 8.3 Gràfica solució Corridor amb 3 iteracions.

```

Registro de guiones  Conflicto Soluciones  Buscar  Relaxaciones  Problemas  Per
//f is open
f is closed
e=1
Z=15873.42037440304
C1_20_CONC025_DB_PE1_1_bis/iteració=1/T=250.1329998970032/15873.42037440304
//f is open
f is closed
e=2
Z=15171.79442881138
C1_20_CONC025_DB_PE1_1_bis/iteració=2/T=350.2009999752045/15171.79442881138
Z iteracio2=15662.29219965672>Z iteracio anterior=15171.79442881138
El programa finalitza

```

Figura 8.4 Resultats solució Corridor amb 3 iteracions.

exemplar 20	Solució entera	temps (s)	solució corredor			temps total (s)
			iteració 1	iteració 2	iteració 3	
C1_20_CONC050_DM_PE1_2.dat	42061	200	42061			200
C1_20_CONC025_DB_PE1_5.dat	30442	600	31460	30025		1000
C1_20_CONC025_DB_PE1_4.dat	28622	600	28622			600
C1_20_CONC025_DB_PE1_1.dat	20830	1000	20911	20759		1000
C1_20_CONC025_DB_PE1_1.dat	30360	200	30360			200

Taula 8.2 Resultats de solucions enteres i solucions Corridor d'exemplars amb 20 vivendes.

Observacions: En aquest cas la diferencia de temps continua sen desfavorable pel mètode Corridor, però en alguna cas millora la solució entera.

A continuació es mostren unes imatges d'una de les experiències realitzada amb 30 vivendes.

Exemplar: *C2_30_CONC050_DM_PE15_4.dat*

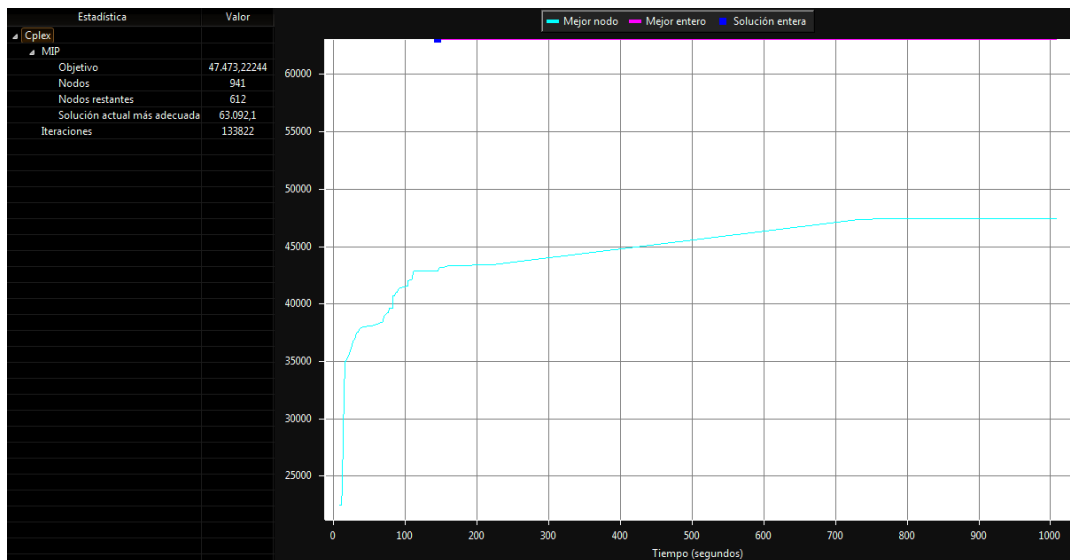


Figura 8.5 Gràfica del temps d'una solució entera de 30 vivendes

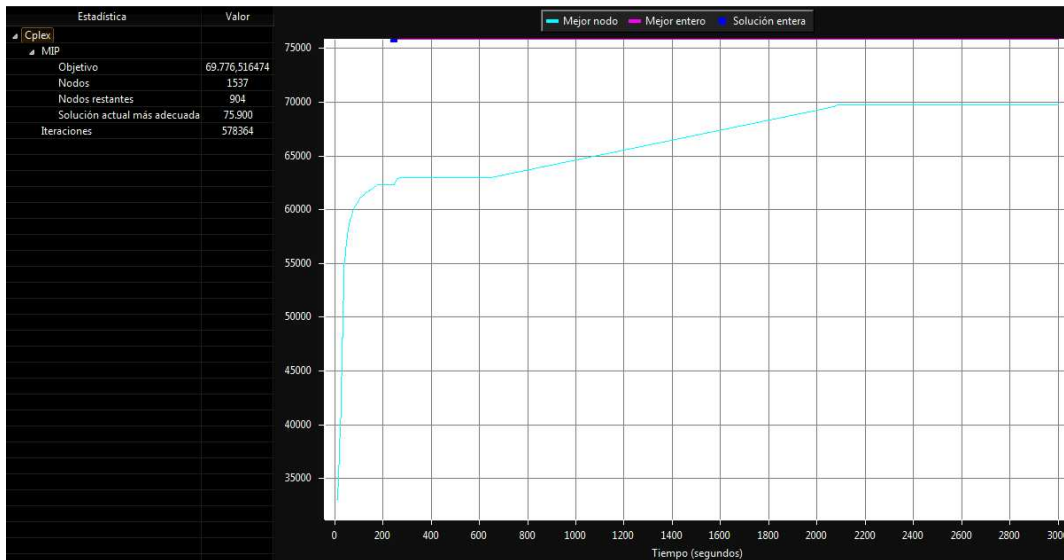


Figura 8.6 Grafica del temps d'una factible de 30 vivendes

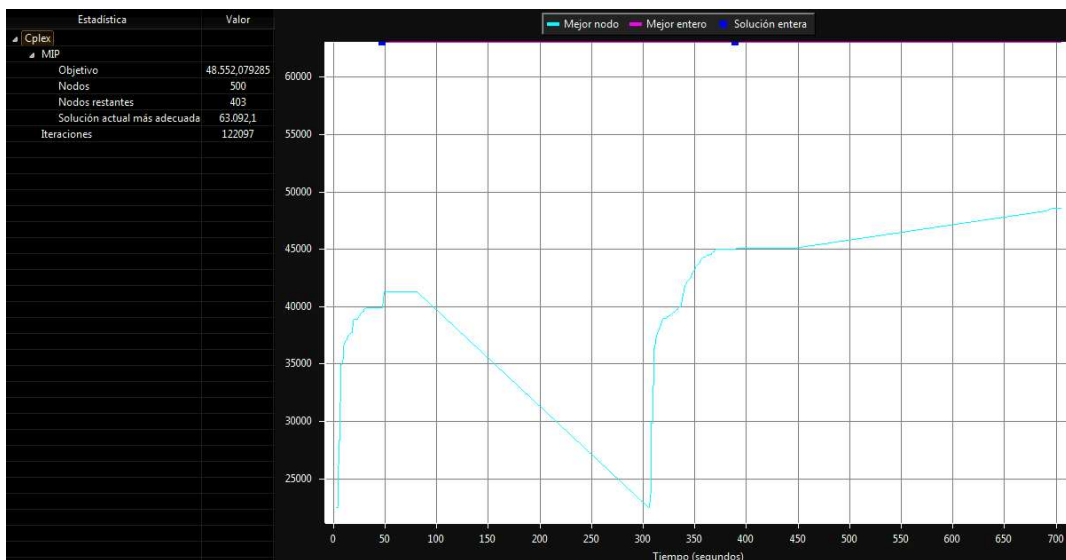


Figura 8.7 Grafica del temps solució corredor de 30 vivendes

exemplar 30	solució entera	temps (s)	solució corredor			temps total (s)
			iteració 1	iteració 2	iteració 3	
C1_30_CONC050_DB_PE15_1.dat	45540	1000	45540			800
C2_30_CONC050_DM_PE15_2.dat	59339	1000	63092			800
C2_30_CONC050_DM_PE15_3.dat	63052	1000	95900	63092		1200
C2_30_CONC050_DM_PE15_4.dat	63092	1000	63052			1200
C1_30_CONC050_DB_PE15_5.dat	43718	1000	45540	44304		1200

Taula 8.3 Resultats de solucions enteres i solucions Corridor d'exemplars amb 30 vivendes.

Observacions: En aquest cas la diferència de temps continua sen desfavorable pel mètode Corridor, en algun cas millora la solució entera i en alguns empitjora,.

A continuació es mostra una taula de resultats amb uns exemplars de 40 vivendes

exemplar 40	solució entera	temps (s)	solució corredor			temps total (s)
			iteració 1	iteració 2	iteració 3	
C1_40_CONC025_DB_PE1_1.dat	40443	1000	69878	47292	45581	2000
C1_40_CONC025_DB_PE15_2.dat	40161	1000	43864	43497	39363	2000
C2_40_CONC050_DM_PE15_3.dat	60942	1000	87877	85443	53903	2000
C2_40_CONC025_DB_PE15_4.dat	60720	1000	60720			500
C1_40_CONC025_DB_PE15_5.dat	64082	1000	60720			500
C1_40_CONC025_DM_PE1_4.dat	84122	1000	84122			500

Taula 8.4 Resultats de solucions enteres i solucions Corridor d'exemplars amb 40 vivendes.

Observacions: En aquest quant troba una solució igual a la primera es guanya en temps, però si ha de fer varies iteracions s'incrementa molt el temps de recerca.

A continuació es mostra una taula de resultats amb uns exemplars de 50 vivendes

exemplar 50	solució entera	temps (s)	iteració 1	iteració 2	iteració 3	temps total (s)
C1_V50_CONC050_DB_PE1_1.dat	57900	1000	60216			500
C1_V50_CONC025_DB_PE15_2.dat	57900	1000	57900			500
C2_V50_CONC025_DB_PE1_2.dat	60704	1000	60216			500
C2_V50_CONC050_DM_PE15_3.dat	65276	2000	66492	63791		1000

Taula 8.5 Resultats de solucions enteres i solucions Corridor d'exemplars amb 50 vivendes.

A continuació es mostra unes imatges d'una de les experiències realitzada amb 50 vivendes.

Exemplar: C2_50_CONC050_DM_PE15_4.dat

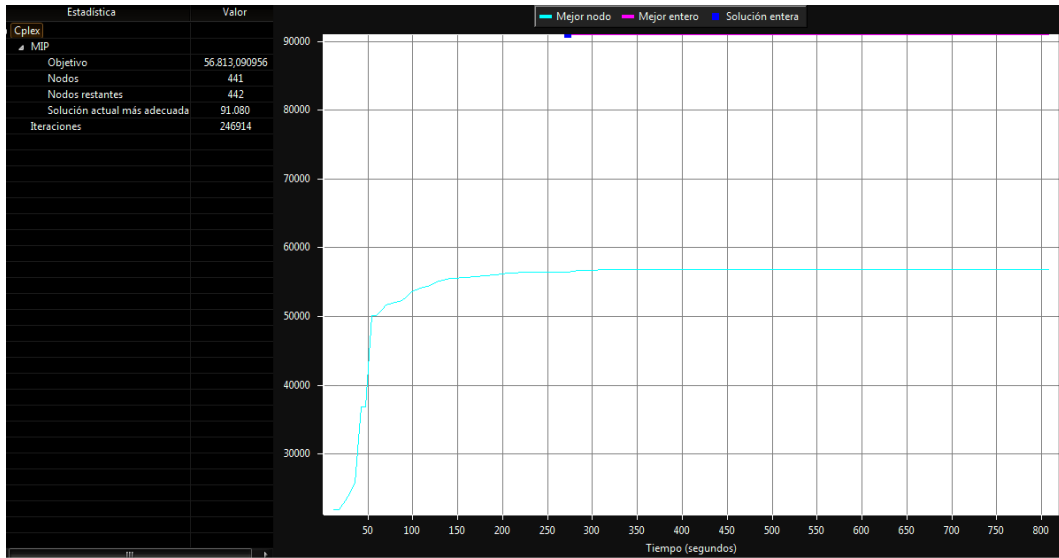


Figura 8.8 Grafica del temps d'una solució entera de 50 vivendes

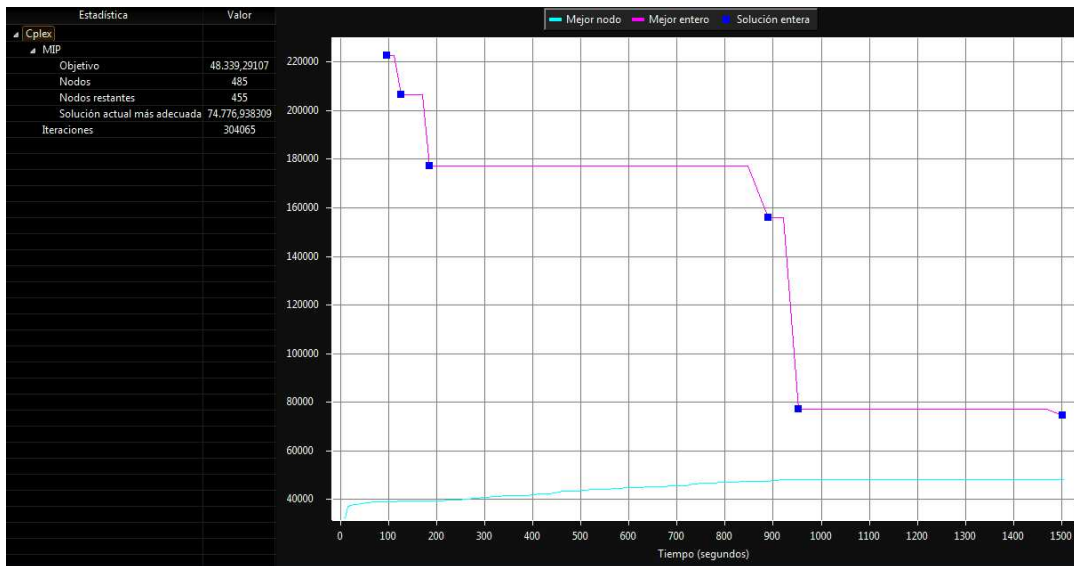


Figura 8.9 Grafica del temps d'una solució factible de 50 vivendes

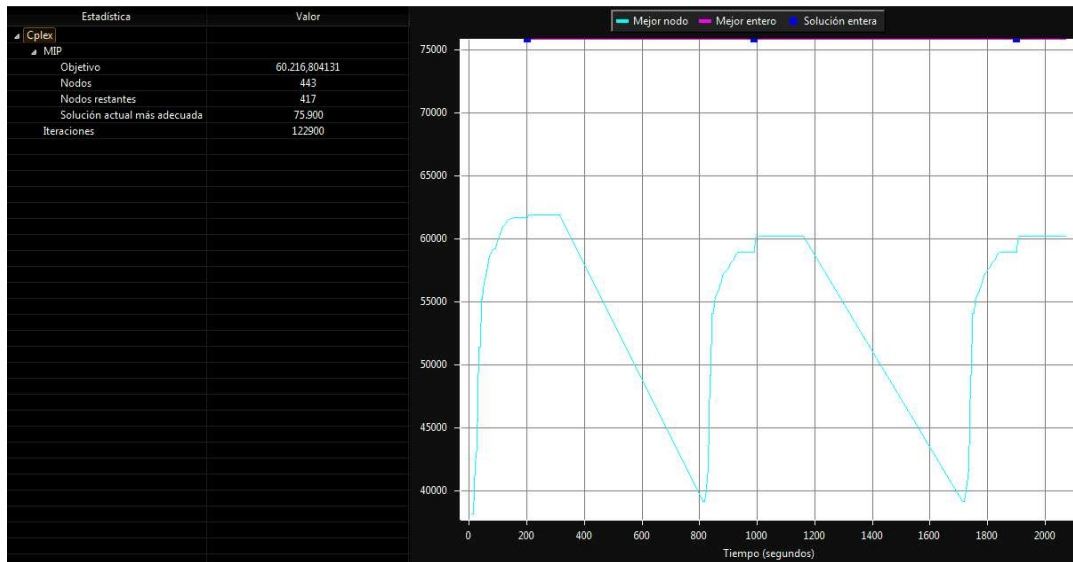


Figura 8.10 Gráfica del temps solució corredor de 50 vivendes

Observacions: S'observa que als exemplars que hi ha mes demanda d'energia per vivenda, es millora la solució i el temps de recerca, en canvi als altres no.

A continuació es mostren unes taules de resultats amb exemplars des de 60 a 90 vivendes.

exemplar 60	solució entera	temps (s)	solució corredor					temps total (s)
			iteració 1	iteració 2	iteració 3	iteració 4	iteració 5	
C1_V60_CONC025_DB_PE15_3.dat	91080	2000	91080					1000
C1_V60_CONC025_DM_PE1_5.dat	126184	3000	133885	127903	126744	126265	126184	5000
C2_V60_CONC050_DB_PE15_4.dat	91080	2000	92482	91161	91080			3000

Taula 8.6 Resultats de solucions enteres i solucions Corredor d'exemplars amb 60 vivendes.

exemplar 70	solució entera	temps (s)	solució corredor			temps total (s)
			iteració 1	iteració 2	iteració 3	
C1_V70_CONC025_DB_PE1_4.dat	106260	3000	106260			1500
C1_V70_CONC050_DM_PE15_1.dat	147214	2000	147214			1500
C2_V70_CONC050_DB_PE15_5.dat	106738	3000	106260			1500
C2_V70_CONC050_DM_PE15_3.dat	90211	3000	89217			1500

Taula 8.7 Resultats de solucions enteres i solucions Corridor d'exemplars amb 70 vivendes.

exemplar 80	solució entera	temps (s)	solució corredor			temps total (s)
			iteració 1	iteració 2	iteració 3	
C1_V80_CONC025_DM_PE1_4.dat	168245	3000	168245			1000
C2_V80_CONC050_DM_PE15_3.dat	83660	3000	80453			1000

Taula 8.8 Resultats de solucions enteres i solucions Corridor d'exemplars amb 80 vivendes.

exemplar 90	solució entera	temps (s)	solució corredor			temps total (s)
			iteració 1	iteració 2	iteració 3	
C1_V90_CONC025_DB_PE15_5.dat	136620	3000	136620			1000
C1_V90_CONC050_DM_PE15_3.dat	189276	3000	189276			1000

Taula 8.9 Resultats de solució entera i solució Corridor d'exemplar amb 90 vivendes.

9. Conclusions

El present treball té per objecte el desenvolupament d'una heurística anomenada Corridor Method per aplicar a un d'un model matemàtic ja existent que serveixi per la optimització del disseny de projectes d'electrificació rural.

L'algorisme plantejat, segons les experimentacions que s'han realitzat, es pot dir que compleix l'objectiu pel qual va ser creat que es el d'obtenir una solució factible i suficientment bona, en un temps raonable, encara que no la solució òptima al disseny de microxarxes d'electrificació rural mitjançant energies eòlica i solar.

No obstant dir que pel problema d'electrificació rural, pel cas d'exemplars amb menys de 60 vivendes, triga més temps en obtenir la solució o en millorar-la, en canvi a partir de 70 vivendes obtenim la mateixa solució que l'obtinguda amb el mètode enter però millorant el temps, i en algun cas millorant també la solució.

Potser l'aplicació d'aquesta heurística per aquest tipus concret de problema no seria l'idoni, ja que sembla que la solució trobada queda atrapada en un òptim local i no millora respecte de la solució entera.

Una possible continuació del projecte podria ser provar altres heurístiques com ara algunes de recerca global, com podrien ser metaheurístiques d'arrancada múltiple, d'entorn variable o de recerca no monòtona (Recuit simulat o recerca Tabú).

10 Referències

- [1] Chaurey, A, Ranganathan, M. (2003) Enhancing Electricity Access Through Distributed Generation Based On Renewable Energy.
- [2] Domenech B. (2010) 'Modelo para el diseño de proyectos de electrificación rural con consideraciones técnicas y sociales'. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (Treball final de carrera).
- [3] Ferrer-Martí L., Pastor R., Capó G. M., Velo E. (2011) '*Optimizing microwind rural electrification projects. A case study in Peru*'. Journal of Global Optimization.
- [4] Fischetti M., Lodi A. (2003) 'Local Branching'. Mathematical Programming.
- [5] Frederick S. Hillier & Gerald J. *Introducción a la investigación de operaciones*.
- [6] Montemanni R., Mahdabi P. (2010) 'A Linear Programming-based Evolutionary Algorithm for the Minimum Power Broadcast Problem in Wireless Sensor Networks'. Journal of Mathematical Modelling Algorithms.
- [7] Moreno Pérez. J.A. (Universidad de La Laguna) *Metaheurísticas: Concepto y Propiedades*.
- [8] Sniedovich M, Vos S. (2006) 'The Corridor Method: a Dynamic Programming Inspired Metaheuristic'. *Control and Cybernetics*.
- [9] Yepes Piqueras,V. (UPV) Tesis Doctoral. *Optimització heurística econòmica aplicada a les xarxes de transport del tipus VRPTW*.