



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Programa de doctorat:

Administració i Direcció d'Empreses

Tesis doctoral presentada per obtenir el títol de  
Doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya

Procediments heurístics de disseny de  
sistemes d'electrificació rural amb energies  
renovables

Joan Triadó Aymerich

Directors:

Dra. Laia Ferrer Martí

Dr. Alberto García Villoria

Dr. Rafael Pastor Moreno

Departament d'Organització d'Empreses

Novembre 2016



*Agraeixo profundament l'ajut dels meus tres Directors de tesi, la Doctora Laia Ferrer, el Doctor Alberto García i el Doctor Rafael Pastor, pel seu esforç que ha permès que la realitzés i la portés a termini. Segurament mai, una dedicatòria ha estat tan merescuda.*

*La meva dona, la Teresa, i les meves dues filles, Júlia i Elisenda, les tinc sempre presents en tot allò que faig a la vida i és per a això que els dedico aquesta tesi com tot allò que faig que considero important.*

Aquesta tesis doctoral ha rebut finançament del Centre de Cooperació pel Desenvolupament de la UPC, del Ministerio de Ciencia e Innovación amb el projecte ENE2010-15509 i del Ministerio de Economica y Competitividad amb el projecte ENE2015-67253, cofinançat per FEDER.

# Resum

Els sistemes d'electrificació híbrids (fotovoltaics i eòlics) són una opció adequada per a subministrar electricitat de forma autònoma a comunitats aïllades. Per a dissenyar aquests sistemes hi ha models matemàtics recents que proporcionen la ubicació i el tipus de cadascun dels components d'electrificació i també el disseny de les possibles micro-xarxes de distribució. Quan la quantitat de punts de consum per electrificar augmenta, les solucions dels models matemàtics requereixen uns temps de càlcul que en la pràctica es converteixen en inviables.

Per aquests casos, en aquesta tesi es presenten tres procediments heurístics basats en programació lineal entera mixta (PLEM): heurístiques de Relaxament i Fixació, heurístiques basades en el *Corridor Method* i les heurístiques aquí anomenades de Radis creixents. En tots els procediments primer es resol un model PLEM relaxat per tal d'obtenir una solució base que després s'utilitza com a punt de partida per trobar una solució factible mitjançant la recerca en un espai de cerca més reduït.

S'han desenvolupat i provat diverses opcions de relaxament i de reducció de l'espai de cerca per a cada tipus d'heurística.

Finalment, s'han dut a terme extensos experiments computacionals basats en projectes reals i els resultats mostren que la millor heurística a aplicar varia segons la mida dels exemplars a resoldre.



# Abstract

Electrification hybrid systems (wind-photovoltaic systems) are a suitable option to supply electricity independently in isolated communities. To design these systems, there are recent mathematical models that provide the location and type of each of the electrification components and the design of the possible micro-distribution networks. When the amount of consumption points to electrify increases, solving the mathematical models require computational times that become infeasible in practice.

For these cases, three heuristic methods based on mixed integer linear programming (MILP) are presented in this thesis: Relax and Fix heuristics, heuristics based on Corridor Method and Increasing Radius heuristics. In all procedures first a relaxed MILP is solved to obtain a base solution and then it is used as a starting point to find a feasible solution by searching in a more reduced search space.

For each type of heuristics several options to relax and to reduce the solution space were developed and tested.

Finally, extensive computational experiments based on real projects were carried out and results show that the best heuristic to apply varies according to the size of the instances to be solved.





# Resumen

Los sistemas de electrificación híbridos (fotovoltaicos y eólicos) son una opción adecuada para suministrar electricidad de forma autónoma a comunidades aisladas. Para diseñar estos sistemas hay modelos matemáticos recientes que proporcionan la ubicación y el tipo de cada uno de los componentes de electrificación y también el diseño de las posibles micro-redes de distribución. Cuando la cantidad de puntos de consumo para electrificar aumenta, las soluciones de los modelos matemáticos requieren tiempos de cálculo que en la práctica se convierten en inviables.

Para estos casos, en esta tesis se presentan tres procedimientos heurísticos basados en programación lineal entera mixta (PLEM): heurísticas de Relajación y Fijación, heurísticas basadas en el *Corridor Method* y las heurísticas aquí llamadas de Radios crecientes. En todos los procedimientos primero se resuelve un modelo PLEM relajado para obtener una solución base que luego se utiliza como punto de partida para encontrar una solución factible mediante la búsqueda en un espacio de búsqueda más reducido.

Se han desarrollado y probado varias opciones de relajación y de reducción del espacio de búsqueda para cada tipo de heurística.

Finalmente, se han llevado a cabo extensos experimentos computacionales basados en proyectos reales y los resultados muestran que la mejor heurística a aplicar varía según el tamaño de los ejemplares a resolver.



# Índex

<b>RESUM .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDEX .....</b>	<b>VII</b>
<b>GLOSSARI.....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 L'accés a l'energia en el món actual .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Mètodes d'electrificació en el món rural .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Sistemes híbrids .....	4
1.2.2 Rangs de potència per al diferents sistemes d'electrificació rural .....	4
1.2.3 Evolució de l'ús global de l'energia solar fotovoltaica .....	6
1.2.4 Evolució de l'ús global de l'energia eòlica.....	7
1.2.5 Alimentació individual i microxarxes .....	7
<b>1.3 Contingut de la tesi .....</b>	<b>8</b>
<b>2. DESCRIPCIÓ DEL PROBLEMA.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 El problema d'electrificació rural autònoma.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Objectius i contribucions de la tesi .....</b>	<b>13</b>
<b>3. ESTAT DE L'ART .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Tecnologia de l'electrificació amb sistemes autònoms .....</b>	<b>15</b>
3.1.1 La generació d'energia elèctrica a través d'energia eòlica .....	15
3.1.2 La generació d'energia elèctrica a través d'energia solar .....	17
3.1.3 Els reguladors.....	18
3.1.3.1 Els reguladors eòlics .....	18
3.1.3.2 Els reguladors solars.....	19
3.1.4 L'emmagatzematge en bateries.....	19
3.1.5 Els sistemes inversors .....	21
3.1.6 La distribució del corrent .....	22
3.1.7 Els mesuradors.....	25
<b>3.2 El disseny de sistemes d'electrificació autònoms .....</b>	<b>25</b>
3.2.1 Eines d'assistència i simulació aplicades al disseny de sistemes d'electrificació .....	26
3.2.2 Procediments exactes aplicats al disseny de sistemes d'electrificació .....	26

3.2.3	Heurístiques aplicades al disseny de sistemes d'electrificació .....	28
3.2.4	Heurístiques basades en PLEM aplicades al disseny d'altres tipus de xarxes.....	31
<b>4.</b>	<b>UN MODEL MATEMÀTIC DEL PROBLEMA D'ELECTRIFICACIÓ RURAL AUTÒNOMA.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Descripció del model MERAES.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Adaptacions introduïdes a MERAES .....</b>	<b>39</b>
<b>5.</b>	<b>HEURÍSTIQUES PER DISSENYAR SISTEMES D'ELECTRIFICACIÓ RURAL AUTÒNOMA BASADES EN PLEM .....</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Heurístiques de Relaxament i fixació (RF) .....</b>	<b>41</b>
5.1.1	Esquema general de les heurístiques de RF.....	42
5.1.2	Variables a relaxar.....	43
5.1.3	Variables a fixar.....	44
5.1.4	Heurístiques RF proposades .....	45
<b>5.2</b>	<b>Heurístiques basades en el <i>Corridor Method</i> (BCM) .....</b>	<b>45</b>
5.2.1	La definició del veïnat .....	46
5.2.2	Esquema general de les heurístiques BCM .....	47
5.2.3	Heurístiques BCM proposades.....	48
<b>5.3</b>	<b>Heurístiques de Radis creixents (RC).....</b>	<b>48</b>
5.3.1	Esquema general de les heurístiques de RC .....	50
5.3.2	Variables a relaxar.....	51
5.3.3	Variables a fixar.....	52
5.3.4	Heurístiques RC proposades .....	52
<b>6.</b>	<b>RESULTATS EXPERIMENTALS .....</b>	<b>53</b>
<b>6.1</b>	<b>Resultats de les Heurístiques de Relaxament i fixació .....</b>	<b>55</b>
<b>6.2</b>	<b>Resultats de les Heurístiques basades en el <i>Corridor Method</i>.....</b>	<b>57</b>
<b>6.3</b>	<b>Resultats de les Heurístiques dels Radis creixents .....</b>	<b>58</b>
<b>6.4</b>	<b>Comparació i conclusions .....</b>	<b>59</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONS I EXTENSIONS FUTURES .....</b>	<b>61</b>
<b>7.1</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>61</b>
<b>7.2</b>	<b>Extensions futures .....</b>	<b>62</b>
<b>7.3</b>	<b>Articles i ponències realitzades.....</b>	<b>63</b>
<b>8.</b>	<b>ANNEXOS.....</b>	<b>65</b>
<b>8.1</b>	<b>Resultats d'un experiment preliminar de les heurístiques de Relaxament i fixació.....</b>	<b>65</b>

<b>8.2</b>	<b>Resultats d'un experiment preliminar de les heurístiques BCM.....</b>	<b>67</b>
<b>8.3</b>	<b>Resultats d'un experiment preliminar de les heurístiques de Radis creixents</b>	<b>68</b>
<b>8.4</b>	<b>Conclusions de l'experiment preliminar .....</b>	<b>69</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÈNCIES .....</b>	<b>71</b>



# Glossari

**Alimentació individual:** Electrificació d'un únic punt de consum de forma totalment aïllada, sense cap connexió amb cap altre punt de consum.

**Circuits de distribució secundària:** un o més conductors aïllats acompanyats pel conductor neutre. El circuit secundari (dit així perquè és alimentat des del devanat secundari reductor de tensió) proveeix els fils de les tres fases estàndards del servei elèctric de 115/230-volts per a clients residencials i petit comerç.

**Microxarxa:** Xarxa de distribució elèctrica aïllada de la xarxa elèctrica convencional i que subministra energia a un grup de punts de consum, generalment en zones rurals aïllades.

**Microxarxa oberta o radial:** És aquella en que cada punt de demanda rep el subministrament per una sola línia de conducció elèctrica.

**Microxarxa tancada:** És aquella en que cada punt de demanda rep el subministrament, com a mínim, per dues línies de conducció elèctrica diferents. Pot tenir tres formes diferents: en malla, anular o alimentada per dos punts extrems.

**Paritat de xarxa:** S'assoleix quan una font de generació d'energia elèctrica assoleix un cost inferior o igual al preu general de compra de l'electricitat de la xarxa elèctrica.

**Punt de consum:** Emplaçament que es vol electrificar. Pot tractar-se, per exemple, d'un habitatge particular o d'un edifici públic (escola, centre de salut, o centre comunitari).

**Punt de generació:** Punt de consum en el qual s'instal·la algun generador i l'equipament necessari que l'acompanya, ja sigui per a alimentar el mateix punt de demanda (alimentació individual) o per alimentar una microxarxa.

**Sistema híbrid:** Sistema d'electrificació que combina més d'una font d'energia que es complementen entre elles.

**Topologia d'una microxarxa:** Estructura d'una microxarxa que mostra els nodes (punts de consum) i les seves connexions.



# 1. Introducció

Aquest capítol comença presentant el problema de les dificultats i manca d'accés a l'electricitat per part de grans quantitats de població humana situada en zones rurals, majoritàriament, de països en vies de desenvolupament. Després es presenten els mètodes que es fan servir per a l'electrificació autònoma rural i la seva implantació a dia d'avui. Finalment, es presenta l'estructura d'aquest document.

## 1.1 L'accés a l'energia en el món actual

L'ús de l'electricitat és una qüestió crítica per a la reducció de la pobresa i per a proveir serveis socials bàsics com la salut i l'educació [Modi *et al.*, 2015]. Actualment, més de 1200 milions de persones al món (18% de la població mundial, aproximadament) no tenen accés a l'electricitat, especialment a les zones rurals de països en vies de desenvolupament [IEA, 2016]. Més del 95% d'aquestes persones són o bé a l'Àfrica subsahariana o a l'Àsia en vies de desenvolupament i al voltant del 80% d'aquests 1200 milions de persones són a àrees rurals [IEA, 2016]. En la Taula 1.1, es poden observar els nivells d'electrificació rural i urbana en les grans regions mundials en vies de desenvolupament.

En algunes àrees l'accés a la xarxa elèctrica convencional és molt difícil a causa de la complexitat del terreny i la dispersió de les poblacions. En aquests casos, una alternativa adequada per proporcionar accés a l'electricitat són els sistemes autònoms de generació basats en l'ús de fonts d'energia renovables [El Bassam, 2001; Chaurey *et al.*, 2004], ja que promouen la sostenibilitat dels projectes a causa de l'ús de fonts locals i d'aquesta manera s'eviten dependències externes; a més tendeixen a ser més barats que l'ampliació de la xarxa elèctrica convencional.

L'accés a l'electricitat significa més que no pas una simple connexió a una xarxa, sinó que implica una garantia d'un valor mínim de consum d'energia. L'*International Energy Agency* situa el nivell llindar del consum d'electricitat en els habitatges rurals en 250 kWh anuals [IEA, 2016]. Aquest càlcul està basat en l'estimació d'una

electrificació molt bàsica per a habitatges de cinc persones que usen un ventilador, dos punts de llum fluorescent i un telèfon mòbil amb consums de 5 hores diàries.

**Taula 1.1– Accés a l'electricitat [Adaptat d'IEA, World Energy Outlook 2014].**

<b>Regió</b>	<b>Població sense electricitat milions</b>	<b>Percentatge d'electrificació %</b>	<b>Percentatge d'electrificació urbana %</b>	<b>Percentatge d'electrificació rural %</b>
<b>Països en desenvolupament</b>	<b>1,283</b>	<b>76%</b>	<b>91%</b>	<b>64%</b>
Àfrica	622	43%	68%	26%
<i>Nord d'Àfrica</i>	1	99%	100%	99%
<i>Àfrica Sub-Sahariana</i>	621	32%	59%	16%
Àsia en desenvolupament	620	83%	95%	74%
<i>Xina</i>	3	100%	100%	100%
<i>Índia</i>	304	75%	94%	67%
Amèrica llatina	23	95%	99%	82%
Orient mitjà	18	92%	98%	78%
<b>Economies en transició i OCDE</b>	<b>1</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>MÓN</b>	<b>1,285</b>	<b>82%</b>	<b>94%</b>	<b>68%</b>

## 1.2 Mètodes d'electrificació en el món rural

El querosè, els generadors diesel, el gas líquid del petroli, les bateries d'un sol ús i la biomassa són les fonts de generació d'energia elèctrica convencional que han usat majoritàriament en el món les poblacions rurals disperses. Avui en dia, tanmateix, les consideracions sobre sostenibilitat estan encoratjant les economies en desenvolupament a focalitzar els seus esforços, allà on és pot, en el desplegament d'energies més netes tals com les renovables [Niez, 2010].

En el món rural s'han assajat sistemes d'electrificació a partir de diferents fonts d'energia renovable: hidràulica, solar fotovoltaica, eòlica, etc. Algunes d'aquestes energies estan molt subjectes a la presència d'un recurs en el propi territori; per exemple, l'energia hidràulica està restringida a sistemes en què hi ha present cursos d'aigua aprofitables per als propòsits d'electrificació, o l'energia geotèrmica està lligada a la presència de fonts geotèrmiques properes als nuclis a electrificar.

Els usos de les energies renovables relacionats amb l'energia elèctrica es troben especialitzats, tal com es mostra a la Taula 1.2 [Flavin & Hull, 2005].

**Taula 1.2 – Principals tecnologies en energia renovable amb aplicacions per generar electricitat**  
[Adaptat de [Flavin i Hull, 2005]]

<b>Energia renovable</b>	<b>Servei de l'energia</b>	<b>Entorn d'aplicació</b>
<b>Tecnologia/Aplicació</b>		
Solar fotovoltaica	Il·luminació (habitatges, escoles, carrers) i altres necessitats elèctriques de voltatge baix a mig (telecomunicacions, eines de mà, bombament d'aigua, etc.)	Urbà i rural
Solar tèrmica	Electricitat residencial i industrial (connectada a la xarxa)	Majoritàriament urbà
Turbines eòliques	Electricitat residencial i industrial (connectada a la xarxa), energia mecànica i necessitats d'electricitat de baixa tensió (petites unitats aïllades)	Urbà i rural
Biogàs	Electricitat residencial i industrial (connectada a la xarxa), cuina i il·luminació (digestors escala domèstica), força motriu per a la petita indústria i necessitats elèctriques (amb motor de gas)	Urbà i rural
Biomassa sòlida	Cuina i il·luminació (combustió directa), força motriu per a la petita indústria i necessitats elèctriques (amb motor elèctric)	Majoritàriament rural
Bio fuel líquid	Combustible per al transport i energia mecànica, en particular per a l'agricultura; calefacció i generació d'electricitat; combustible per a cuina rural	Urbà i rural
Gran hidràulica	La xarxa elèctrica (residencial i industrial)	Majoritàriament urbà
Petita hidràulica	Il·luminació i altres necessitats elèctriques de baixa a mitja tensió (telecomunicacions, eines de mà, etc.), força motriu per a processos per a la petita indústria (amb motor elèctric)	Majoritàriament rural
Geotèrmica	Xarxa elèctrica i calefacció a gran escala.	Urbà i rural
Micro-xarxes a escala de poble i híbrida	Sistemes d'il·luminació (habitatges, escoles, carrers) i altres necessitats elèctriques de voltatge baix o mig (telecomunicacions, eines de mà, emmagatzematge de vacunes, etc.)	Majoritàriament rural, algun peri-urbà

Per a l'electrificació rural, una configuració típica és l'ús de les energies eòlica i fotovoltaica, separades o en un ús híbrid amb totes dues [Merz *et al.*, 2013]. En concret, en aquesta tesi, es considera la generació híbrida d'energia elèctrica aconseguida a partir d'energia eòlica i fotovoltaica.

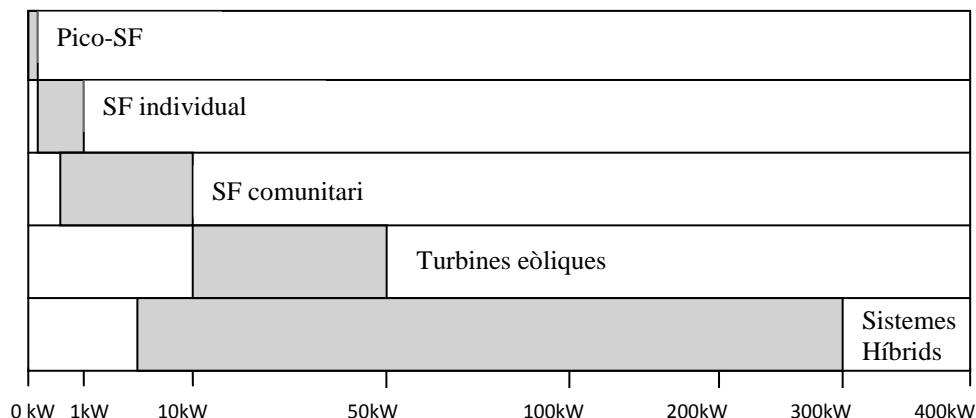
Els sistemes fotovoltaics (SF) s'han utilitzat àmpliament en les últimes dècades per electrificar comunitats rurals. Pel que fa als sistemes eòlics, cada vegada s'estan utilitzant més com, per exemple, en els casos de Lew [2000] i Ferrer-Martí *et al.* [2012]. En comparació amb els SF, a les regions amb alts règims de vent, l'ús de sistemes eòlics pot ser més rendible, sobretot si la demanda augmenta i s'utilitzen turbines de gran potència. D'altra banda, els sistemes híbrids són més eficients, aporten més fiabilitat de subministrament i, per tant, requereixen menys emmagatzematge d'energia si es comparen amb sistemes d'un únic tipus de recurs d'energia [Nandi & Gosh, 2010; Zhou *et al.*, 2010].

### **1.2.1 Sistemes híbrids**

Els sistemes híbrids són l'ús combinat de dues o més fonts diferents, però complementàries, de subministrament d'energia per a una mateixa microxarxa o un punt de consum. El gran avantatge dels sistemes híbrids és la seva capacitat per evitar les fluctuacions en el subministrament d'energia, que és el desavantatge més important del subministrament d'energia en xarxes aïllades de la xarxa convencional a partir d'energies renovables, tals com l'eòlica o els SF. Amb un sistema híbrid es pot subministrar energia elèctrica de forma relativament constant, de forma que una de les energies supleix l'altra (o altres) quan una de les fonts d'energia no pot aportar, en un moment donat, l'energia necessària. Sovint els sistemes híbrids seran una combinació de diferents energies renovables. Un dels sistemes híbrids usats són els sistemes combinats d'energia eòlica i energia dels SF [Niez, 2010].

### **1.2.2 Rangs de potència per al diferents sistemes d'electrificació rural**

Cada tecnologia és la més adient per als seus usos en electrificació rural dins un rang de potència particular [Merz *et al.*, 2013] (Figura 1.1):



**Figura 1.1 – Rangs de potència per a diferents sistemes d’electrificació rural [Font: Merz *et al.*, 2013]**

- Sistemes Pico-SF: són sistemes solars molt petits per a habitatges. Típicament, la seva potència es troba entre 1-10W. Es fan servir bàsicament per a il·luminació en substitució d’espelmes i làmpades de querosè. S’alimenten de petits panells solars, amb una bateria que pot estar integrada en una làmpada o connectada separatament.
- Sistemes fotovoltaics individuals: subministren la potència necessària per a un sol habitatge. Assoleixen potències entre 250W i 1000W.
- Sistemes fotovoltaics comunitaris: proporcionen electricitat a comunitats residencials o a grans instal·lacions comercials incloent-hi hotels, hospitals, escoles o factories. Normalment, tenen un rang des de 500W a 10kW de potència de subministrament.
- Turbines eòliques: normalment tenen diàmetres menors als 15 m amb una potència inferior als 50kW. En general, es consideren viables en regions amb vents superiors als 5 m/s. Tenen un potencial de producció de 300 kWh anual per metre quadrat de superfície de rotor.
- Les microxarxes híbrides aporten electricitat a una comunitat. Normalment, una microxarxa treballarà a baixa tensió (230 o 400V) amb una producció i emmagatzemament centralitzat. La seva capacitat instal·lada estarà en el rang de 5 a 300kW. Varien en complexitat, però són capaces de proveir prou potència a

nuclis rurals o habitatges per tal de satisfer totes les necessitats domèstiques actuals i als edificis de serveis comunitaris.

Referint la present tesi a aquesta classificació cal dir que es desenvolupa sobre sistemes fotovoltaics individuals o comunitaris, així com sobre turbines eòliques i sobre sistemes híbrids fotovoltaics i eòlics per a microxarxes.

### **1.2.3 Evolució de l'ús global de l'energia solar fotovoltaica**

L'ús massiu de l'energia fotovoltaica és ja una realitat avui. En aquests darrers anys la tecnologia SF ha millorat la seva eficiència, ha reduït el cost per watt de la instal·lació i el temps de retorn de la inversió, i també ha aconseguit la paritat de xarxa en almenys 30 països en el 2014 [Shah & Booream, 2015]. Actualment és una energia competitiva sense subsidis en el món, almenys en 19 països, i s'espera que augmenti aquest nombre a mida que baixin encara més els seus costos i augmenti l'eficiència [Shah & Booream, 2015].

Superats els anys en que les cèl·lules solars presentaven uns rendiments que les feien poc viables econòmicament per al seu ús en el gran consum i també gràcies a economies d'escala, el creixement mundial de potència instal·lada s'ha accelerat; des dels 40 GW del 2010 als 178 GW al final de l'any 2014 [Rekinger *et al.*, 2015]. Es preveu per part d'institucions financeres mundials com el Deutsche Bank [Shah & Booream, 2015] i el National Renewable Energy Laboratory (NREL) [López *et al.*, 2012] un augment encara més accelerat del seu ús en els propers anys, preveient uns 375 GW de potència instal·lada a finals del 2018 [Rekinger *et al.*, 2015].

L'energia fotovoltaica subministra ja electricitat a entre 500.000 i 1 milió d'habitatges rurals de països en vies de desenvolupament [Niez, 2010] que no tenen accés a la xarxa elèctrica convencional. És una tecnologia especialment atractiva per a regions amb molta insolació i poblacions disperses, però també per a grups de cases o pobles sencers [Niez, 2010].

## 1.2.4 Evolució de l'ús global de l'energia eòlica

L'energia eòlica té un molt alt potencial per a l'electrificació rural [Niez, 2010]. El seu ús genèric ha experimentat també un espectacular augment mundial en la darrera dècada, des dels 59 GW de capacitat del 2005 als prop de 433 GW de capacitat el 2015. L'any 2015 es van ampliar la capacitat mundial en 63 GW [GWEC, 2016]. En la Taula 1.3 es pot observar la capacitat en MW disponibles en les diferents regions mundials.

**Taula 1.3 – Capacitat de potència mundial instal·lada d'energia eòlica [Font: GWEC, 2016]**

Regió del món	MW de capacitat instal·lada
Àfrica i Orient mitjà	3.489
Àsia	175.831
Europa	147.771
Llatino-amèrica i Carib	12.220
Nordamèrica (USA-Canadà-Mèxic)	88.749
Regió del Pacífic	4.832

## 1.2.5 Alimentació individual i microxarxes

A part de l'elecció de la font de generació, una altra de les disjuntives que s'encaren en la electrificació rural és si és millor instal·lar sistemes individuals (punts alimentats aïlladament) o electrificar a través de microxarxes elèctriques. En els sistemes d'electrificació autònoms, s'han utilitzat normalment sistemes individuals en cada punt de la demanda [Ferrer-Martí *et al.*, 2010] degut a la seva simplicitat de disseny i instal·lació. No obstant això, els sistemes de distribució a través de microxarxes tenen avantatges en front dels sistemes individuals [Camblong *et al.*, 2009; Kirubi *et al.*, 2009]. En les microxarxes l'energia es produeix en un punt específic i a partir d'aquest punt es distribueix per la xarxa elèctrica fins a altres punts de demanda. La seva implementació pot implicar un estalvi significatiu en el cost d'inversió en comparació amb els sistemes individuals, aprofitant els millors recursos del territori i les economies d'escala. A més permeten més flexibilitat en el consum dels usuaris i eviten diferències entre el servei que reben diferents usuaris. Per altra banda, l'extensió de les microxarxes a tots els usuaris podria augmentar molt el cost del projecte degut al cost del cablejat.

Així, la combinació de microxarxes i sistemes individuals pot ser la millor solució en comunitats disperses [Ferrer-Martí *et al.*, 2013].

## 1.3 Contingut de la tesi

A continuació es descriu de forma breu el contingut de cada capítol de la tesi:

- En el capítol 2 s'especifica quin és el problema a tractar: el desenvolupament de procediments heurístics que ajudin a dissenyar els sistemes d'electrificació autònoms per a comunitats rurals. També es concreta quins objectius s'han plantejat en la realització de la tesi doctoral.
- En el capítol 3 es presenta l'estat de l'art. Primer s'explica la tecnologia i els components que fan referència als sistemes d'electrificació rural autònoma (ERA) i s'esquemmatitzen les diferents opcions. Per acabar, s'analitzen les publicacions científiques relacionades amb aquesta investigació per tal d'identificar quins són els buits que omple aquesta tesi.
- En el capítol 4 es mostra el model de Programació Lineal Entera-Mixta (PLEM) del problema d'electrificació rural autònoma que s'ha fet servir com a base dels procediments heurístics dissenyats.
- En el capítol 5 s'exposen els diferents procediments heurístics, per dissenyar sistemes d'electrificació rural autònoma, que s'han desenvolupat a la present tesi, basats en el model de PLEM presentat en el capítol 4.
- En el capítol 6 es mostren els resultats experimentals de cadascun dels procediments heurístics proposats: primer es descriuen les característiques dels exemplars sobre els quals s'ha experimentat, després es mostren els resultats per a cadascun dels procediments heurístics i finalment es fa la comparació entre els diferents resultats i s'extreuen conclusions sobre com aplicar aquestes heurístiques.



- En el capítol 7 es destaquen les conclusions i aportacions de la tesi i les possibles línies de treball futures. Per acabar, s'enumeren les publicacions i ponències a congressos generades a partir de l'elaboració d'aquesta tesi.
- En el capítol 8 es mostren, en uns annexos, els resultats d'experiments preliminars realitzats per a poder decidir quines heurístiques s'analitzaran amb més profunditat.
- Finalment, en el capítol 9 s'hi troben les referències consultades per a la realització d'aquesta tesi.



## 2.Descripció del problema

En aquest capítol s'especifica quin és el problema a resoldre: el disseny de sistemes d'electrificació rural autònoma de baixa tensió. Aquest disseny es centra en la consideració dels costos d'inversió d'aquests sistemes. En el primer apartat es defineix quin és el problema a resoldre i en el segon apartat es concreten els objectius de la present tesi doctoral.

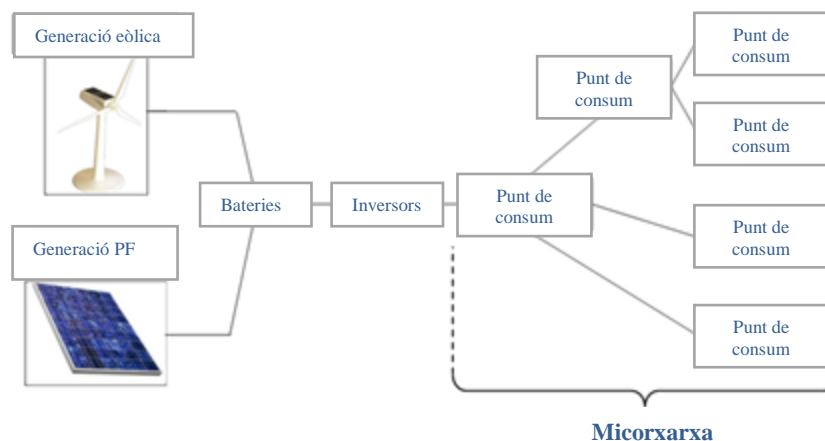
### 2.1 El problema d'electrificació rural autònoma

El problema d'electrificació rural autònoma presentat en aquesta tesi considera la possibilitat de generació eòlica i/o solar en els punts de demanda elèctrica, exclouent la possibilitat de fer-ho en localitzacions en les quals no hi hagi demanda. Aquest fet es justifica per la seguretat i per la facilitat de manteniment dels equips. El disseny d'aquests sistemes ha de tenir en compte la disponibilitat d'aquestes energies a la regió (mapes de recursos eòlics i dades d'irradiació solar), la localització dels punts de consum i la seva demanda.

La distribució d'electricitat es fa combinant sistemes individuals i microxarxes. Les microxarxes poden ser obertes (radials), o tancades (anulars, en malla o abastides per dos punts extrems). Una xarxa tancada admet més d'un punt generador; això fa que s'hagi d'implementar un sistema de control de la xarxa que augmenta la complexitat de tot el sistema i conseqüentment els costos d'inversió, d'operació i de manteniment. La xarxa radial només admet un punt generador; el seu menor cost i complexitat fan que hagi estat l'escollida en la present tesi i en diversos sistemes ja implementats [Lambert & Hittle, 2000; Ferrer-Martí *et al.*, 2011, 2013].

La solució del problema ha de definir quantes microxarxes hi haurà; quins punts de demanda seran inclosos a cada microxarxa o si seran alimentats individualment; on es situaran els generadors i altres components, i quins i quants components s'han de fer servir per tal de minimitzar la inversió inicial tot satisfent la demanda, junt amb altres restriccions tècniques.

Els components del problema d'electrificació rural autònoma (Figura 2.1) són, primer, l'equipament de generació eòlica o fotovoltaica (panells fotovoltaics, PF), que inclou els generadors i els reguladors. Després, inclou les bateries per a emmagatzemar energia i els inversors per a crear corrent altern (AC). Finalment, hi ha els cables que distribueixen l'electricitat amb microxarxes radials [Avella *et al.*, 2005] i mesuradors d'energia elèctrica en els punts de demanda (e.g., habitatges) per a mesurar l'energia consumida. Cadascun dels components del problema d'electrificació rural autònoma pot ser de diferents tipus per tal d'adequar el disseny a les necessitats de cada zona a electrificar.



**Figura 2.1 – Esquema d'un sistema d'electrificació rural autònoma d'una única microxarxa**  
**[Ferrer-Martí *et al.*, 2013]**

Cadascuna de les microxarxes que formaran el sistema d'electrificació rural autònoma contindrà un únic punt on es situaran els generadors (solars i/o eòlics). Els punts que no es connectin a cap microxarxa han de tenir-hi els seus propis elements de generació. L'energia generada per un generador eòlic d'un tipus particular depèn del recurs vent en un punt específic. Per altra banda, l'energia produïda per un PF d'un tipus particular no depèn de la seva localització perquè el recurs solar es considera uniforme en totes les parts de la comunitat [Gueymard & Wilcox, 2011]. També es limita el nombre de generadors eòlics i solars en atenció a la limitació d'espai.

En el conjunt de dispositius a instal·lar, es requereixen els anomenats reguladors, com a element intermedi entre els generadors i les bateries, que transformen el corrent altern (AC) en corrent continu (DC) i que controlen la càrrega i descàrrega de les bateries. Els

reguladors per als generadors eòlics estan integrats en el propi sistema generador, mentre que els reguladors per a la generació solar són dispositius independents.

L'energia generada és acumulada en bancs de bateries i subseqüentment és distribuïda al sistema elèctric. La capacitat d'emmagatzematge de les bateries depèn de la demanda i l'autonomia requerida.

Per tal de permetre el consum d'electricitat en corrent altern, que és la forma usual de la xarxa de distribució elèctrica, han de ser instal·lats inversors, també anomenats onduladors, de la potència necessària. Aquests inversors fan la funció de convertir la tensió contínua de les bateries en una tensió i corrent alterns propis de la xarxa de distribució elèctrica. El nombre d'inversors en un mateix punt està limitat.

Els cables fan arribar l'energia elèctrica a tots els punts de demanda connectant els punts de generació amb els punts de demanda de cada microxarxa.

Els mesuradors de consum d'energia i mesuradors de potència es situen només en els punts de demanda que formen part d'una microxarxa per tal de mesurar els consums d'energia i de potència i, d'aquesta manera, permetre consums més justos entre els diferents consumidors d'una microxarxa.

## **2.2 Objectius i contribucions de la tesi**

L'objectiu principal d'aquesta tesi ha estat dissenyar sistemes d'electrificació rural autònoma que, per les seves dimensions, no es poden resoldre de forma òptima mitjançant mètodes exactes. Per aconseguir aquest objectiu s'han desenvolupat diversos procediments heurístics basats en Programació Lineal Entera-Mixta (PLEM), s'han provat en diversos jocs d'exemplars, i s'han analitzat els resultats obtinguts amb cadascun d'ells.

Es proposa, a més, quina heurística de les dissenyades es recomana aplicar depenent de les característiques del problema d'electrificació rural autònoma que s'està tractant.

D'aquesta forma, l'aplicació d'aquestes heurístiques permetrà reduir el cost del disseny actual de sistemes d'electrificació rural autònoma en països en vies de desenvolupament i facilitarà la seva realització allà on els recursos en inversions són més escassos i on és més necessari l'ús de recursos energètics propis del territori.

## **3. Estat de l'art**

En aquest capítol s'exposa l'estat de l'art del disseny de sistemes d'electrificació autònoma. Primer de tot s'exposa la tecnologia emprada per a l'electrificació amb sistemes autònoms. A continuació, les publicacions revisades sobre el disseny de sistemes d'electrificació autònoma s'han classificat en tres grups que l'aborden, cadascun amb una estratègia diferent: a través de la simulació, de la resolució per mètodes exactes o per l'ús d'heurístiques.

### **3.1 Tecnologia de l'electrificació amb sistemes autònoms**

En els següents subapartats s'exposen amb profunditat els diferents elements que componen un sistema d'electrificació autònom com el que es tracta en aquesta tesi. Es destaquen tant les característiques tècniques com la necessitat del seu ús.

#### **3.1.1 La generació d'energia elèctrica a través d'energia eòlica**

La generació elèctrica a partir de l'energia eòlica s'obté fent servir els anomenats aerogeneradors. Un aerogenerador transforma l'energia cinètica de les seves pales, aconseguida per l'impuls del vent i mitjançant un disseny eficient d'aquestes pales, en energia elèctrica. Aquesta transformació d'energia es fa a partir d'un generador elèctric d'imants permanents, l'eix del qual és solidari a l'eix que sosté i és impulsat en el gir per les pales. Quan gira aquest eix (rotor) amb els imants permanents ho fa dins d'una part anomenada estator, que conté unes bobines conductores a les quals els gir dels imants els produirà uns camps magnètics variables que induiran una força electromotriu en les esmentades bobines, tal com descriu la llei de Faraday.

Com que un aerogenerador és un aparell de transformació d'energia, les seves característiques recullen tant característiques mecàniques com elèctriques:

- La potència nominal [W] és la potència màxima a la qual pot treballar de forma continuada i per la qual ha estat dissenyat i en la que presenta un màxim rendiment.

- La potència màxima [W] és la potència màxima a la qual pot arribar el generador de forma no prolongada sense avariar-se.
- El voltatge [V] és la tensió elèctrica o força electromotriu que és induïda a l'estator a partir del gir del rotor; és la tensió de subministrament elèctric als punts de demanda.
- La velocitat nominal [m/s] és la velocitat del vent quan l'aerogenerador està ben orientat al vent i genera la potència nominal.
- La velocitat d'arrencada [m/s] és la velocitat del vent a partir de la qual el generador comença a generar energia elèctrica, perquè a partir d'aquesta velocitat pot girar a la velocitat adequada.
- La velocitat de tall [m/s] és la velocitat del vent a partir de la qual es podria provocar, per excés, l'avaría de l'aerogenerador; en aquest cas l'aerogenerador deixa de girar.

El posicionament dels aerogeneradors, dins dels sistemes de generació eòlica, és un problema a resoldre perquè han de complir una sèrie de requeriments. El primer problema és el del seu ancoratge al terreny, ja que cal realitzar un basament prou sòlid dins d'un terreny prou resistent. Per altra banda, els obstacles al flux de vent poden impedir-los un eficient rendiment i és per això que els aerogeneradors no poden estar massa a prop d'obstacles ni els uns dels altres perquè les turbulències creades, pròpies de cada generador, també minvarien els rendiments de generació. Tot això dificulta la seva instal·lació i determina el nombre màxim d'aerogeneradors a situar en un punt concret, i que es veurà reflectit en el problema d'electrificació rural autònoma a resoldre.

En referència a les dades necessàries, cal especificar l'energia generada en funció de la localització dels aerogenerador, que s'obté a partir dels mapes de vent. La topografia del terreny, com es podria esperar, afecta sobretot al flux de l'aire més pròxim a la superfície terrestre, l'anomenat vent de superfície. Un mapa de vent conté dades sobre



la velocitat i direcció del vent de superfície en una regió. Els mapes de vent són interpolacions de dades meteorològiques a partir de dades mitjanes dins un període més o menys curt de temps [Williams, 1999; González-Ferreiro & Bosque, 2008]. Per a la localització d'aerogeneradors solen fer-se servir dades meteorològiques de períodes fixats en una quantitat de minuts concreta i preses durant anys (en molts casos superen els 10 anys) a diferents alçades de la superfície terrestre. També es solen interpolar els mapes de vent a partir de les dades de vent d'estacions meteorològiques i xarxes de vigilància de contaminació atmosfèrica [González-Ferreiro & Bosque, 2008]; en aquests casos l'alçada on s'han situat els equips mesuradors és diversa. En el cas del mapa de vent utilitzat en la present tesi, s'ha obtingut extrapolant les dades de vent mesurades amb un anemòmetre en un punt localitzat en un lloc central de cada comunitat, un punt alçat respecte del seu entorn i sense obstacles a prop [Ferrer-Martí *et al.*, 2012]. A continuació es fa una extrapolació a la resta de punts de la comunitat a partir del mapa topogràfic i de rugositat del terreny. La validesa d'aquest mètode és verificada per Ranaboldo *et al.* [2014a].

### **3.1.2 La generació d'energia elèctrica a través d'energia solar**

L'energia solar fotovoltaica permet transformar en electricitat la radiació solar a través d'una cèl·lula fotovoltaica que converteix l'energia del sol en electricitat a partir de l'efecte fotoelèctric descrit per Heinrich Hertz i teoritzat per Albert Einstein. Els panells fotovoltaics són, doncs, agrupacions de cèl·lules fotovoltaïques que en conjunt proveeixen una tensió elèctrica contínua que serà usada per a carregar unes bateries per al seu consum posterior.

Des de fa anys s'han investigat diferents tipus de materials que poguessin augmentar els seus rendiments, que encara avui són baixos en comparació amb altres fonts d'energia, però que han permès el seu ús comercial en les darreres dècades. Hi ha panells de tipus amorf, amb el silici no cristal·litzat, de rendiments al voltant del 5% i que resulten barats. Per altra banda hi ha els panells cristal·lins, de cristall de silici, amb els quals s'obtenen majors rendiments però a un cost més elevat. Els panells cristal·lins es divideixen en policristal·lins (format de petites partícules cristal·litzades) i els monocristal·lins (seccions d'un únic cristall). Els panells policristal·lins tenen un rendiment al voltant del 10% , mentre que els monocristal·lins tenen un rendiment més

alt, que pot arribar al 20%, però tenen també un pes i gruix elevats i són molt més cars que els panells policristal·lins.

### **3.1.3 Els reguladors**

Les funcions principals dels reguladors que carreguen les bateries són: controlar el procés de càrrega dins d'uns límits de seguretat i protegir les bateries. Aquesta funció de protecció es pot dividir en tres subfuncions: protecció de les bateries de tensions excessives a l'entrada; protecció de sobrecàrregues, provocades per excés de demanda, que provoquin la superació dels corrents màxims que poden subministrar les bateries; i evitar descàrregues profundes que provoquin que el nivell de la bateria estigui per sota de les indicacions del fabricant. Totes aquestes proteccions de seguretat realitzades pels reguladors estan destinades a evitar que les bateries es malmetin. En aquesta tesi se n'han utilitzat de dos tipus: els reguladors eòlics i els reguladors fotovoltaics. Per altra banda, quan la bateria supera una tensió concreta es considera que és plena i aleshores el regulador desvia el corrent a unes resistències que dissipin l'energia en forma de calor.

Els rendiments dels reguladors, quan està en l'operativa normal de càrrega, s'apropa molt al 100%.

#### **3.1.3.1 Els reguladors eòlics**

En la instal·lació dels aerogeneradors hi apareix sempre aquest dispositiu addicional, el regulador eòlic. En el cas dels aerogeneradors, els reguladors venen sempre associats amb els equips aerogeneradors i adaptats a ells; aquesta és la causa per la qual els reguladors eòlics no formaran part del problema a resoldre. La funció principal d'un regulador eòlic és la de convertir el corrent altern generat per l'aerogenerador en corrent continu per tal d'emmagatzemar l'energia en bateries; a més de les altres dues funcions abans esmentades: la càrrega de bateries de forma controlada i la funció de protecció de la bateria.

Les característiques principals dels reguladors eòlics són:

- Tensió nominal de sortida [V]: és la tensió nominal amb la qual el regulador carrega les bateries.

- Tensió nominal d'entrada [V]: tensió nominal dels generadors eòlics a l'entrada del regulador.
- Corrent màxim de sortida [A]: corrent màxim que és capaç de subministrar a les bateries.
- Rendiment [%]: quocient entre la potència subministrada a les bateries dividit per la potència rebuda dels aerogeneradors. Els seus rendiments superen el 95%.

### **3.1.3.2 Els reguladors solars**

Fent funcions anàlogues als reguladors eòlics, els reguladors solars controlen la càrrega de les bateries a partir de l'energia elèctrica generada pels panells solars. La diferència entre els reguladors solars i els eòlics és que els reguladors solars no han de rectificar el corrent per a convertir-lo a continu perquè ja reben l'energia d'entrada en tensió contínua provinent dels panells solars; però la resta de funcions són compartides. Aquests reguladors són dispositius completament independents, no integrats als panells fotovoltaics.

Les característiques principals dels reguladors solars coincideixen amb les dels reguladors eòlics tret de la tensió nominal d'entrada i el rendiment, per als quals cal variar la seva definició:

- Tensió nominal d'entrada [V]: tensió nominal dels panells solars a l'entrada del regulador.
- Rendiment [%]: quocient entre la potència subministrada a les bateries dividit per la potència rebuda des dels panells solars. Els seus rendiments són molt propers al 100%.

### **3.1.4 L'emmagatzematge en bateries**

Els dispositius on s'emmagatzema l'energia generada, un cop convertida pels reguladors, són els bancs de bateries; aquesta és l'única manera que permet l'emmagatzematge en forma d'energia elèctrica, electroquímica més concretament. Quan és el cas d'un consum particular o en el cas d'una xarxa elèctrica amb pocs punts de demanda (microxarxa), cal instal·lar bateries per emmagatzemar energia degut a la possible no coincidència de temps entre la generació i el consum. Així, les bateries

permeten guardar l'energia elèctrica en els períodes en que la generació és més gran que el consum i subministrar l'energia elèctrica generada quan la demanda supera la generació.

Una bateria elèctrica és un dispositiu format per dues o més cèl·lules electroquímiques connectades en sèrie, que converteixen l'energia química en energia elèctrica a través d'una reacció d'oxidació i reducció. Les bateries recarregables reben el nom d'acumuladors i aquests dispositius permeten revertir la reacció química abans esmentada de tal manera que quan se'ls aplica energia elèctrica a les seves bornes, aquesta energia es converteix en energia química que és la que realment s'emmagatzema.

Tanmateix, l'ús de bateries té diversos inconvenients. El primer d'ells és l'ús de components tòxics que cal retirar convenientment un cop acabada la seva vida útil que, a més, no acostuma a ser gaire llarga; 3 anys és un període bastant comú, bo i que en l'actualitat les millores tecnològiques dels darrers anys han augmentat la seva vida útil fins a 5 anys o més. A tot això cal afegir que en en països en vies de desenvolupament la tecnologia per a tractar convenientment les bateries obsoletes no es troba tan desenvolupada com en els països desenvolupats, la qual cosa dificulta encara més la seva retirada seguint mètodes apropiats. Per altra banda un altre inconvenient és que cal protegir-les, tant de sobrecàrregues com de descàrregues profundes que poden malmetre la bateria; és aquesta una de les funcions dels reguladors que han estat presentats a 3.1.3.

Les característiques que cal ressaltar de les bateries són:

- Tensió nominal [V]: tensió per a la qual ha estat dissenyada la bateria i al voltant de la qual fluctua la tensió, dins d'un rang acceptable, quan la bateria està carregada a un nivell que li permet realitzar la seva funció de subministrament d'energia elèctrica.
- Capacitat [Ah]: mesura de l'energia acumulada, específica de les bateries elèctriques, per la qual, a càrrega completa, la bateria és capaç de subministrar el nombre d'ampers especificat durant una hora. Aquest número és un patró; s'ha d'interpretar que, si el consum de corrent és menor, el nombre d'hores de consum augmenta; és el producte corrent multiplicat per temps el que indica la capacitat. Per

altra banda, si la capacitat es multiplica per la tensió nominal s'obté l'energia acumulada, altrament dita capacitat equivalent (EB), en [Wh].

- Eficiència de càrrega, o rendiment ( $\eta_{bat}$ ) [%]: quocient, en tant per cent, entre l'energia realment emmagatzemada (que es pot extraure) i l'energia emprada per a carregar-la (o subministrada). Amb el temps l'eficiència de les bateries es redueix.
- Factor de descàrrega (DB) [%]: quocient entre l'energia que pot subministrar la bateria i la capacitat total que es pot emmagatzemar. Aquest paràmetre té molta importància en el supòsit de descàrrega profunda que pot danyar-la irreversiblement. Quant menys profunds siguin els cicles de càrrega/descàrrega, més durarà l'acumulador.

### 3.1.5 Els sistemes inversors

La distribució elèctrica convencional es realitza a través de tensió alterna per tal de poder augmentar a alt voltatge la tensió de distribució a través de transformadors i, així, permetre corrents menors que provoquin baixes pèrdues per l'efecte Joule. Això fa que en l'actualitat, la immensa majoria d'aparells de consum admetin només tensió alterna (AC) en la seva alimentació, tret d'alguna excepció. És per això que cal que, abans d'arribar al consumidor a través de les línies de distribució, l'energia elèctrica provinent de les bateries sigui transformada de tensió contínua (DC) a tensió alterna (AC). El dispositiu que fa aquesta funció s'anomena inversor.

Els paràmetres més destacats d'un inversor són:

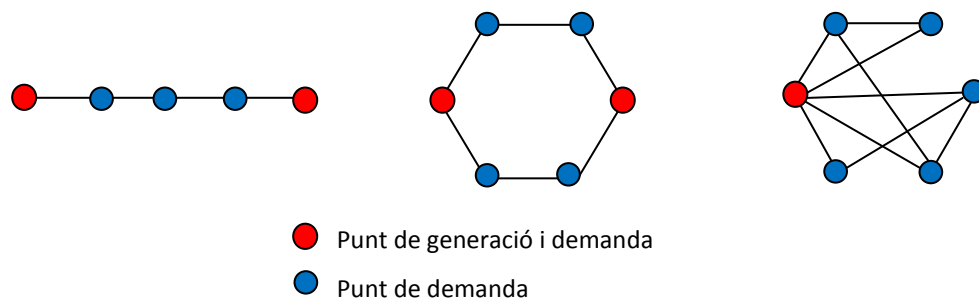
- La potència nominal [W]: potència per a la qual l'inversor ha estat dissenyat per a minimitzar les seves pèrdues; és a dir, proporcionar un major rendiment.
- Eficiència o rendiment  $\eta_{inv}$  [%]: quocient entre l'energia subministrada a la xarxa de consum a la sortida de l'inversor i l'energia subministrada des del banc de bateries a l'entrada de l'inversor.

### 3.1.6 La distribució del corrent

La distribució del corrent elèctric es fa a través de cables que transporten l'energia des del punt on hi ha instal·lada la generació, i el conjunt de dispositius que l'acompanyen tractats ens els apartats anteriors, fins als punts de demanda a través de la microxarxa.

Una microxarxa pot tenir una topologia tancada o oberta (a partir d'ara, microxarxa tancada i microxarxa oberta):

- La microxarxa tancada (Figura 3.1) és aquella en que cada punt de demanda rep el subministrament, com a mínim, per dues línies diferents. Les microxarxes tancades poden ser classificades de la següent manera: alimentades per dos punts, en anell o en malla.

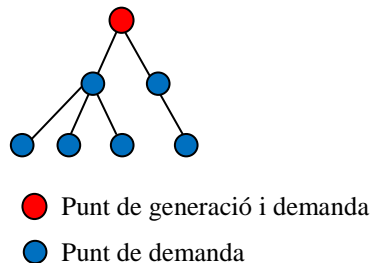


**Figura 3.1 – Microxarxa tancada: alimentada per dos punts (esquerra), en anell (mig) i en malla (dreta)**

- La microxarxa tancada alimentada per dos punts és una xarxa que s'alimenta per generadors als seus dos extrems. Té l'avantatge que si es talla el subministrament d'un costat, aquest subministrament pot venir per l'altre. Tanmateix, la connexió a la xarxa requereix d'elements de sincronització dels generadors i controls de xarxa, que n'augmenten el cost respecte l'opció oberta.
- En la forma d'anell, la microxarxa forma un circuit tancat i admet més d'un punt de generació. Cada punt rep dues línies d'alimentació. La seva finalitat és la de millorar la seguretat del servei de subministrament de la microxarxa, ja sigui pel tall d'una part del circuit (en aquest cas la demanda és satisfeta des de l'altra banda del circuit) o bé per l'apagada d'un dels punts generadors. Els problemes principals són que la connexió a la xarxa és més complexa,

requereix d'elements de sincronització dels generadors quan n'hi ha més d'un, calen sistemes de protecció també més complicats, i a més la quantitat de cable usat és superior a l'opció oberta; tot això fa que tingui un cost elevat [Ter-Gazarian & Kagan, 1992].

- En una microxarxa en malla cada node està connectat a dos o més nodes. Els seus avantatges radiquen en la forta garantia de servei, flexibilitat d'alimentació i facilitat de conservació i manteniment, ja que es poden tancar els circuits convenients quan es fan substitucions o manteniment sense interrompre el subministrament. Els inconvenients són la major complexitat que també fa més complexes les proteccions i, per tant, augmenta el cost respecte a totes les altres configuracions.
- En la forma de microxarxa oberta (també anomenada distribució radial) (Figura 3.2) cada nova línia parteix d'un punt de generació per arribar a tots els punts de consum en forma d'arbre. En aquestes microxarxes els nodes només tenen un cable d'entrada (excepte el punt de generació) i cap, un, o diversos cables de sortida.



**Figura 3.2 – Microxarxa oberta**

L'inconvenient d'aquesta forma de distribució és la seva relativa baixa garantia de servei, donat que el subministrament només parteix d'un punt generador, de tal manera que el tall d'una branca afecta a totes les branques que pengen del node que deixa de rebre subministrament de la branca tallada. Els avantatges són la seva simplicitat, la facilitat per ser equipades de proteccions selectives, i els seus baixos costos si es comparen amb qualsevol de les configuracions de microxarxes tancades. Això les fa especialment adequades per a sistemes d'electrificació rurals en països en desenvolupament [Lambert & Hittle, 2000].

Els cables de distribució de les línies elèctriques solen ser de coure o alumini. No són, en general, formats per un sol fil sinó per un conjunt de fils trenats per tal de millorar-ne la flexibilitat. Tanmateix, es fa referència a una secció equivalent com si es tractés de la secció d'un sol conductor. La secció és variable en funció de l'ús i els corrents que ha de transportar el cable. Les característiques dels cables que són rellevants en la present tesi són:

- Resistivitat ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot m$ ]: capacitat d'oposar-se al pas de corrent elèctric, és la resistència d'un conductor d'1 m de longitud i 1 m<sup>2</sup> de secció. La resistència és la causant de pèrdues per efecte del calor generat per l'efecte Joule i de la caiguda de tensió al llarg del cable.
- Secció [mm<sup>2</sup>]: àrea transversal del cable.
- Longitud [m]: longitud del cable des de la sortida de l'inversor fins arribar al punt de demanda. És important tenir present que si el cable és massa llarg, llavors la caiguda de tensió que es produirà entre un extrem i l'altra del cable pot ser excessiva i inacceptable per al bon funcionament dels aparells connectats al final de la línia.
- Corrent màxim [A]: corrent eficaç màxim que el cable pot suportar en períodes prolongats sense malmetre's.

La caiguda de tensió produïda al llarg d'un cable entre els punts  $p$  i  $q$  ve expressat per l'equació (1a).

$$V_p - V_q = \frac{\rho \cdot L_{pq} \cdot I \cdot \cos \phi}{S} \quad (1a)$$

En la qual  $V_p$  i  $V_q$  són les tensions eficaces en els punts  $p$  i  $q$  respectivament,  $\rho$  és la resistivitat del cable,  $L_{pq}$  és la longitud de cable entre els punts  $p$  i  $q$ ,  $I$  és el valor eficaç del corrent elèctric,  $S$  és la secció equivalent del cable i el  $\cos \phi$  és l'anomenat *factor de potència* que indica el grau de desfasament ( $\phi$ ) entre tensió i corrent o, dit d'una altra manera, indica quin és el grau de potència activa o potència que es converteix realment en treball (es desitjable que el seu valor sigui proper a 1 perquè indica que gran part de la potència s'aprofita). Les càrregues inductives (motors, transformadors, etc.)



tendeixen a reduir (empitjorar) el factor de potència i les càrregues capacitives l'augmenten; l'ús de bancs de condensadors és la manera més usual de combatre factors de potència baixos.

Aquesta equació es pot expressar de forma equivalent, equació (1b), en la qual  $RC$  és la resistència elèctrica per unitat de longitud ( $RC=\rho/S$ ),  $fp_{pq}$  és el flux de potència o potència transferida al punt de consum  $q$  a través de la línia ( $fp_{pq}=V_n \cdot I \cdot \cos\phi$ ),  $V_n$  és la tensió nominal de la línia; aleshores  $I \cdot \cos\phi = fp_{pq}/V_n$ .

$$V_p - V_q = \frac{RC \cdot L_{pq} \cdot fp_{pq}}{V_n} \quad (1b)$$

### 3.1.7 Els mesuradors

Quan la distribució es fa a partir de microxarxes cal introduir mesuradors d'energia i de potència que permetin a les persones gestores de la xarxa controlar els consums dels diferents usuaris per fer més justos els consums realitzats. Cal tenir present que, bo i que es dimensionen les instal·lacions per a obtenir uns subministres suficients, s'ha de tenir cura de fer un ús responsable de l'energia que es consumeix per tal de no afectar la resta d'usuaris de la xarxa, i més tenint present que les fonts d'energia eòlica i solar no són constants sinó que poden estar sotmeses a períodes de poca generació durant un temps relativament prolongat.

## 3.2 El disseny de sistemes d'electrificació autònoms

En les següents subseccions es fa una anàlisi de la literatura científica que està relacionada amb la resolució del problema de disseny de sistemes d'electrificació rural autònoma que es presenta en aquesta tesi. Aquesta anàlisi ha estat abordada des de diversos enfocaments (eines d'assistència al disseny i simulació, procediments exactes i heurístics), dels quals se'n fa un repàs.

### **3.2.1 Eines d'assistència i simulació aplicades al disseny de sistemes d'electrificació**

Degut a la complexitat de dissenyar sistemes híbrids d'electrificació, en els darrers anys han aparegut diferents eines per tal d'assistir als dissenyadors. La majoria d'elles estan exclusivament focalitzades en la definició de la millor combinació de recursos d'energia [Georgopoulou *et al.*, 1997; Luna-Rubio *et al.*, 2012; Henao *et al.*, 2012; Rojas-Zerpa & Yusta, 2014] però no pas en el disseny de la xarxa de distribució. Altres eines tenen en consideració tots dos problemes però en aquests casos tots els punts de consum han d'estar connectats a una única xarxa [Thirault *et al.*, 2002; Keller *et al.*, 2007; Michelon *et al.*, 2008].

Un tipus d'eines comunes són les basades en simulació, que ajuden al dissenyador a avaluar el comportament de les diferents configuracions que vol estudiar. El procés s'inicia amb la construcció d'un model del sistema físic d'electrificació seguit d'un pla d'explotació. La decisió del dissenyador sorgirà de la verificació de la idoneïtat del model assajat o de l'elecció per comparació de diferents models assajats. És amb aquesta finalitat que Thirault *et al.* [2002] desenvolupen un software per al càlcul i comparació de costos de diferents escenaris; i mostren el seu ús per l'electrificació d'àrees rurals en els països en vies de desenvolupament. Aquest software inclou sistemes de mitja tensió, i també microxarxes de baixa tensió amb la generació distribuïda (grups diesel, microturbines i generadors eòlics). A Keller *et al.* [2007] es presenta una eina de disseny en què hi ha una primera etapa de simulació i una segona etapa de suport a la decisió; aquesta eina es dirigeix a xarxes aïllades que utilitzen fonts d'energia renovable (solar, hidràulica i eòlica) així com grups diesel i permet l'acumulació d'energia en bateries i embassaments. Aquesta mateixa eina és usada per Michelon *et al.* [2008] per dissenyar un sistema d'electrificació rural al Marroc.

### **3.2.2 Procediments exactes aplicats al disseny de sistemes d'electrificació**

L'ús de procediments exactes a partir del desenvolupament i resolució de models de programació matemàtica és una altra manera de dissenyar sistemes d'electrificació

rural. És una eina cada vegada més eficient per a resoldre problemes de la vida real com són el disseny de sistemes d'electrificació rural fent servir energies renovables [Baños *et al.*, 2011; White *et al.*, 2013]. De forma especial, la programació lineal ha estat àmpliament usada en anys recents [Kanase-Patil *et al.*, 2010; Gupta *et al.*, 2011; Mendes *et al.*, 2011] en la concepció de sistemes d'energia.

Gorien & Foote [1981], Türkay [1998] i Sempértegui *et al.* [2003] coincideixen amb la present tesi en utilitzar models de PLEM, i en incloure els costos d'inversió en la funció de cost a optimitzar. Com a característiques diferents, aquests autors presenten models de programació matemàtica per a xarxes elèctriques no específicament pensades per a àrees rurals aïllades, no incorporen el concepte de microxarxes ni d'alimentació individual en un punt, la localització de generadors no es té en compte en el model sinó l'ús d'estacions i subestacions transformadores, no incorporen acumulació d'energia en bateries i inclouen els costos per pèrdues en els diferents elements del sistema dins la funció de cost a minimitzar.

Wall *et al.* [1979], Ter-Gazarian & Kagan [1992] i Mitra *et al.* [2005] difereixen amb la present tesi en el fet que tracten amb xarxes elèctriques de mitja tensió no específicament pensades per a àrees rurals aïllades, i no incorporen acumulació d'energia en bateries. Tant Ter-Gazarian & Kagan [1992] com Mitra *et al.* [2005] dissenyen xarxes no-radials i inclouen els costos per pèrdues en la funció de cost a optimitzar. Com a fet molt característic, el model matemàtic de Wall *et al.* [1979] està formulat com a model equivalent de programació lineal d'un problema de transport en que les variables són la potència transferida d'un punt a un altre, i els costos d'aquesta transferència són els únics costos a minimitzar. Mitra *et al.* [2005] utilitzen programació dinàmica. Pel que fa a les característiques coincidents, Wall *et al.* [1979] dissenyen xarxes radials, Mitra *et al.* [2005] incorporen microxarxes, localització de generadors (sense especificar tipus) i inclouen els costos d'inversió en la funció de cost. Ter-Gazarian & Kagan [1992] utilitzen models de PLEM, incorporen generació a partir d'energies renovables, la possibilitat d'acumulació de l'energia (encara que en forma hidràulica), i inclouen els costos d'inversió en la funció de cost a minimitzar.

Díaz-Dorado *et al.* [2001], com en aquesta tesi, dissenyen xarxes rurals radials de baixa tensió, però es diferencien en que cadascuna és alimentada amb un transformador de

mitja a baixa tensió, en que el cost a minimitzar és el cost en inversió de les subestacions transformadores i dels conductors, i el cost de pèrdues elèctriques en les subestacions i en els conductors. Tampoc fan ús d'acumulació d'energia ni d'energies renovables en la generació.

Ferrer-Martí *et al.* [2011] presenten un model de PLEM per al disseny de sistemes d'electrificació rural que es caracteritza per ser el primer que incorpora la generació eòlica combinada amb la possibilitat d'alimentació individual de punts de consum i d'alimentació a partir de microxarxes. També incorpora l'acumulació en bateries i l'ús de mesuradors en les microxarxes per a la mesura de potència i energia en els punts de consums. La funció a minimitzar és la suma de costos d'inversió de tots els elements del sistema. Més tard, es desenvolupa un nou model a Ferrer-Martí *et al.* [2013] que incorpora generació solar. Aquest darrer model de PLEM mencionat ha estat usat en projectes reals a Perú [Ferrer-Martí *et al.*, 2012] i Cap Verd [Ranaboldo *et al.*, 2014b] per tal d'optimitzar el disseny de tots els components de sistemes autònoms d'electrificació: panells solars i turbines eòliques, equipament elèctric i cables. El model té en consideració les caigudes de voltatge i la variabilitat del recurs vent d'acord amb l'emplaçament de la generació eòlica en punts de demanda. Ferrer-Martí *et al.* [2013] és el model de PLEM en el qual es basa el model matemàtic presentat al capítol 4 i en el que es basaran les heurístiques proposades en aquesta tesi doctoral.

### **3.2.3 Heurístiques aplicades al disseny de sistemes d'electrificació**

L'ús d'heurístiques ha estat present en la literatura científica com una altra manera de dissenyar sistemes d'electrificació, perquè l'aplicació de mètodes exactes per a resoldre aquest tipus de problemes d'optimització combinatòria no és pràctic quan la mida dels exemplars s'incrementa, donat que es necessiten temps de computació molt alts. Per aquesta raó, comunament s'usen heurístiques per a resoldre problemes d'optimització combinatòria [Silver Edward, 2004] per tal d'obtenir solucions raonablement properes a l'òptima en un temps pràctic. Per exemple ViPOR és un procediment basat en *Simulated Annealing* (SA) que dissenya sistemes d'electrificació rural autònoma considerant generació híbrida, microxarxes i variació espacial dels recursos [Lambert & Hittle, 2000; Mitra, 2008]. ViPOR determina la localització de la

generació i la xarxa de distribució però amb algunes limitacions; en particular, assumeix recursos uniformes a tots els punts quan es tracta de generació individual, no calcula les caigudes de tensió, limita la quantitat de microxarxes i limita els punts de generació de la microxarxa. Recentment, s'ha presentat un estudi que desenvolupa un conjunt d'indicadors per a donar suport al disseny de sistemes d'electrificació rural autònoma [Ranaboldo *et al.*, 2013]. Aquests indicadors poden ser usats per a seleccionar els punts de generació de millor potencial. A més, avalua heurísticament l'adequació de la connexió (o no) dels punts a una microxarxa.

Aoki *et al.* [1990], Nara *et al.* [1992], Míguez *et al.* [2002] i Cossi *et al.* [2005] coincideixen amb aquesta tesi en dissenyar sistemes d'electrificació radials i en incloure els costos d'inversió en la funció de cost a minimitzar; però mentre que en Aoki *et al.* [1990], Míguez *et al.* [2002] i Cossi *et al.* [2005] la demanda és estacionària, Nara *et al.* [1992] inclouen demanda no estacionària. Com a característiques diferenciades d'aquesta tesi, tots quatre treballs tracten amb xarxes elèctriques de mitja tensió no específicament pensades per a àrees rurals aïllades. La localització de generadors no intervé en els seus dissenys sinó l'ús d'estacions i subestacions transformadores, i no incorporen acumulació d'energia en bateries. Per altra banda, inclouen costos d'operació dins la funció de cost –Míguez *et al.* [2002] hi afegeixen, a més, costos de qualitat de subministrament –. Pel que fa al disseny dels seus respectius sistemes d'electrificació, el tres primers treballs utilitzen l'estratègia iterativa d'intercanviar conductors de la xarxa –*Branch-exchange*– a partir d'una solució inicial amb l'objectiu d'anar reduint, en cada intercanvi, els costos d'inversió i els costos d'operació, sense violar les restriccions del seu problema. Com a característica pròpia, Míguez *et al.* [2002] admeten l'ús de punts de bifurcació de les xarxes fora dels punts de consum. Cossi *et al.* [2005] presenten la planificació de circuits de distribució secundària, per a això utilitzen un model de programació no lineal entera mixta (PNLEM) que resolen proposant un *Evolutionary algorithm* dissenyats per ells.

Ponce de Leao & Matos (1999) & Díaz-Dorado *et al.* [2003] coincideixen gairebé en tot amb les característiques principals dels quatre articles anteriors: demanda estacionària, xarxes de mitja tensió no específiques per a entorns rurals aïllats, sense generació ni acumulació d'energia, i inclusió de costos d'inversió i operació –però, a més, Ponce de Leao & Matos [1999] coincideixen en incloure costos de qualitat de subministrament; i

com a característica particular, es parteix d'un model de programació entera-mixta que conté representació *fuzzy* d'algunes variables i restriccions—. El seu problema es resol amb un algorisme de *Simulated annealing* (SA). Díaz-Dorado *et al.* [2003] presenten un algorisme basat en estratègia evolutiva per a dissenyar les connexions, en que la localització de les subestacions i les estacions de commutació, a més de les dels punts de consum, són dades inicials.

Quintana *et al.* [1993] coincideixen amb la present tesi en la forma radial de les xarxes i en incloure els costos d'inversió en la funció de cost a minimitzar. Com a característiques diferenciades d'aquesta tesi, tracten amb problemes de demanda no estacionària, xarxes elèctriques de mitja tensió no pensades per àrees rurals aïllades, no es determinen els elements de generació, no s'hi incorporen bateries, i sí que inclouen costos d'operació dins la funció de cost. Pel que fa a la resolució, Quintana *et al.* [1993] divideixen el disseny en dues etapes: com a primera, agrupament (fase 1) i previsió (fase 2); i planificació com a segona. En la primera etapa, el problema de l'increment de consum al llarg dels anys es resol en dues fases. La primera fase divideix l'àrea a electrificar en subàrees menors amb els punts de consum sumats per a formar un únic nus de consum; la segona fase avalua la previsió del consum en l'horitzó d'anys a planificar per cada nus de consum. La segona etapa (planificació) es divideix també en dues fases. En la primera fase, utilitzant un model de programació no lineal, es determinen les instal·lacions necessàries, però no es determinen encara quan s'han d'instal·lar (problema òptim estàtic). En la segona fase, per a cada any, es determina un sistema òptim comptant només amb l'equipament del problema òptim estàtic i utilitzant un model de programació no lineal. D'aquesta manera es determina la planificació d'expansió de les instal·lacions any a any.

El problema que presenten Lambert & Hittle [2000] és, de tots, el més semblant d'aquesta tesi: xarxes d'estructura radial, pensat per entorns rurals aïllats, admet generació independent per a un únic punt de consum i fonts alternatives (solar, eòlica, etc), no admet punts de bifurcació fora dels punts de consum i la demanda és estacionària, s'hi inclou el concepte de microxarxa i l'ús d'acumuladors d'energia. Com a característiques diferents: es treballa amb xarxes de mitja i baixa tensió amb transformadors, només admet el disseny d'una única microxarxa, no es tenen en compte les caigudes de tensió, i inclou costos d'inversió i d'operació al llarg del cicle de vida

del projecte. Pel que fa a la resolució del seu problema, en un primer nivell es dissenya la configuració dels transformadors i els conductors del sistema de mitja tensió, per al qual es desenvolupen dos algorismes diferents: un algorisme d'enumeració exhaustiva i un algorisme de *Simulated annealing* (SA). En un segon nivell es dissenya el sistema de distribució de baixa tensió al voltant de cadascun dels transformadors. Es desenvolupen tres algorismes diferents per a resoldre aquest nivell: per a casos amb pocs punts es fa servir un algorisme d'enumeració exhaustiva, i per a la resta de casos un algorisme que resol el problema *Minimum spanning tree* (MST) o un algorisme de SA. Els millors resultats obtinguts sorgeixen de la combinació de SA en el primer nivell i, per al segon nivell, l'algorisme que resol MST com a primera etapa per aportar una solució de partida, i SA, en una segona etapa.

### **3.2.4 Heurístiques basades en PLEM aplicades al disseny d'altres tipus de xarxes**

Fins on es sap, no apareix a la literatura treballs d'ús de heurístiques basades en PLEM aplicades als sistemes d'electrificació rural autònoma que aborda aquesta tesi. Amb la finalitat d'estudiar l'adaptabilitat d'aquestes heurístiques al problema que es tracta a la tesi, s'han cercat articles que mostrin el seu ús en problemes de disseny d'altres tipus de xarxes.

En el disseny d'una xarxa de telecomunicacions, Fischetti *et al.* [2004] utilitzen una heurística basada en una variació de *Local Branching* (LB) –que és un mètode exacte que, limitant el temps, es transforma en una heurística basada en programació matemàtica–, que anomenen *Diversification, Refining and Tight-refining* (DRT), i la comparen, sobre diferents exemplars, amb *Tabu Search* (TS), *Variable Neighbourhood Search* (VNS) i l'heurística LB original proposada per Fischetti & Lodi [2002]. Els resultats de la funció objectiu són sempre millors (menor cost) per DRT en comparació amb la resta d'heurístiques en tots els exemplars experimentats. Thomadsen & Stidsen [2007] apliquen al disseny de xarxes de telecomunicació una algorisme *Branch-cut-and-price* sobre un model de programació entera mixta (PEM), en el qual es relaxen les variables binàries del model matemàtic i algunes restriccions; en l'algorisme es van fixant també els valors d'algunes variables binàries corresponents a l'existència, o no,

de nodes i de branques de connexió de les xarxes de comunicació. Segons els autors, l'algorisme és eficient comparat amb la resolució de model de PEM. Sridhar *et al.* [2000] desenvolupen una heurística basada en PLEM en la qual es relaxa el model matemàtic, que apliquen a la determinació de la topologia d'una xarxa *LAN token ring* que garanteix la no existència de congestions, arribant a conclusions pràctiques sobre la factibilitat dels components a utilitzar segons les condicions de densitat de tràfic de dades.

En conclusió, fins on es sap, les heurístiques basades en PLEM no s'han fet servir per resoldre el disseny de sistemes d'electrificació rural que aborda aquesta tesi. Tanmateix, l'ús exitós d'aquests tipus d'heurístiques en altres problemes de xarxes permet considerar l'adequació del seu ús en el disseny de sistemes d'electrificació rural.



## 4. Un model matemàtic del problema d'electrificació rural autònoma

Aquesta tesi desenvolupa diverses heurístiques basades en un model matemàtic de PLEM. El model de PLEM usat és una adaptació del model presentat per Ferrer-Martí *et al.* [2013]. Aquesta adaptació s'ha fet amb la finalitat de dissenyar les heurístiques que es proposen aquí. A partir d'ara, aquest nou model adaptat serà anomenat MERAES (model d'electrificació rural autònoma amb generació eòlica i solar).

En l'apartat 4.1 s'introdueix el model MERAES i en l'apartat 4.2 s'enumeren els canvis respecte el model proposat a Ferrer-Martí *et al.* [2013].

### 4.1 Descripció del model MERAES

La descripció del model MERAES es presenta a continuació: en primer lloc es fa la presentació de les dades; en segon lloc de les variables; i, finalment, de la funció objectiu i les restriccions.

- **Dades del model**

A continuació s'introdueixen les dades i es classifiquen de la següent manera: segons que siguin dades referides a la demanda, a l'emmagatzemament, a la definició de la xarxa, a la generació eòlica, a la generació solar i, finalment, a altres components.

- **Dades referides a la demanda:**

$D$  Conjunt de punts de demanda (habitatges, centres de salut, escoles, comerços, etc.) que, a més, també són els candidats a ser punts de generació.

$L_{pq}$  Distància [m] entre el punt  $p$  i el punt  $q$ ;  $p \in D$ ,  $q \in D \setminus \{p\}$ .

$PD_p, ED_p$  Demanda de potència [W] i energia [Wh/dia] del punt  $p$ , respectivament;  $p \in D$ .

$VB$  Temps d'autonomia [dies] que les bateries han de tenir.

– **Dades referides a l'emmagatzemament:**

$B$	Nombre de tipus de bateries.
$DB$	Factor de descàrrega de les bateries [%].
$CB_b, EB_b$	Cost [\$] i capacitat equivalent [Wh] d'una bateria de tipus $b$ , respectivament; $b = 1, \dots, B$ .
$\eta_{bat}$	Eficiència [fracció d'unitat] de les bateries.

– **Dades referides a la definició de la xarxa:**

$C$	Nombre de tipus de cables.
$CC_c$	Cost [\$/m] del cable de tipus $c$ , incloent-hi el cost d'infraestructura; $c = 1, \dots, C$ .
$RC_c, IC_c$	Resistència [ $\Omega/m$ ] i corrent màxim [A] admès pel cable de tipus $c$ , respectivament; $c = 1, \dots, C$ .
$V_n$	Voltatge nominal admès [V].
$V_{min}, V_{max}$	Voltatge mínim i màxim admès [V], respectivament.
$cdt_{max}$	Màxima caiguda de voltatge admesa [fracció d'unitat] = $(V_{max} - V_{min}) / V_n$ .
$\eta_{cab}$	Eficiència de caiguda de voltatge [fracció d'unitat] = $1 - cdt_{max}$ .

– **Dades referides a la generació eòlica:**

$A, NA$	Nombre de tipus de turbines eòliques i límit superior del nombre de turbines eòliques que poden ser instal·lades en un punt específic, respectivament.
$EA_{pa}$	Energia generada [Wh/dia] per una turbina eòlica situada al punt $p$ de tipus $a$ ; $p \in D$ , $a = 1, \dots, A$ .
$CA_a$	Cost [\$] d'una turbina eòlica de tipus $a$ ; $a = 1, \dots, A$ .

– **Dades referides a la generació solar:**

$S, NS$	Nombre de tipus de panells solars i límit superior del nombre de panells solars que poden ser instal·lats en un punt específic, respectivament.
$ES_s$	Energia generada [Wh/dia] per un panell solar de tipus $s$ ; $s = 1, \dots, S$ .

$CS_s, PS_s$	Cost [\$] i potència màxima [W] d'un panell solar de tipus $s$ , respectivament; $s = 1, \dots, S$ .
$R$	Nombre de tipus de reguladors solars.
$CR_r, PR_r$	Cost [\$] i potència màxima [W] d'un regulador solar de tipus $r$ , respectivament; $r = 1, \dots, R$ .

– **Dades referides a altres components:**

$I, NI$	Nombre de tipus d'inversors i límit superior del nombre d'inversors que poden ser instal·lats en un punt específic, 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 [\$].
$\eta_{inv}$	Eficiència [fracció d'unitat] dels inversors.

• **Variables**

A continuació es presenten les variables del model:

– **Variables binàries:**

$x_p$	el seu valor indica si hi ha instal·lat algun generador (eòlic o solar) al punt $p$ . Si és així, el valor és 1 i 0 en cas contrari; $p \in D$ .
$x_{C_{pq}}$	el seu valor indica si hi ha connexió des del punt $p$ fins al punt $q$ amb un cable de tipus $c$ . Si és així, el valor és 1 i 0 en cas contrari; $p \in D$ , $q \in D \setminus \{p\}$ , $c = 1, \dots, C$ .
$x_{CC_{pq}}$	el seu valor indica si hi ha connexió des del punt $p$ fins al punt $q$ (sense tenir en compte el tipus de cable). Si és així, el valor és 1 i 0 en cas contrari; $p \in D$ , $q \in D \setminus \{p\}$ .
$x_{m_p}$	el seu valor indica si hi ha instal·lat un mesurador al punt $p$ (i, d'aquesta manera, el punt $p$ és part d'una microxarxa). Si és així, el valor és 1 i 0 en cas contrari; $p \in D$ .

– **Variables enteres:**

- $xa_{pa}$  el seu valor indica el nombre de turbines eòliques (amb els seu corresponent regulador) que estan instal·lades al punt  $p$  de tipus  $a$ ;  $p \in D$ ,  $a = 1, \dots, A$ .
- $xs_{ps}$  el seu valor indica el nombre de panells solars instal·lats al punt  $p$  de tipus  $s$ ;  $p \in D$ ,  $s = 1, \dots, S$ .
- $xrs_{pr}$  el seu valor indica el nombre de reguladors solars instal·lats al punt  $p$  de tipus  $r$ ;  $p \in D$ ,  $r = 1, \dots, R$ .
- $xb_{pb}$  el seu valor indica el nombre de bateries instal·lades al punt  $p$  de tipus  $b$ ;  $p \in D$ ,  $b = 1, \dots, B$ .
- $xi_{pi}$  el seu valor indica el nombre d'inversors instal·lats al punt  $p$  de tipus  $i$ ;  $p \in D$ ,  $i = 1, \dots, I$ .

– **Variables contínues:**

- $fe_{pq}$  el seu valor indica el flux d'energia [Wh/dia] des del punt  $p$  fins al punt  $q$ ;  $p \in D$ ,  $q \in D \setminus \{p\}$ .
- $fp_{pq}$  el seu valor indica el flux de potència [W] des del punt  $p$  al punt  $q$ ;  $p \in D$ ,  $q \in D \setminus \{p\}$ .
- $v_p$  el seu valor indica el voltatge [V] al punt  $p$ ,  $v_p \in [V_{min}, V_{max}]$ ;  $p \in D$ .

• **Funció objectiu**

La funció objectiu (2) minimitza el cost,  $Z$ , de la inversió inicial considerant els costos de material i infraestructures de generadors eòlics i solars, reguladors, bateries, inversors, cables i mesuradors (només en els punts que formen part de microxarxes).

$$[MIN] Z = \sum_{p \in D} \sum_{a=1}^A CA_a \cdot xa_{pa} + \sum_{p \in D} \sum_{s=1}^S CS_s \cdot xs_{ps} + \sum_{p \in D} \sum_{r=1}^R CR_r \cdot xrs_{pr} + \sum_{p \in D} \sum_{b=1}^B CB_b \cdot xb_{pb} + \sum_{p \in D} \sum_{i=1}^I CI_i \cdot xi_{pi} + \sum_{p \in D} \sum_{q \in D \setminus \{p\}} \sum_{c=1}^C L_{pq} \cdot CC_c \cdot xc_{pqc} + \sum_{p \in D} CM \cdot xm_p \quad (2)$$

- **Restriccions**

A continuació es presenten les restriccions classificades com a restriccions de generació i emmagatzematge d'energia, restriccions de microxarxa i restriccions referides a altre equipament :

- **Generació i emmagatzematge d'energia:**

Les restriccions (3) i (4) limiten el nombre de generadors eòlics i solars, respectivament, i defineixen els punts de generació. Les restriccions (5) imposen almenys un generador (eòlic o solar) a cada punt de generació. Les restriccions (6), (7) i (8) són els balanços de flux d'energia, de flux de potència i d'energia a les bateries, respectivament [Ferrer-Martí *et al.*, 2011; Ferrer-Martí *et al.*, 2013]. Les restriccions (6) imposen les condicions de conservació d'energia i la satisfacció dels requeriments de demanda d'energia: a cada punt, el flux d'energia entrant més la possible energia generada amb turbines eòliques o panells solars han de satisfer la demanda d'energia del punt (considerant les pèrdues) més la demanda d'energia dels següents punts de la microxarxa (si n'hi ha). Les restriccions (7) són anàlogues a les restriccions (6) per a la conservació i satisfacció dels requeriments de demanda de potència. Les restriccions (8) estableixen l'energia que s'ha d'emmagatzemar a les bateries: per a cada punt, si és un punt de generació, l'energia de les bateries ha de satisfer els requeriments de demanda del propi punt i de la resta de punts de la microxarxa (si n'hi ha), considerant l'autonomia i el nivell de descàrrega admès.

$$\sum_{a=1}^A xa_{pa} \leq NA \cdot x_p \quad p \in D \quad (3)$$

$$\sum_{s=1}^S xs_{ps} \leq NS \cdot x_p \quad p \in D \quad (4)$$

$$\sum_{a=1}^A xa_{pa} + \sum_{s=1}^S xs_{ps} \geq x_p \quad p \in D \quad (5)$$

$$\sum_{q \in D \setminus \{p\}} fe_{qp} + \sum_{a=1}^A EA_{pa} \cdot xa_{pa} + \sum_{s=1}^S ES_{ps} \cdot xs_{ps} \geq \frac{ED_p}{\eta_{bat}\eta_{inv}} \cdot \left( \frac{1}{\eta_{cab}} + \left( 1 - \frac{1}{\eta_{cab}} \right) \cdot x_p \right) + \sum_{q \in D \setminus \{p\}} fe_{pq} \quad p \in D \quad (6)$$

$$\sum_{q \in D \setminus \{p\}} fp_{pq} + \sum_{i=1}^I PI_i \cdot xi_{pi} \geq PD_p \cdot \left( \frac{1}{\eta_{cab}} + \left( 1 - \frac{1}{\eta_{cab}} \right) \cdot x_p \right) + \sum_{q \in D \setminus \{p\}} fp_{pq} \quad p \in D \quad (7)$$

$$\sum_{b=1}^B EB_b \cdot xb_{pb} + \left( \frac{VB}{DB} \cdot \sum_{j \in D} \frac{ED_j}{\eta_{bat} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{cab}} \right) \cdot (1 - x_p) \geq \frac{VB}{DB} \cdot \left( \sum_{q \in D \setminus \{p\}} fe_{pq} + ED_p \right) \quad p \in D \quad (8)$$

- **Microxarxa:**

Les restriccions de microxarxa estableixen el flux possible i màxim d'energia i de potència. Les restriccions (9) i (10) condicionen el flux d'energia i de potència, respectivament, a l'existència de cable: entre dos punts només hi pot haver flux d'energia i de potència si hi ha cable entre ells. Les restriccions (11) determinen la distribució radial de les microxarxes. Les restriccions (12) limiten la caiguda de voltatge entre dos punts connectats entre ells amb un cable d'un tipus concret; aquesta caiguda depèn de la llargada de cable, de la seva resistència i del flux de potència. Les restriccions (13) limiten la intensitat màxima en un cable depenent del seu tipus. Les restriccions (14) estableixen que dos punts estan connectats si hi ha un cable de qualsevol tipus entre ells.

$$fe_{pq} \leq \left( \sum_{j \in D} \frac{ED_j}{\eta_{bat} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{cab}} \right) \cdot \sum_{c=1}^C xc_{pqc} \quad p \in D; q \in D \setminus \{p\} \quad (9)$$

$$fp_{pq} \leq \left( \sum_{j \in D} \frac{PD_j}{\eta_{cab}} \right) \cdot \sum_{c=1}^C xc_{pqc} \quad p \in D; q \in D \setminus \{p\} \quad (10)$$

$$\sum_{q \in D \setminus \{p\}} \sum_{c=1}^C xc_{qpc} + x_p \leq 1 \quad p \in D \quad (11)$$

$$v_p - v_q \geq \frac{L_{pq} \cdot RC_c \cdot fp_{pq}}{V_n} - (V_{\max} - V_{\min}) \cdot (1 - xc_{pqc}) \quad p \in D; q \in D \setminus \{p\}; c = 1, \dots, C \quad (12)$$

$$\frac{fp_{pq}}{V_n} - \left( \sum_{j \in D} \frac{PD_j}{V_{\min} \eta_{cab}} \right) \cdot (1 - xc_{pqc}) \leq IC_c \quad p \in D; q \in D \setminus \{p\}; c = 1, \dots, C \quad (13)$$

$$xcc_{pq} = \sum_{c=1}^C xc_{pqc} \quad p \in D; q \in D \setminus \{p\} \quad (14)$$

– *Altres components:*

Les restriccions (15) defineixen el nombre de reguladors solars depenent de la potència dels generadors solars corresponents. Les restriccions (16) determinen que els inversors només es poden situar als punts de generació i també limiten el nombre d'inversors. Les restriccions (17) i (18) estableixen que s'han de situar mesuradors de consum elèctric als punts de demanda alimentats per una microxarxa.

$$\sum_{r=1}^R PR_r \cdot xrs_{pr} \geq \sum_{s=1}^S PS_s \cdot xs_{ps} \quad p \in D \quad (15)$$

$$xi_{pi} \leq NI \cdot x_p \quad p \in D; i = 1, \dots, I \quad (16)$$

$$\sum_{q \in D \setminus \{p\}} \sum_{c=1}^C xc_{pqc} \leq (|D|-1) \cdot xm_p \quad p \in D \quad (17)$$

$$\sum_{q \in D \setminus \{p\}} \sum_{c=1}^C xc_{qpc} \leq xm_p \quad p \in D \quad (18)$$

## 4.2 Adaptacions introduïdes a MERAES

Les adaptacions introduïdes a MERAES respecte al model de PLEM original presentat a Ferrer-Martí *et al.* [2013] han estat les següents:

- Per tal d'estendre l'espai de solucions, MERAES no té cap límit per a la llargada màxima de cable permesa en la connexió entre dos punts, límit sí present a Ferrer-Martí *et al.* [2013].
- S'han afegit unes variables binàries, les variables  $xcc_{pq}$ , que representen l'existència d'una connexió entre els punts  $p$  i  $q$ , que són necessàries en les heurístiques proposades, tal com es veurà al Capítol 5.





## **5. Heurístiques per dissenyar sistemes d'electrificació rural autònoma basades en PLEM**

En les properes subseccions es presenten tres procediments heurístics diferents basats en PLEM, concretament en el model MERAES, per a resoldre el problema de disseny de sistemes d'electrificació rural autònoma formats per microxarxes alimentades per generadors solars i eòlics situats a un dels punts de demanda de cada microxarxa, i permetent la possibilitat d'alimentació individual. Aquests tres procediments heurístics són: heurístiques de Relaxament i fixació, heurístiques basades en el *Corridor Method*, i unes heurístiques adhoc anomenades de Radis creixents. Tots tres procediments heurístics comparteixen el fet que tenen una primera etapa en la qual es resol el model MERAES relaxat per tal d'obtenir ràpidament una solució inicial. Aquesta solució, que és normalment infactible, s'usa com a punt d'arrencada per a explorar un espai de cerca restringit i factible. Els tres procediments heurístics proposats difereixen entre ells en les estratègies de restricció de l'espai de cerca i en la seva exploració. En les heurístiques de Relaxament i fixació es fixen alguns grups de variables relacionades amb l'existència de connexions de les microxarxes o amb l'existència de generadors (secció 5.1). En les heurístiques basades en el *Corridor Method* es limita el nombre total de connexions (secció 5.2). En les heurístiques de Radis creixents les connexions fixades són aquelles que estan contingudes en una àrea geogràfica creixent (secció 5.3). En les següents seccions s'expliquen amb detall els tres tipus d'heurístiques.

### **5.1 Heurístiques de Relaxament i fixació (RF)**

En aquesta subsecció, es proposen diverses heurístiques de Relaxament i fixació (RF). Donat un model de PLEM, la clau del procediment de Relaxament i fixació introduïda per Dillenberger *et al.* [1994] és la següent. En primer lloc, només es mantenen com a variables binàries i enteres un subconjunt reduït d'aquestes variables (variables no relaxades), les altres variables binàries i enteres es relaxen (variables relaxades) a valors

reals, entre 0 i 1 en el cas de les binàries, i seguidament es resol el model de programació matemàtica resultant. En segon lloc, els valors d'algunes de les variables binàries (incloses entre les variables no relaxades) es fixen d'acord amb la solució obtinguda i, finalment, es resol el model resultant sense cap variable relaxada.

S'han dissenyat diverses heurístiques RF. Totes elles consten de dues etapes, ST1 i ST2. ST1 consisteix en resoldre una versió relaxada de MERAES, considerant algunes variables binàries i variables enteres com a variables contínues. ST2 comença a partir de la solució obtinguda del model relaxat resolt a ST1. La solució de ST1, òbviament, no és necessàriament una solució factible. A ST2 es fixen els valors d'algunes variables (als valors de les variables no relaxades de la solució obtinguda a ST1) i després es resol MERAES. La solució obtinguda a ST2 és la solució que retorna l'heurística de RF.

Les heurístiques de RF proposades difereixen entre elles exclusivament en les variables a relaxar en la primera etapa (ST1) i/o les variables a fixar en la segona etapa (ST2).

### 5.1.1 Esquema general de les heurístiques de RF

Detallades formalment, les etapes de les heurístiques de RF són:

1. Sigui  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  el conjunt de variables enteres (incloent-hi les binàries) de MERAES, on  $N = |X|$  i  $x_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) són el nombre de variables enteres i la  $i$ -èsima variable entera, respectivament.

ST1:

2. Sigui  $IR = \{r_1, r_2, \dots, r_{N_1}\} \subseteq \{1, \dots, N\}$  el conjunt d'índexs de les variables enteres a relaxar, on  $N_1 = |IR|$  i  $x_r$  ( $r \in IR$ ) són el nombre de variables i la  $r$ -èsima variable a relaxar, respectivament.

3. Es resol MERAES relaxant el tipus binari o enter de les variables  $x_r$  ( $r \in IR$ ):  
Sigui  $\bar{x}_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) el valor de la variable  $x_i$  de la solució obtinguda.

ST2:

4. Sigui  $IF = \{f_1, f_2, \dots, f_{N_2}\} \subseteq \{1, \dots, N\} \setminus IR$  el conjunt d'índexs de les variables a fixar, on  $N_2 = |IF|$  i  $x_f$  ( $f \in IF$ ) són el nombre de variables i la  $f$ -èsima variable a fixar, respectivament.

5. Es fixen els valors de les variables  $x_f$  als valors obtinguts al pas 3; i.e.,  $x_f = \bar{x}_f$  ( $f \in IF$ ).

6. Es resol MERAES (sense relaxar cap variable) i es retorna la solució obtinguda.

### 5.1.2 Variables a relaxar

Per tal de concretar les variables a relaxar es va realitzar un experiment computacional preliminar. Com a resultat, s'observa que les variables que representen el nombre de turbines eòliques del tipus  $a$  al punt  $p$  ( $xa_{pa}$ ) i de panells fotovoltaics de tipus  $s$  al punt  $p$  ( $xs_{ps}$ ) no són candidates apropiades per a ser relaxades. La raó és que, degut a economies d'escala i al relaxament d'aquestes variables, les solucions obtingudes a l'etapa ST1 tendeixen fortament a no tenir microxarxes i a situar en cada punt de consum fraccions dels generadors més potents (donat que aquests generadors tenen les raons cost/potència més baixos). Conseqüentment, aquests resultats no són útils per a fixar els valors de variables en l'etapa ST2, de la mateixa manera no són bona referència de quines microxarxes són part d'una bona solució. Per altra banda, degut a un fenomen oposat, relaxar totes les variables relacionades amb l'existència de cable d'un tipus (tant  $xcc_{pq}$  com  $xc_{pqc}$ ) tendeix, en l'etapa ST1, a estendre excessivament les microxarxes situant fraccions de diferents tipus de cables.

Per a definir el conjunt de variables candidates a relaxar en l'etapa ST1, es varen considerar aquelles variables que representen al nombre de bateries de tipus  $b$  al punt  $p$  ( $xb_{pb}$ ), el nombre d'inversors de tipus  $i$  al punt  $p$  ( $xi_{pi}$ ), el nombre de reguladors de tipus  $r$  al punt  $p$  ( $xrs_{pr}$ ), l'existència del cable de tipus  $c$  des del punt  $p$  al punt  $q$  ( $xc_{pqc}$ ) i l'emplaçament del mesurador elèctric al punt  $p$  ( $xm_p$ ). Es proposen quatre opcions de

relaxament (R1-R4), que es mostren a la Taula 5.1. En un experiment preliminar varen ser testades i finalment descartades altres combinacions de relaxaments.

**Taula 5.1 – Quatre opcions de relaxament. El símbol ✓ (✗) indica que les variables estan (no estan) relaxades.**

Opció de relaxament	$xb_{pb}$	$xi_{pi}$	$xrs_{pr}$	$xc_{pq}$	$xm_p$
R1	✓	✓	✓	✓	✓
R2	✓	✓	✓	✗	✓
R3	✗	✓	✓	✓	✓
R4	✓	✗	✓	✓	✓

### 5.1.3 Variables a fixar

En relació a les variables a fixar en l'etapa ST2, s'han proposat sis opcions de fixació (F1 - F6) sobre les variables d'existència de connexió des del punt  $p$  al punt  $q$ ,  $xcc_{pq}$ , o de les variables d'existència de generació en el punt  $p$  ( $x_p$ ). Siguin  $\overline{xcc}_{pq}$  i  $\overline{x}_p$  els valors de les variables  $xcc_{pq}$  i  $x_p$  de la solució obtinguda a l'etapa ST1, respectivament. Les diferents opcions es descriuen a continuació:

F1. Es fixa l'existència de connexió entre dos punts (l'absència no és fixada). És a dir,  $xcc_{pq} = 1$  ( $p \in D; q \in D \setminus \{p\}; \overline{xcc}_{pq} = 1$ ).

F2. Es fixa l'absència de connexió entre dos punts (l'existència no és fixada). És a dir,  $xcc_{pq} = 0$  ( $p \in D; q \in D \setminus \{p\}; \overline{xcc}_{pq} = 0$ ).

F3. Es fixen l'existència i l'absència de connexió entre dos punts. És a dir,  $xcc_{pq} = \overline{xcc}_{pq}$  ( $p \in D; q \in D \setminus \{p\}$ ).

F4. Es fixa l'existència de generació en un punt (l'absència no és fixada). És a dir,  $x_p = 1$  ( $p \in D; \overline{x}_p = 1$ ).

F5. Es fixa l'absència de generació en un punt (l'existència no és fixada). És a dir,  $x_p = 0$  ( $p \in D; \overline{x}_p = 0$ ).

F6. Es fixen l'existència i l'absència de generació en un punt. És a dir,  $x_p = \bar{x}_p$  ( $p \in D$ ).

Les combinacions entre F1, F2 i F3 amb F4, F5 i F6 no varen ser considerades donat que, per una banda, l'espai de cerca a explorar és reduïda (per tant només es podrien aconseguir iguals o pitjors solucions) i degut a que, per altra banda, les opcions F1 fins a F6 requereixen uns temps de computació baixos, cosa que no fa necessària la reducció de l'espai de cerca (els resultats es mostren en el capítol 6).

#### 5.1.4 Heurístiques RF proposades

En total es proposen vint-i-quatre heurístiques de Relaxament i fixació, que sorgeixen de combinar les quatre opcions de variables a relaxar en l'etapa ST1 (R1-R4) i les sis opcions de variables a fixar en l'etapa ST2 (F1-F6). Sigui  $RFab$  ( $a=1,\dots,4$ ;  $b=1,\dots,6$ ) l'heurística amb l'opció de relaxament  $Ra$  i l'opció de fixació  $Fb$ .

Finalment, cal dir que el temps de càlcul estarà limitat i, per aquesta raó, s'introdueixen dos paràmetres,  $T_1^{RF}$  i  $T_2^{RF}$ , que són els temps màxims de resolució de les etapes ST1 i ST2, respectivament.

## 5.2 Heurístiques basades en el *Corridor Method* (BCM)

El concepte general del *Corridor Method* (CM) ha estat presentat com una metaheurística híbrida, que enllaça la programació matemàtica amb heurístiques [Sniedovich & Voß 2006, Maniezzo & Voß 2009]. CM està basat en l'ús d'un mètode exacte aplicat a un subespai de l'espai de solucions d'un problema específic. Donat un problema d'optimització, sigui  $X$  l'espai factible i sigui  $M$  un mètode exacte (per a aquesta tesi, MERAES) que és ineficient per a exemplars grans del problema però eficient per a exemplars petits.

CM defineix un veïnat, o *corridor*, construït adaptant-lo al mètode  $M$  usat per a explorar-lo: sigui  $\bar{x} \in X$  una solució en curs, a partir de la qual CM construeix un veïnat,  $N(\bar{x})$ , que pot ser explorat de forma eficient pel mètode  $M$ .  $N(\bar{x})$  hauria de ser raonablement gran i construït de tal manera que pogués ser explorat en un temps (pseudo) polinòmic fent servir el mètode  $M$  [Caserta *et al.*, 2011]. Normalment, el *corridor*  $N(\bar{x})$  al voltant d'una solució actual és definit imposant restriccions exògenes al problema original per tal d'identificar una porció limitada de l'espai de cerca [Caserta & Voß, 2009].

Així doncs, com a segona proposta, s'han desenvolupat diverses heurístiques PLEM basades en el *Corridor Method* (BCM). Totes aquestes heurístiques estan basades en cercar iterativament en el veïnat de la solució en curs.

### 5.2.1 La definició del veïnat

Donat que, en la present tesi, el mètode  $M$  és un model de PLEM, la implementació del *corridor* s'ha de realitzar a través de restriccions del PLEM. Les restriccions proposades per a la implementació del *corridor* que defineix  $N(\bar{x})$  són les següents:

- El nombre de canvis de connexions i desconexions entre punts de demanda, entre la solució en curs i una solució veïna, és limitada a un valor  $L$ , tal com es formula a (19) i (20), respectivament:

$$\sum_{p \in D} \sum_{\substack{q \in D \setminus \{p\}: \\ \bar{x}_{cc_{pq}} = 0}} x_{cc_{pq}} \leq L \quad (19)$$

$$\sum_{p \in D} \sum_{\substack{q \in D \setminus \{p\}: \\ \bar{x}_{cc_{pq}} = 1}} (1 - x_{cc_{pq}}) \leq L \quad (20)$$

Les restriccions (19) i (20) defineixen el *corridor* al voltant del nombre de canvis de connexions i desconexions. Un experiment computacional preliminar va mostrar que aquestes restriccions no redueixen prou l'espai de solucions per a ser explorat eficientment. Així doncs, es proposen les restriccions addicionals (21) - (23) per tal

d'obtenir un veïnat suficientment petit que pugui ser explorat en un temps pràctic. Aquestes restriccions addicionals impossibiliten, entre la solució en curs i una solució veïna, tres coses: i) que canviï de sentit el corrent de cap de les connexions entre punts; ii) que es connectin punts de consum que no estiguessin ja connectats a cap microxarxa a la solució en curs; iii) que es connectin punts separats per una distància superior a la *distància de punt mort*,  $DPM_{pq}$ .  $DPM_{pq}$  és la distància amb un cost de connexió igual al cost màxim d'electrificar individualment els punts  $p$  i  $q$ . Així doncs,  $DPM_{pq}$  és una estimació de la distància de punt mort fins la qual pot sortir a compte econòmicament connectar tots dos punts en comptes d'electrificar-los tots dos de forma individual. Aquestes tres restriccions addicionals s'expressen de la següent forma:

- No es permeten el canvis de sentit dels corrents:

$$x_{cc_{qp}} = 0 \quad p \in D; q \in D \setminus \{p\} : \overline{x_{cc_{pq}}} = 1 \quad (21)$$

- No es permeten les connexions entre dos punts que no estiguin connectats ja a cap microxarxa de la solució en curs, on  $NC = \left\{ p \in D : \forall_{q \in D \setminus \{p\}} \overline{x_{cc_{pq}}} + \overline{x_{cc_{qp}}} = 0 \right\}$ :

$$x_{cc_{pq}} = 0 \quad p \in NC; q \in NC \setminus \{p\} \quad (22)$$

- No es permeten les connexions entre dos punts  $p$  i  $q$  entre els quals hi hagi una distància més gran que la seva *distància de punt mort*,  $DPM_{pq}$ :

$$x_{cc_{pq}} = 0 \quad p \in D; q \in D \setminus \{p\} : L_{pq} > DPM_{pq} \quad (23)$$

## 5.2.2 Esquema general de les heurístiques BCM

El pseudo-codi de les heurístiques BCM desenvolupades és tal com es mostra seguidament a la Figura 5.1:

---

1. S'aplica el pas ST1 de les heurístiques de RF (veure Secció 5.1.1) i sigui  $\bar{x}$  la solució obtinguda.

2. Procés local de cerca:

**Mentre** (no *Condició d'acabament*) **fes**

Es construeix el veïnat  $N(\bar{x})$  afegint les restriccions de (19) a (23) a MERAES.

Es resol MERAES (sense relaxar cap variable) i es retorna la nova solució en curs,  $\bar{x}$ .

**fi de mentre**

---

**Figura 5.1 – Pseudocodi de les heurístiques BCM**

Finalment, cal dir que el temps de càlcul estarà limitat i, per aquesta raó, s'introdueixen dos paràmetres,  $T_1^{BCM}$  i  $T_2^{BCM}$ , que són el temps màxim de resolució en els passos 1 (solució inicial) i 2 (cerca local) de l'algorisme, respectivament.

La *Condició d'acabament* s'esdevé quan la solució en curs no millora en una iteració o quan s'assoleix el temps límit,  $T_1^{BCM} + T_2^{BCM}$ .

### 5.2.3 Heurístiques BCM proposades

S'han proposat quatre heurístiques BCM com a resultat de les quatre opcions de relaxament en el pas ST1, R1 fins R4, introduïdes a la Secció 5.1.2, usades per aconseguir una primera solució per tal de començar el procés de cerca local. Per anomenar-les s'ha fet servir la següent nomenclatura: el nom BCM $a$  es refereix a l'heurística amb l'opció de relaxament  $Ra$  ( $a = 1, \dots, 4$ ).

## 5.3 Heurístiques de Radis creixents (RC)

La idea general de les heurístiques de Radis creixents (RC) és la de construir solucions parcials en una regió al voltant d'una esfera amb centre en un dels punts d'habitatge, i anar engrandint la construcció d'aquestes solucions parcials a mida que creix el radi



d'aquesta esfera i fins a obtenir una solució global. Aquest procés es repeteix usant diferents punts centrals.

L'esquema que hi ha darrera de les heurístiques iteratives aquí anomenades de Radis creixents es mostra a continuació. A cada iteració  $i$ , es selecciona un punt  $p_i$  ( $p_i \in D$ ) i, començant des d'aquest punt, es construeix una solució. Les heurístiques acaben quan tots els punts de demanda han estat seleccionats com a punts de començament o quan s'assoleix un temps màxim computacional; aleshores la solució trobada amb el menor cost és retornada.

Per a determinar el punt  $p_i$  s'usa el concepte *Grid Generation Score* (GGS) (Ranaboldo *et al.*, 2013), definit com un índex que avalua com d'apropiat és un punt per a ser punt de generació d'una microxarxa a través de, per una banda, el potencial d'energia renovable en un lloc específic en comparació amb els punts del voltant, i per altra banda, la concentració de demanda d'energia al voltant del punt. D'aquesta manera, s'escull el punt de demanda amb l' $i$ -èssim valor GGS més alt.

El procés de construir una solució (començant des del punt  $p_i$ ) és també iteratiu i es fa de la següent manera. En cada iteració  $j$  del procés de construcció de la solució, la superfície d'una esfera amb centre a  $p_i$  i radi  $R_{ij}$  esdevé el límit que separa tots els punts de demanda en dues regions: regió interior de no-relaxament,  $INT_{ij}$  ( $INT_{ij} = \{p \in D \mid L_{p,p_i} \leq R_{ij}\}$ ) i regió exterior de relaxament,  $EXT_{ij}$  ( $EXT_{ij} = D \setminus INT_{ij}$ ).

La Figura 5.2a il·lustra un exemple de la primera iteració del procés de construcció d'una solució, en la qual els punts blaus i petits representen els punts de demanda, el cercle gris és la regió  $INT_{ij}$  al voltant del punt  $p_i$  i la regió més fosca és la regió  $EXT_{ij}$ . Iterativament, el radi de l'esfera creix (a partir d'ara en direm expansió) fins que tots els punts de l'exemplar hi són incorporats (i.e, la regió exterior és buida). En la iteració  $j$ , es resol MERAES amb algunes variables relaxades i altres variables fixades. Les variables a relaxar són algunes de les variables associades als punts de la regió exterior ( $EXT_{ij}$ ). Les variables a fixar són algunes de les variables associades als punts de la regió interior de la iteració prèvia ( $INT_{i,j-1}$ , on  $INT_{i0} = \emptyset$ ), i són fixades amb els valors de la solució obtinguda amb MERAES a la iteració prèvia (i.e, iteració  $j-1$ ). L'increment del radi a

cada iteració  $j$  és determinat per un paràmetre que indica el nombre de punts ( $np_0$ ) que es vol que siguin afegits en cada expansió. D'aquesta manera, l'expansió és determinada per la incorporació de  $np_0$  nous punts en comptes d'un increment prefixat del radi. La Figura 5.2b il·lustra un exemple de la segona iteració del procés de construcció de la solució, en la qual el cercle blanc és la regió "fixada". S'observa que  $np_0$  és igual a 7 en l'exemple mostrat a les Figures 5.2a i 5.2b.

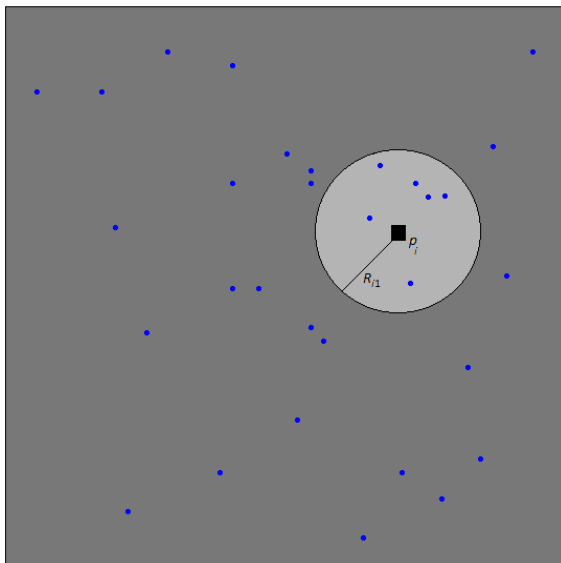


Figura 5.2a – Construcció de la solució: primera iteració ( $j=1$ )

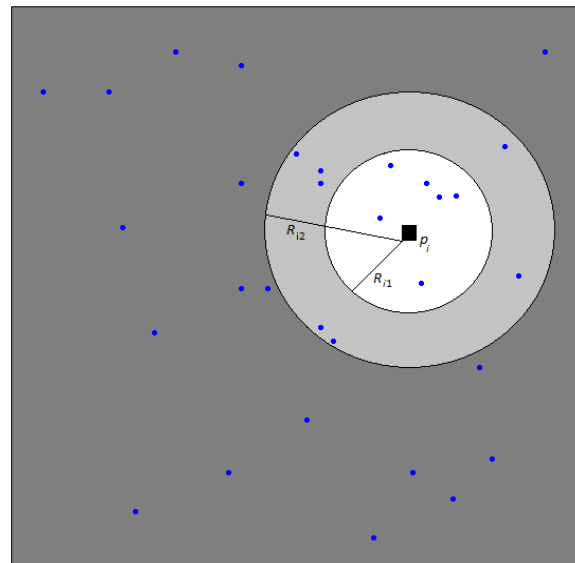


Figura 5.2b – Construcció de la solució: segona iteració ( $j=2$ )

### 5.3.1 Esquema general de les heurístiques de RC

Es recorda que  $X$  és el conjunt de variables enteres (incloent-hi les binàries) de MERAES ( $x \in X$ ) i  $N = |X|$  (veure la Secció 5.1.1).

Sigui  $IREXT_{ij} = \{r_{1ij}, r_{2ij}, \dots, r_{N_{ij}^{IR}}\} \subseteq \{1, \dots, N\}$  el conjunt d'índexs de les variables a relaxar associades als punt exteriors  $p \in EXT_{ij}$ , on  $N_{ij}^{IR} = |IREXT_{ij}|$  i  $x_r$  ( $r \in IREXT_{ij}$ ) són el nombre de variables a relaxar i la  $r$ -èsima variable a relaxar, respectivament.

Sigui  $IF_{ij}^{IR} = \{f_{1ij}, f_{2ij}, \dots, f_{N_{2ij}^{IR}}\} \subseteq \{1, \dots, N\} \setminus IREXT_{ij}$  el conjunt d'índexs de les variables a fixar associades a punts interiors  $p \in INT_{ij}$ , on  $N_{2ij}^{IR} = |IF_{ij}^{IR}|$  i  $x_f$  ( $f \in IF_{ij}^{IR}$ ) són el nombre de variables a fixar i la  $f$ -èssima variable a fixar, respectivament.

L'algorisme de les heurístiques de Radis creixents és el següent, a la Figura 5.3:

---

$i = 1$

**Mentre** ( $i \leq |D|$  o límit de temps assolit) **fes**:

$p_i$  = Punt de demanda amb l' $i$ -èssim valor GGS més alt

$np = 0$ ;  $j = 1$

**Mentre** ( $np < |D|$ ) **fes**:

$np = \min(np + np_0, |D|)$  i sigui  $R_{ij}$  el valor mínim tal que  $|INT_{ij}| = np$

Es fixa els valors de les variables  $x_f$ :  $x_f = \bar{x}_f$  ( $f \in IF_{i,j-1}^{IR}$ )

Es relaxa les variables  $x_r \in IREXT_{ij}$

Es resol MERAES relaxat i s'obté els valors  $\bar{x}_f$  ( $f \in IF_{ij}^{IR}$ )

$j = j + 1$

**Fi de mentre**

$i = i + 1$

**Fi de mentre**

Es retorna la solució de menor cost

---

Figura 5.3 – Algorisme de les heurístiques de Radis creixents

### 5.3.2 Variables a relaxar

Per tal de definir el conjunt de variables a relaxar en les heurístiques RC, també es consideren les opcions de relaxament (R1-R4) de les heurístiques RF (Secció 5.1.2).

### 5.3.3 Variables a fixar

Per tal de definir el conjunt de variables a fixar en les heurístiques RC, també es consideren les opcions de fixació (F1-F6) de les heurístiques RF (Secció 5.1.3).

### 5.3.4 Heurístiques RC proposades

Es proposen vint-i-quatre heurístiques RC, que sorgeixen de la combinació de les quatre opcions de relaxament amb les sis opcions de fixació. A més, es defineix  $RCab$  ( $a=1,\dots,4$ ;  $b=1,\dots,6$ ) com l'heurística amb l'opció de relaxament  $Ra$  i l'opció de fixació  $Fb$ .

El temps total màxim de resolució serà  $T$  i el temps màxim per a construir la solució en la iteració  $i$ -èssima (sigui aquest temps anomenat  $TC_i$ ) serà tot el temps que resta (i.e,  $TC_i$  serà  $T$  menys el temps gastat per a construir les solucions prèvies). El màxim temps per a solucionar MERAES relaxat en cada iteració  $j$  de la construcció de la solució  $i$ -èssima serà el temps que resta de  $TC_i$  dividit per  $\lceil |D|/(j \cdot np_0) \rceil$  (i.e, dividit pel nombre de les expansions que resten en la construcció de la solució  $i$ -èssima).

## 6. Resultats experimentals

Els exemplars de l'experiment computacional realitzat varen ser generats aleatòriament basats en les característiques de dos projectes reals en les comunitats peruanes d'El Alumbre, en una àrea de 3,5x3,5 km<sup>2</sup>, i Alto Perú, en una àrea de 1,3x3,4 km<sup>2</sup>, descrits a [Ferrer-Martí *et al.* 2013]. El mapa del recurs vent [Ferrer-Martí *et al.*, 2012] i les dades d'energia generada amb cada tipus de turbina es van calcular usant WASP [Mortensen & Peterson, 1998] seguint el procediment validat a Ranaboldo *et al.* [2014a].

El conjunt d'exemplars de testeig van ser generats considerant els escenaris resumits a la Taula 6.1. Els exemplars tenen un nombre variable de punts de consum (dins d'un rang des de 10 fins a 100). Els punts de consum estan distribuïts aleatòriament generats segons dos tipus de densitats; en la primera, el 25% de punts de demanda estan concentrats en el 20% de l'àrea de la comunitat, en la segona, el 50% de punts de demanda estan concentrats en el 20% de l'àrea de la comunitat. Pel que fa a les demandes, es consideren 2 escenaris: primer, un escenari de baixa demanda basada en el projecte real descrit a Ferrer-Martí *et al.* [2010]; segon, un escenari en el qual es defineix una demanda 1,5 vegades superior a la demanda real per tal de considerar una extensió de les necessitats bàsiques i d'altres possibles consums. De forma semblant s'han considerat dos escenaris de potencial eòlic: un primer escenari segons el mapa eòlic [Ferrer-Martí *et al.*, 2012] i un segon escenari 1,5 vegades superior al primer.

**Taula 6.1 – Escenaris considerats en el conjunt d'exemplars generats.**

Aspecte	Nombre d'opcions	Característiques
Nombre de punts de demanda	10	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Densitat	2	1) 25% de punts de demanda concentrats en el 20% de l'àrea de la comunitat. 2) 50% de punts de demanda concentrats en el 20% de l'àrea de la comunitat. La posició exacta dels punts va ser generada aleatòriament (observant la densitat dels escenaris)
Demanda (energia/potència) per punt de demanda	2	1) 280 Wh/dia (200 W) 2) 420 Wh/dia (300 W)
Potencial eòlic	2	1) normal (segons el mapa eòlic) 2) alt (multiplicant per 1,5 els valors del mapa eòlic)

Per a cada combinació d'escenaris (nombre de punts de demanda, densitat, potencial de demanda i de vent), es van generar 5 exemplars, donant un total de  $10 \times 2 \times 2 \times 2 \times 5 = 400$  exemplars.

Les dades principals dels equipaments elèctrics considerats en els projectes d'El Alumbre i Alto Perú [Ferrer-Martí *et al.*, 2013] estan resumides a la Taula 6.2.

**Taula 6.2 – Equipament elèctric considerat en el projecte. Descrit en Ferrer-Martí *et al.* [2013].**

Equip	Tipus	Cost	Altres característiques
Turbines eòliques	4	Des de \$1394 a \$8732	Generació d'energia: fins a 16500 Wh/dia. Màxima potència: des de 300 W a 3500 W
Panells solars	4	Des de \$451 a \$1000	Generació d'energia: des de 217 Wh/dia a 651 Wh/dia Potència màxima: des de 50 W a 150 W
Reguladors solars	4	Des de \$67 a \$125	Potència màxima: des de 50 W fins a 200 W
Bateries	4	Des de \$225 a \$325	Capacitat: Des de 1500 Wh a 3000 Wh; Eficiència: 0,85
Inversors	4	Des de \$377 a \$2700	Potència màxima: des de 300 W a 3000 W; Eficiència: 0,85
Cables	2	\$5,9/m i \$6,1/m	Resistència: 2,71 $\Omega$ /km i 2,1 $\Omega$ /km
Mesuradors	1	\$50	

L'experiment computacional va ser realitzat en un PC 3,16 GHz Intel Core 2 Duo E8500 amb 3,46 GB de RAM. Els algorismes varen ser codificats en C++ i els models de PLEM es varen solucionar amb IBM ILOG CPLEX Optimizer 12.2. Per a totes les heurístiques el temps màxim de computació va ser fixat a 3600 segons per exemplar.

Les heurístiques proposades primer varen ser comparades amb una heurística directa basada en PLEM anomenada, a partir d'ara, MERAES-1h, que consisteix en executar MERAES limitat a 3600 segons de computació. Tots els resultats d'aquesta comparació s'han resumit en les Taules 6.3, 6.4 i 6.5, on AI% i MI% són la millora mitjana i màxima (en %) respecte els resultats de l'heurística MERAES-1h, respectivament.

S'han arribat a solucionar amb MERAES-1h abans d'arribar a 3600 segons (i.e, s'han assolit solucions l'optimalitat de les quals queda demostrada) 32 exemplars amb 10

punts de demanda. Per a la resta d'exemplars, no s'han assolit (de forma provada) solucions òptimes perquè s'ha assolit els temps de computació màxim d'1 hora. Els resultats obtinguts amb les heurístiques RF, BCM i RC i els valors dels seus paràmetres són exposats en les Seccions 6.1, 6.2 i 6.3, respectivament. En la Secció 6.4 s'han comparat entre elles les heurístiques proposades.

Per als tres tipus d'heurístiques, s'han realitzat una experiència computacional preliminar amb els exemplars de 50, 60 i 70 habitatges. La finalitat d'aquest experiment previ ha estat la de filtrar les variants de les heurístiques que donen millors resultats. Aquests resultats es recullen dins de capítol 8 com a annexos a la tesi doctoral i es conclou que les millors heurístiques de les quals es realitzarà l'experimentació completa amb tots els exemplars de testeig seran: RF12, RF13 i RF14 pel que fa a les heurístiques de Relaxament i fixació; BCM1 pel que fa a les heurístiques BCM; i RC12 pel que fa a les heurístiques de Radis creixents.

La significança estadística dels resultats de l'experiment computacional ha estat avaluada usant el software d'estadística Minitab 15.1 per les proves de t-test aparellades que avaluen la diferència mitjana entre observacions aparellades; amb un nivell de significança del 5%.

## **6.1 Resultats de les Heurístiques de Relaxament i fixació**

El temps de computació per a les heurístiques RF és dividit de la següent manera:  $T_1^{RF}$  és fixat a 2700 segons i  $T_2^{RF}$  és fixat al temps computacional que resta (900 segons). La raó per la qual es fa així és que un experiment preliminar va mostrar que ST2 és més ràpid que ST1. Addicionalment, per tal d'accelerar ST1, la tolerància relativa entre el valor de la funció cost i la seva fita inferior en aquesta etapa ha estat limitada, en l'IBM ILOG CPLEX Optimizer 12.2, al 25% per a exemplars de 10 i 20 punts. Però per a exemplars més grans de 20 punts (80% de tots els exemplars) en la pràctica es va observar que aquesta fita del 25% no tenia ús pràctic perquè quan el temps de

computació de ST1 s'exhauria sempre s'assolien toleràncies superiors al 25%. Els experiments realitzats amb límits de toleràncies superiors (50% i 75%) varen mostrar pitjors resultats en tots els exemplars.

Tal com s'ha esmentat, en l'experiment preliminar sobre les 24 heurístiques de Relaxament i fixació, recollit a l'apartat 8.1, els tres millors resultats es varen obtenir amb les heurístiques RF12, RF13 i RF14, els quals són presentats a la Taula 6.3.

Com es pot veure, les tres millors heurístiques RF obtenen, en mitjana, millors solucions que MERAES-1h, i el test estadístic confirma que les diferències amb MERAES-1h són significatives. Els valors en mitjana de AI% obtinguts amb RF14, RF12 i RF13 són 1,42, 1,19 i 0,42, respectivament. Aquestes heurístiques donen resultats similars als de MERAES-1h per a exemplars fins a 30 punts de demanda.

**Taula 6.3 – Els resultats obtinguts amb les 3 millors heurístiques RF**

/D/	RF12		RF13		RF14	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
10	-0,21	0,06	-0,41	0,08	-0,20	0,19
20	-1,15	0,74	-1,37	0,74	-0,96	0,74
30	-0,62	3,24	-1,71	2,57	-0,71	3,11
40	-1,87	6,11	-2,17	12,58	0,48	9,75
50	0,83	7,50	-0,41	7,95	2,54	10,50
60	3,98	13,58	2,26	12,83	4,70	12,40
70	4,52	12,70	3,28	10,75	3,70	16,14
80	4,09	14,25	2,63	12,05	2,24	12,66
90	1,49	7,41	1,02	5,41	1,65	10,72
100	0,80	1,86	1,10	7,34	0,74	1,86
<b>Total</b>	<b>1,19</b>	<b>14,25</b>	<b>0,42</b>	<b>12,83</b>	<b>1,42</b>	<b>16,14</b>

Per altra banda, de forma estadísticament significativa obtenen millors resultats que MERAES-1h per a exemplars més grans, i especialment per a exemplars des de 60 fins a 80 punts de demanda. Les tres millors heurístiques RF relaxen les variables  $xb_{pb}$ ,  $xi_{pi}$ ,  $xrs_{pr}$ ,  $xc_{pqc}$  i  $xm_p$  en la seva primera etapa ST1. En canvi, entre elles difereixen en la segona etapa ST2; en particular, RF14, que és la millor heurística RF, només fixa



l'existència de generació, amb decreixements de costos màxims de més del 16% respecte de MERAES-1h.

## 6.2 Resultats de les Heurístiques basades en el *Corridor Method*

De forma similar a les heurístiques RF, la segona etapa de les heurístiques BCM (la que realitza la cerca local) és més ràpida que la primera etapa (la que fa el càlcul de la solució inicial). Així,  $T_1^{BCM}$  és fixat a 2700 segons i  $T_2^{BCM}$  és fixat a 900 segons. Pel que fa al paràmetre  $L$  (límit de canvis de connexions i desconnexions), es varen testar tres valors en cada heurística BCM:  $L \in \{1, 2, 5\}$ .

Tal com s'ha esmentat, en l' experiment preliminar sobre les heurístiques BCM, recollit a l'apartat 8.2, els tres millors resultats es varen obtenir amb les heurístiques BCM1 amb  $L = 1, 2$  i  $5$ , els quals es presenten en la Taula 6.4.

**Taula 6.4 – Els resultats obtinguts amb les tres millors heurístiques BCM**

$ D $	BCM1 ( $L=1$ )		BCM1 ( $L=2$ )		BCM1 ( $L=5$ )	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
10	-0,86	0	-0,65	0,19	-0,51	0,06
20	-1,65	0,77	-1,38	0,73	-0,46	0,83
30	-2,75	0,59	-2,57	0,64	-0,93	2,89
40	-3,27	2,54	-3,12	7,27	-1,15	8,76
50	-0,13	9,92	0,26	8,18	1,74	11,57
60	2,58	8,37	2,48	11,28	4,42	15,22
70	4,16	13,80	3,94	12,43	6,08	15,08
80	3,99	15,76	3,58	14,17	5,46	15,67
90	0,34	5,18	0,78	7,14	1,15	9,85
100	0,09	2,33	0,14	2,34	0,76	11,58
<b>Total</b>	<b>0,25</b>	<b>15,76</b>	<b>0,35</b>	<b>14,17</b>	<b>1,66</b>	<b>15,67</b>

Els valors en mitjana de AI% són 0,25, 0,35 i 1,66, respectivament. Per tant, les tres millors heurístiques BCM obtenen, en mitjana, millors solucions que MERAES-1h, i el test estadístic confirma que les diferències amb MERAES-1h són estadísticament significatives. Com es pot veure, des de 10 fins a 40 i per a 100 punts de demanda, AI% presenta valors inferiors a, o prop de, 0; així doncs MERAES-1h es comporta millor que, o similar a, les heurístiques BCM mostrades. No obstant, des de 50 fins a 90 punts de demanda s'observa una millora significativa de resultats per part de BCM amb valors de AI% des de prop de 1% fins al 6%. Els millors resultats s'han obtingut amb l'heurística BCM1 i  $L=5$  (això significa l'opció de relaxament R1 i el límit de canvis de connexions i desconnexions fixat a 5), amb uns decreixements de costos màxims de més del 15%.

## 6.3 Resultats de les Heurístiques dels Radis creixents

Els valors següents varen ser considerats per al paràmetre  $np_0$  (nombre de punts afegits en cada expansió):  $np_0 \in \{5, 10, 20, 30, 40, 50, 60\}$ .

Les millors opcions de relaxament i fixació són R1 i F2, respectivament, donat que els millors resultats, mostrats a la Taula 6.5, s'han obtingut amb RC12 fixant  $np_0$  a 40, 50 o 60 (veure el resultat de l'experiment preliminar de Radis creixents a l'apartat 8.3).

Els valors en mitjana obtinguts de AI% són 3,00, 3,36 i 2,83, respectivament. Per tant, les tres millors heurístiques de RC obtenen, en mitjana, millors solucions que MERAES-1h, i el test estadístic confirma que les diferències amb MERAES-1h són estadísticament significatives. Cal destacar que els valors de AI% fins a  $np_0$  punts de demanda és 0; la raó és que, en aquest cas, les heurístiques de RC són equivalents a MERAES-1h. Des de 60 fins a 100 punts de demanda, s'ha observat una millora significativa de AI%, especialment quan  $np_0=50$ : de mitjana, des de gairebé un 5% fins gairebé un 8%. A més, quan  $np_0=50$ , la millora màxima de MI% és més del 20%.

**Taula 6.5 – Els resultats obtinguts amb les 3 millors heurístiques RC**

<i> D </i>	RC12 ( $np_0=40$ )		RC12 ( $np_0=50$ )		RC12 ( $np_0=60$ )	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
10	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
50	1,08	9,30	0	0	0	0
60	4,91	13,14	4,99	10,73	0	0
70	6,35	15,93	6,20	20,31	6,05	17,39
80	7,26	17,06	7,34	19,54	7,09	19,11
90	4,85	12,11	7,11	19,28	7,57	18,77
100	5,54	15,07	7,93	18,28	7,59	22,98
<i>Total</i>	<i>3,00</i>	<i>17,06</i>	<i>3,36</i>	<i>20,31</i>	<i>2,83</i>	<i>22,98</i>

## 6.4 Comparació i conclusions

En mitjana, els millors resultats són obtinguts amb una heurística RC. Específicament, l'heurística RC12 amb  $np_0=50$  té una mitjana de AI% igual a 3,36. El test estadístic confirma que les RC12 amb  $np_0=50$  obté els millors resultats en mitjana i les diferències amb altres heurístiques són significatives.

De forma complementària, donat que els resultats varien dependent del nombre de punts dels exemplars, es proposa l'ús de diferents heurístiques dependent de la mida de l'exemplar a resoldre, tal com es resumeix a la Taula 6.6.

**Taula 6.6 – Proposta d'heurístiques d'acord al nombre de punts de demanda**

<i>D</i>	Heurística	AI%	MI%
10	RC12 ( $np_0 \geq 10$ )	0	0
20	RC12 ( $np_0 \geq 20$ )	0	0
30	RC12 ( $np_0 \geq 30$ )	0	0
40	RF14	0,48	9,75
50	RF14	2,54	10,50
60	RC12 ( $np_0=50$ )	4,99	10,73
70	RC12 ( $np_0=40$ )	6,35	15,93
80	RC12 ( $np_0=50$ )	7,34	19,54
90	RC12 ( $np_0=60$ )	7,57	18,77
100	RC12 ( $np_0=50$ )	7,93	18,28

- *Des de 10 fins a 30 i des de 60 a 100 punts de demanda:* la millor opció és aplicar l'heurística RC12 amb valors diferents del paràmetre  $np_0$ : de 10 fins a 30 punts de demanda; per a 60, 80 i 100 punts de demanda els millors resultats s'obtenen per a  $np_0=50$ ; per a 70 punts de demanda els millors resultats són per a  $np_0=40$ ; i per a 90 punts de demanda els millors resultats són per a  $np_0=60$ .
- *Per a 40 i 50 punts de demanda:* la millor opció és aplicar RF14.

## 7. Conclusions i extensions futures

En aquest capítol, en primer lloc es mostren les conclusions de la investigació realitzada, en segon lloc s'exposen les futures recerques com a extensió del treball efectuat i, per acabar es fa referència als articles i ponències que han resultat com a producte de la tesi doctoral.

### 7.1 Conclusions

Aquesta tesi estudia el problema del disseny de sistemes d'electrificació rural usant generació eòlica i solar fotovoltaica, i la distribució d'electricitat a través de sistemes individuals i de microxarxes. Per tal de solucionar el problema s'han dissenyat 3 tipus d'heurístiques basades en un model de PLEM, anomenat MERAES, que és una modificació del model de PLEM presentat per Ferrer-Martí *et al* [2013]: les heurístiques de Relaxament i fixació, les heurístiques basades en el *Corridor Method* i unes heurístiques *ad hoc* aquí anomenades de Radis creixents.

Tots tres tipus d'heurístiques apliquen el model MERAES relaxat per a obtenir una solució base que és útil com a partida per a la construcció o exploració de noves solucions utilitzant diferents estratègies: en les heurístiques de Relaxament i fixació s'han fixat alguns grups de variables relacionades amb connexions i/o generadors en les microxarxes; en les heurístiques basades en Corridor Method s'ha limitat el nombre de connexions total, entre altres restriccions addicionals; i en les heurístiques de Radis Creixents s'han fixat les connexions i/o generadors continguts en una àrea geogràfica que s'ha anat incrementant de forma iterativa. Per a cada tipus d'heurístiques s'han desenvolupat i testat diverses opcions.

S'ha realitzat un experiment computacional amb exemplars basats en un projecte real i els resultats principals de les diferents heurístiques han estat mostrats i comparats. Primer s'han detectat les millors opcions de relaxament i fixació dins de cada tipus d'algorisme. Aleshores els 3 tipus d'heurístiques s'han comparat entre elles i s'ha conclòs que la millor heurística a aplicar depèn del nombre de punts de demanda de l'exemplar a resoldre: per a exemplars de mida mitjana (40 i 50 punts de demanda) es

proposa usar les heurístiques de Relaxament i fixació, en concret les heurístiques RF14, amb relaxament  $R_1$  i fixació  $F_4$ ; i per exemplars petits (10, 20 i 30 punts de demanda) i grans (60, 70, 80, 90 i 100 punts de demanda) es suggereix usar les heurístiques de Radis creixents, en concret les heurístiques RC12, amb relaxament  $R_1$  i fixació  $F_2$ .

## 7.2 Extensions futures

A continuació s'exposen les possibles recerques futures com a extensió de la present tesi doctoral:

- L'estudi de l'ús d'altres tipus d'heurístiques, entre elles heurístiques *Topologies veïnes*. En aquestes heurístiques es segueix un procés d'exploració de veïnats, de noves topologies, que, partint d'una topologia inicial, cerca un òptim local, o en el seu defecte una millora del resultat, pel que fa a la funció de cost; d'aquesta manera en cada pas del procés s'escull la topologia del veïnat que representa un menor cost, topologia en curs, fins a esdevenir-se una no millora de cost en el procés o un assoliment del límit temporal que s'hagi fixat per a l'acabament del procés. Les topologies que formen part d'un veïnat es diferencien entre elles per petits canvis, propers (e.g., connexions o desconexions d'un nou punt, intercanvi de punts entre microxarxes, etc). Aquests canvis provoquen, consegüentment, una redefinició de tota la resta de components de les xarxes (generadors, bateries, etc). La definició que es faci del veïnat permet crear diverses heurístiques diferents.
- La consideració d'altres tecnologies com hidroelèctriques o generadors de motors combustibles. En aquesta última forma de generació no es parlaria de energia sostenible però sí d'una energia de fàcil instal·lació que actualment s'utilitza també en zones rurals aïllades.
- La funció objectiu a optimitzar inclou només la inversió inicial. Caldria estudiar la incorporació d'altres costos que es presenten durant la vida útil de les instal·lacions tals com el seu manteniment, reparació i substitució. Luo [2007] destaca el problema de manca de recursos econòmics per a atendre les necessitats de manteniment i renovació dels equips, que d'aquesta manera es van deteriorant inexorablement. Així mateix, les xarxes d'electrificació rural autònoma, generen una

necessitat de manteniment continuat. Les tecnologies que es fan servir poden comportar la necessitat de formació tecnològica de persones del territori que caldria incloure també dins dels costos del projecte.

- La incorporació de punts de generació en altres llocs que no siguin estrictament els punts de consum permetria un millor aprofitament de localitzacions més beneficioses, sobretot en el cas d'energia eòlica o d'altres fonts d'energia si s'incorporessin en les futures recerques. Com a contrapartides: implica la introducció de molts més punts possibles de generació en el problema, complicant encara més el problema; també s'incrementen i encareixen les necessitats de seguretat de les instal·lacions (degut al seu isolament);
- Seria convenient afegir criteris mediambientals en el problema a resoldre. La utilització d'elements electromecànics comporta la generació de residus que no s'han tingut presents en el projecte. És cert que el volum d'aquestes instal·lacions limiten molt el seu impacte, tanmateix, al llarg dels anys la substitució de materials i sobretot de les bateries poden comportar un problema mediambiental a tenir en compte.

## 7.3 Articles i ponències realitzades

En aquest apartat s'exposen els resultats d'aquesta tesi doctoral, pel que fa a publicacions i altres activitats de difusió. En primer lloc s'exposen els articles publicats en revistes indexades JCR. En segon lloc es llisten les publicacions en congressos.

- **Articles en revistes JCR**

Triadó-Aymerich J., Ferrer-Martí L., García-Villoria A., Pastor R. (2016) MILP-based heuristics for the design of rural community electrification projects. *Computers & Operations Research*. 71, 90-99.

- **Congressos i ponències**

Triadó-Aymerich J., Ferrer-Martí L., García-Villoria A., Pastor R. Heurística basada en PLEM para resolver proyectos de electrificación rural. *6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de ingeniería de Organización*. Vigo (Juliol 2012).

Triadó J., Ferrer-Martí L., García-Villoria A., Pastor R. MILP based heuristics using Corridor Method to solve rural electrification projects. *EURO - 26th European Conference on Operational Research*. Roma (Juliol 2013).

Triadó J., Ferrer-Martí L., García-Villoria A., Pastor R. Corridor method heuristics to solve rural electrification projects. *ICSO-HAROSA International Workshop on Simulation-Optimization & Internet computing*. Barcelona (Juliol 2013).



## 8. Annexos

En aquesta documentació annexa a la tesi doctoral s'exposen, en taules, els resultats de proves preliminars de les heurístiques realitzades. Aquests proves s'han realitzat amb la finalitat de determinar quines heurístiques poden donar uns millors resultats i d'aquesta manera augmentar l'eficiència de l'experiment descartant les heurístiques que donen pitjors resultats.

Com en els capítols precedents, en aquests taules */D/* són el nombre d'habitatges dels exemplars, i *AI%* i *MI%* són la millora mitjana i màxima (en %) respecte els resultats de l'heurística MERAES-1h, respectivament

### 8.1 Resultats d'un experiment preliminar de les heurístiques de Relaxament i fixació

Respecte a les heurístiques de Relaxament i fixació s'ha realitzat un experiment preliminar sobre 20 exemplars de 50, 60 i 70 habitatges (en total, 60 exemplars) per a totes les 24 heurístiques exposades a l'apartat 5.1.4. Tots el resultats de l'experiment preliminar realitzat es recullen a continuació en les taules 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3 i 8.1.4. Per a alguns casos, com es pot veure a les taules 8.1.3 i 8.1.4, no es va obtenir cap resultat (CR) un cop passat el temps de 3600 segons, és per això que no s'han calculat els totals. Al costat de l'acrònim CR hi apareix una numeració que reflecteix el % d'exemplars dels quals no s'ha pogut trobar solució; per exemple CR80 indicaria que no s'han pogut obtenir resultats del 80% dels exemplars.

**Taula 8.1.1. Resultats preliminars de les heurístiques RF11, RF12, RF13, RF14, RF15 i RF16**

	RF11		RF12		RF13		RF14		RF15		RF16	
<i>/D/</i>	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-0,11	11,06	0,83	7,50	-0,41	7,95	2,54	10,50	-0,64	4,65	0,69	8,02
60	-3,90	2,20	3,98	13,58	2,26	12,83	4,70	12,40	-1,14	-0,39	0,64	7,63
70	-2,50	3,11	4,52	12,70	3,28	10,75	3,70	16,14	-5,83	0,00	0,54	6,94
<b>Total</b>	<b>-2,17</b>	<b>11,06</b>	<b>3,11</b>	<b>13,58</b>	<b>1,71</b>	<b>12,83</b>	<b>3,65</b>	<b>16,14</b>	<b>-2,54</b>	<b>4,65</b>	<b>0,62</b>	<b>8,02</b>

**Taula 8.1.2. Resultats preliminars de les heurístiques RF21, RF22, RF23, RF24, RF25 i RF26**

<i>/D/</i>	RF21		RF22		RF23		RF24		RF25		RF26	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-0,32	7,15	0,58	8,21	0,71	9,39	0,18	10,32	-8,49	0,11	0,63	4,54
60	-6,12	0,57	0,61	6,96	1,69	4,22	0,44	6,12	-15,76	-0,26	0,67	8,22
70	-4,26	2,50	0,43	7,13	0,11	5,96	0,55	7,27	-10,85	1,98	0,30	2,31
<b>Total</b>	<b>-3,57</b>	<b>7,15</b>	<b>0,54</b>	<b>8,21</b>	<b>0,84</b>	<b>9,39</b>	<b>0,39</b>	<b>10,32</b>	<b>-11,7</b>	<b>1,98</b>	<b>0,53</b>	<b>8,22</b>

**Taula 8.1.3. Resultats preliminars de les heurístiques RF31, RF32, RF33, RF34, RF35 i RF36**

<i>/D/</i>	RF31		RF32		RF33		RF34		RF35		RF36	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-1,48	0,79	-0,1	2,20	-4,09	-1,12	0,93	3,49	-17,86	-1,29	-2,44	2,99
60	-8,43	0,45	1,97	0,87	-1,60	0,79	-1,55	0,06	CR75	CR75	-0,66	5,01
70	CR45	CR45	-1,51	4,01	-2,14	2,75	-1,42	6,10	CR80	CR80	-2,45	3,91
<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,12</b>	<b>4,01</b>	<b>-2,61</b>	<b>2,75</b>	<b>-0,68</b>	<b>6,10</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-1,85</b>	<b>5,01</b>

**Taula 8.1.4. Resultats preliminars de les heurístiques RF41, RF42, RF43, RF44, RF45 i RF46**

<i>/D/</i>	RF41		RF42		RF43		RF44		RF45		RF46	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-0,04	9,11	-1,23	3,17	-0,15	7,49	-1,22	9,58	-12,77	-2,28	0,39	5,54
60	-4,25	1,33	-0,66	6,98	-1,44	4,32	-3,16	2,45	CR100	CR100	-1,87	6,20
70	-1,98	3,54	-2,90	0,35	-3,03	1,35	0,35	4,15	CR100	CR100	1,49	4,11
<b>Total</b>	<b>-2,09</b>	<b>9,11</b>	<b>-1,60</b>	<b>6,98</b>	<b>-1,54</b>	<b>7,49</b>	<b>-1,34</b>	<b>9,58</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,00</b>	<b>6,20</b>

## 8.2 Resultats d'un experiment preliminar de les heurístiques BCM

Per a les heurístiques BCM s'ha realitzat un experiment preliminar sobre 20 exemplars de 50, 60 i 70 habitatges per a les 4 heurístiques: BCM1, BCM2, BCM3 i BCM4. Tots el resultats de l'experiment preliminar es recullen a continuació en les taules 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3 i 8.2.4.

**Taula 8.2.1. Resultats preliminars de les heurístiques BCM1**

<i>/D/</i>	BCM1 ( <i>L=1</i> )		BCM1 ( <i>L=2</i> )		BCM1 ( <i>L=5</i> )	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-0,13	9,92	0,26	8,18	1,74	11,57
60	2,58	8,37	2,48	11,28	4,42	15,22
70	4,16	13,80	3,94	12,43	6,08	15,08
<b>Total</b>	<b>2,20</b>	<b>13,80</b>	<b>2,23</b>	<b>12,43</b>	<b>4,08</b>	<b>15,22</b>

**Taula 8.2.2. Resultats preliminars de les heurístiques BCM2**

<i>/D/</i>	BCM2 ( <i>L=1</i> )		BCM2 ( <i>L=2</i> )		BCM2 ( <i>L=5</i> )	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-0,05	3,18	0,09	3,43	0,73	4,86
60	0,98	4,17	0,94	4,28	1,68	5,58
70	1,76	5,52	1,57	5,07	2,43	6,03
<b>Total</b>	<b>0,90</b>	<b>5,52</b>	<b>0,87</b>	<b>5,07</b>	<b>1,61</b>	<b>6,03</b>

**Taula 8.2.3. Resultats preliminars de les heurístiques BCM3**

<i>/D/</i>	BCM3 ( <i>L=1</i> )		BCM3 ( <i>L=2</i> )		BCM3 ( <i>L=5</i> )	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-1,91	1,12	-2,15	1,56	-1,68	1,49
60	-2,15	1,63	0,07	3,77	-0,52	2,89
70	0,99	3,31	-0,32	1,89	0,12	3,42
<b>Total</b>	<b>-1,02</b>	<b>3,31</b>	<b>-0,80</b>	<b>3,77</b>	<b>-0,69</b>	<b>3,42</b>

**Taula 8.2.4. Resultats preliminars de les heurístiques BCM4**

<i> D </i>	BCM4 ( <i>L=1</i> )		BCM4 ( <i>L=2</i> )		BCM4 ( <i>L=5</i> )	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-1,89	1,51	-0,18	2,16	0,15	3,63
60	-1,03	2,79	1,13	6,17	0,90	5,96
70	1,22	2,30	0,57	3,42	1,94	5,43
<b>Total</b>	<b>-0,57</b>	<b>2,79</b>	<b>0,51</b>	<b>6,17</b>	<b>1,00</b>	<b>5,96</b>

### 8.3 Resultats d'un experiment preliminar de les heurístiques de Radis creixents

Respecte a les heurístiques de Radis creixents s'ha realitzat un experiment preliminar sobre 20 exemplars de 50, 60 i 70 habitatges per a les 24 heurístiques realitzades amb  $np_0=40$  (40 punts afegits en cada expansió). Tots el resultats de l'experiment preliminar realitzat es recullen a continuació en les taules 8.3.1, 8.3.2, 8.3.3 i 8.3.4.

**Taula 8.3.1. Resultats preliminars de les heurístiques RC11, RC12, RC13, RC14, RC15 i RC16**  
( $np_0=40$ )

<i> D </i>	RC11		RC12		RC13		RC14		RC15		RC16	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-0,05	8,11	1,08	9,30	-0,22	5,21	0,47	7,45	-0,32	5,01	0,84	6,65
60	0,28	6,30	4,91	13,14	1,43	9,15	2,79	10,66	-0,86	3,44	1,22	9,09
70	0,53	9,54	6,35	15,93	3,02	15,33	1,71	7,24	-3,34	1,04	1,89	7,10
<b>Total</b>	<b>0,25</b>	<b>9,54</b>	<b>4,11</b>	<b>15,93</b>	<b>1,41</b>	<b>15,33</b>	<b>1,66</b>	<b>10,66</b>	<b>-1,51</b>	<b>5,01</b>	<b>1,32</b>	<b>9,09</b>

**Taula 8.3.2. Resultats preliminars de les heurístiques RC21, RC22, RC23, RC24, RC25 i RC26**  
( $np_0=40$ )

<i> D </i>	RC21		RC22		RC23		RC24		RC25		RC26	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	0,70	8,54	1,15	13,99	1,04	12,05	0,99	9,66	-5,15	1,75	1,10	6,40
60	-1,64	2,69	1,71	9,54	2,33	6,21	1,15	8,43	-4,87	-0,53	1,93	10,41
70	-0,03	5,03	0,05	8,75	1,55	7,88	1,24	12,18	-6,05	1,32	1,84	8,64
<b>Total</b>	<b>-0,32</b>	<b>8,54</b>	<b>0,97</b>	<b>13,99</b>	<b>1,64</b>	<b>12,05</b>	<b>1,13</b>	<b>12,18</b>	<b>-5,36</b>	<b>1,75</b>	<b>1,62</b>	<b>10,41</b>

**Taula 8.3.3. Resultats preliminars de les heurístiques RC31, RC32, RC33, RC34, RC35 i RC36**  
( $np_0=40$ )

<i> D </i>	RC31		RC32		RC33		RC34		RC35		RC36	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	-0,38	3,37	0,16	3,88	-1,31	1,63	1,20	5,27	-5,06	1,60	0,31	4,39
60	-2,28	1,13	2,25	1,20	0,64	3,78	-0,55	2,87	-3,24	3,01	1,45	7,85
70	-6,31	0,35	0,43	7,11	-0,88	6,12	0,62	6,18	-3,30	1,46	-1,66	3,82
<b>Total</b>	<b>-2,99</b>	<b>3,37</b>	<b>0,95</b>	<b>7,11</b>	<b>-0,52</b>	<b>6,12</b>	<b>0,42</b>	<b>6,18</b>	<b>-3,87</b>	<b>3,01</b>	<b>0,03</b>	<b>7,85</b>

**Taula 8.3.4. Resultats preliminars de les heurístiques RC41, RC42, RC43, RC44, RC45 i RC46**  
( $np_0=40$ )

<i> D </i>	RC41		RC42		RC43		RC44		RC45		RC46	
	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%	AI%	MI%
50	0,03	7,46	1,33	7,05	1,65	9,53	-0,26	8,52	-7,52	0,91	2,71	8,85
60	-1,41	3,03	2,95	10,45	0,98	5,20	-1,16	3,89	-10,37	-1,46	0,59	4,14
70	-0,04	5,41	0,46	8,78	-1,05	3,77	2,35	5,99	-11,85	1,09	0,80	8,67
<b>Total</b>	<b>-0,47</b>	<b>7,46</b>	<b>1,58</b>	<b>10,45</b>	<b>0,53</b>	<b>9,53</b>	<b>0,31</b>	<b>8,52</b>	<b>-9,91</b>	<b>1,09</b>	<b>1,37</b>	<b>8,85</b>

## 8.4 Conclusions de l'experiment preliminar

Amb els resultats dels apartats 8.1, 8.2 i 8.3 es conclou que els tres millors valors en mitjana de AI% obtinguts per a les heurístiques de Relaxament i fixació són 3,65, 3,11 i 1,71 per a RF14, RF12 i RF13, respectivament. Els tres millors valors en mitjana de AI% obtinguts per a les heurístiques de BCM són 4,08, 2,23 i 2,20 per a BCM1 quan  $L=5$ ,  $L=2$  i  $L=1$ , respectivament. Finalment, el millor valor en mitjana de AI% obtingut per a les heurístiques de Radis creixents és 4,11 per a RC12, molt destacada de la resta d'heurístiques de Radis creixents.



## 9. Referències

- Aoki K., Nara K., Satoh T., Kitagawa M., & Yamanaka K. (1990) New Approximate Optimization Method for Distribution System Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5, 126-132.
- Avella, P., Villacci, D., & Sforza, A. (2005) A Steiner arborescence model for the feeder reconfiguration in electric distribution networks. *European Journal of Operational Research*, 164, 505–509.
- Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C, Alcayde. A., & Gómez, J. (2011) Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 15, 1753-66.
- Camblong, H., Sarr, J., Niang, A. T., Curea, O., Alzola, J. A., Sylla, E. H., & Santos, M. (2009) Micro-grids project, Part 1: Analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal. *Renewable Energy*, 34, 2141-2150.
- Caserta, M., & Voß, S. (2009) Corridor selection and fine tuning for the corridor method. *Lecture Notes on Computer Science* 5851, 163–175.
- Caserta, M., Voß, S., & Sniedovich, M. (2011) Applying the corridor method to a blocks relocation problem. *OR Spectrum*, 33, 915-929.
- Chaurey, A., Ranganathana, M., & Mohanty, P. (2004) Electricity access for geographically disadvantaged rural communities-technology and policy insights. *Energy Policy*, 32, 1693–1705.
- Cossi A. M., Romero R., & Roberto J. (2005) Planning of Secondary Distribution Circuits Through Evolutionary Algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20, 205-213.
- Díaz-Dorado E., Míguez E., Cidrás J. (2001) Design of Large Rural Low-Voltage Networks Using Dynamic Programming Optimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16, 898-903.

- Díaz-Dorado E., Cidrás J., Míguez E. (2003) Planning of Large Rural Low-Voltage Networks Using Evolution Strategies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18, 1594-1600.
- Dillenberger, Ch., Escudero, L. F., Wollensak, A., & Zhang, W. (1994) On Practical Resource Allocation for Production Planning and Scheduling with Period Overlapping Setups. *European Journal of Operational Research*, 75, 275–286.
- El Bassam, N. (2001) Renewable energy for rural communities. *Renewable Energy*, 24, 401-408.
- Ferrer-Martí, L., Garwood, A., Chiroque, J., Escobar, R., Coello, J., & Castro, M. A. (2010) A community smallscale wind generation Project in Peru. *Wind Engineering*, 34, 277-288.
- 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*, 50, 127-143.
- Ferrer-Martí, L., Garwood, A., Chiroque, J., Ramirez, B., Marcelo, O., Garfi, M., & Velo, E. (2012). Evaluating and comparing three community small-scale wind electrification projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5379–5390.
- Ferrer-Martí, L., Domenech, B., García-Villoria, A., & Pastor, R. (2013) A MILP model to design hybrid windphotovoltaic isolated rural electrification projects in developing countries. *European Journal of Operational Research*, 226, 293-300.
- Fischetti, M., Lodi, A. (2002) Local Branching Heuristic. *Mathematical Programming Ser. B*, 98, 23–47.
- Fischetti, M., Polo, C., & Scantamburlo, M. (2004) A Local Branching Heuristic for Mixed-Integer Programs with 2-Level Variables, with an Application to a Telecommunication Network Design Problem. *Networks*, 44, 61–72.
- Flavin C., Hull M. (2005) Energy for development. The Potential Role of Renewable Energy in Meeting the Millennium Development Goals. *Worldwatch Institute*.



- Georgopoulou, E., Lalas, D., & Papagiannakis, L. (1997) A multicriteria decision aid approach for energy planning problems. The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, 103, 38–54.
- González-Ferreiro D., & Bosque J. (2008) Generación de un mapa de vientos en un SIG. *Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. Boletín de la A.G.E.* 47, 51-77.
- Gorien T., & Foote B. (1981) Distribution-system planning using mixed-integer programming. *IEE Proceedings*, 128, 70-79.
- Gueymard, C.A., & Wilcox, S. M (2011) Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data. *Solar Energy*, 85, 1068-1084.
- Gupta, A., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2011) Modelling of hybrid energy system Part I: Problem formulation and model Development. *Renewable Energy*, 36, 459-465.
- GWEC (2016). Global Wind Report Annual Market Update 2015. *Global wind energy council*.
- Henao, F., Cherni, J. A., Jaramillo, P., & Dyrner, I. (2012) A multicriteria approach to sustainable energy supply for the rural poor. *European Journal of Operational Research*, 218, 801–809.
- IEA (2014). World Energy Outlook., visitat el 19 de juliol de 2016.
- IEA (2016). [www.iea.org/topics/energypoverty](http://www.iea.org/topics/energypoverty), visitat el 19 de juliol de 2016.
- Kanase-Patil, A.B., Saini, R. P, & Sharma, M. P. (2010) Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area. *Renewable Energy*, 35, 1342–1349.
- Keller, S., Naciri, S., Nejmi, A., & Dos Ghali, J. (2007) Simulation-based decision support tool for electrification of isolated areas using a network with multiple renewable sources. *International Conference on Clean Electrical Power*, 1-8.

- Kirubi, C., Jacobson, A., Kamme, D. M., & Mills, A. (2009) Community-based electric micro-grids can contribute to rural development: Evidence from Kenya. *World Development*, 37, 1208-1221.
- Lambert, T.W., & Hittle, D. C. (2000) Optimization of autonomous village electrification systems by simulated annealing. *Solar Energy*, 68, 121-32.
- Lew, D. J. (2000) Alternatives to coal and candles: wind power in China. *Energy Policy*, 28, 271-286.
- López A., Roberts B., Heimiller D., Blair N., Porroun G. (2012) U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis. Technical Report NREL/TP-6A20-51946. *National Energy Renewable Laboratory (USA)*.
- Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D., & Rios-Moreno, G. J. (2012) Optimal sizing of renewable hybrids energy systems. A review of methodologies. *Solar Energy*, 86, 1077-1088.
- Luo, G. (2007) The Analysis on Current Situation, Difficulties and Strategies on Power Universal Service in China Rural Areas. *Journal of North China Electric Power University (Social Sciences)*.
- Maniezzo, V., & Voß, S. (2009) Matheuristics: Hybridizing Metaheuristics and Mathematical Programming. *Annals of Information Systems*, 11.
- Mendes, G., Ioakimidis, C., & Ferrao, P. (2011) On the planning and analysis of Integrated Community Energy Systems: A review and survey of available tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4836– 4854.
- Merz K., Crugnola G., Bonduelle G., Bruggeman R., Linck F., Linke R., Cilia, J. Heron C., Marckx E. (2013) Battery energy storage for rural electrification systems. *EUROBAT- Association of European Automotive and Industrial Battery Manufacturers*.

- Michelon, B., Nejmi, A., Dos Ghali, J., Dahman, A., & Bolay, J. (2008) Electrification of Isolated Areas by Interconnecting Renewable Sources (ERD Project): Lessons Learned. *Proceeding of the International Conference on Sustainable Energy Technologies*, 747-752.
- Míguez E., Cidrás J., Díaz-Dorado E., & García-Dornelas J. L. (2002) An Improved Branch-Exchange Algorithm for Large-Scale Distribution Network Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17, 931-936.
- Mitra J., Patra S., & Ranade S. (2005) A Dynamic Programming Based Method for Developing Optimal Microgrid Architectures. *15th Power System Computation Conference*.
- Mitra, I. (2008) Optimum utilization of renewable energy for electrification of small islands in developing countries. Ph.D. dissertation in Renewable Energies and Energy Efficiency, 11th ed. Vol. 11, J.Schmid, Ed. Univ. Kassel, 7-213.
- Modi V., Adkins E., Kennedy K., Fouad H., Forest L., Sherpa S., Aviles J., Koinei P., Thompson J., Cosmaciuc R. (2015) Infrastructure from the Bottom Up an overview and assessment of the millennium village project energy and infrastructure sector after five years. *The earth institute. Columbia university*.
- Mortensen, N., & Peterson, E. (1998) Influence of topographical input data on the accuracy of wind flow modeling in complex terrain. *European Wind Energy Conference & Exhibition*, Dublin (Ireland).
- Nandi, S. K., & Gosh, H. R. (2010) Prospect of wind-PV-battery hybrid power system as an alternative to grid extension in Bangladesh. *Energy*, 35, 3040-3047.
- Nara K., Satoh T., Kuwabara H., Aoki K., Kitagawa M., & Ishihara T. (1992) Distribution Systems Expansion Planning by Multi-Stage Branch Exchange. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7, 208-214.
- Niez, A. (2010) Comparative Study on Rural Electrification Policies in Emerging Economies. *OECD/IEA*.

- Ponce de Leao M.T, & Matos M. (1999) Multicriteria distribution network Planning using simulated annealing. *International Transactions in Operational Research*, 6, 377-391.
- Quintana V. H., Temraz H. K., & Hipel K. W. (1993) Two-stage power system distribution planning algorithm. *IEE Proceedings*, 140, 17-29.
- Ranaboldo, M., Ferrer-Martí, L., García-Villoria A., & Pastor, R. (2013) Heuristic indicators for the design of community off-grid electrification systems based on multiple renewable energies. *Energy*, 50, 501-12.
- Ranaboldo M., Ferrer-Martí, L., & Velo E. (2014a) Micro-Scale Wind Resource Assessment for Off-Grid Electrification Projects in Rural Communities. A Case Study in Peru. *International Journal of Green Energy*, 11:1, 75-90.
- Ranaboldo, M., Domenech, B., Vilar, D., Ferrer-Martí, L., García-Villoria, A., & Pastor, R. (2014b) Renewable energy projects to electrify rural communities in Cape Verde. *Applied Energy*, 118, 280–291.
- Rekinger M., Thies F., Masson G., & Orlandi S. (2015) Global Market outlook for solar power 2015-2019. *European Photovoltaic Industry Association*.
- Rojas-Zerpa, J. C., & Yusta, J. M. (2014) Methodologies, technologies and applications for electric supply planning in rural remote areas. *Energy for sustainable development*, 20, 66-76.
- Sempértegui R., Bautista J., Griño R., & Pereira J. (2003) Un modelo PLEM para planificar la distribución de energía eléctrica en entornos urbanos. *Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización*, 111-122.
- Shah, V., & Booream-Phelps, J. (2015) Crossing the Chasm. Solar Grid Parity in a Low Oil Price Era. *Deutsche Bank Markets Research*.  
[www.db.com/cr/en/docs/solar\\_report\\_full\\_length.pdf](http://www.db.com/cr/en/docs/solar_report_full_length.pdf), visitat el 15 de juliol de 2016.
- Silver Edward, A. (2004) An overview of heuristic solution methods. *The Journal of the Operational Research Society*, 55, 936-956.

- Sniedovich, M., & Voß, S. (2006) The corridor method: a dynamic programming inspired metaheuristic. *Control and Cybernetics*, 35, 551-578.
- Sridhar, V., Park, J. S., & Gavish, B. (2000) LP-based heuristic algorithms for interconnecting token rings via source routing bridges. *Journal of Heuristics*. 6, 149-166.
- Ter-Gazarian A. G., & Kagan N. (1992) Design model for electrical distribution systems considering renewable, conventional and energy storage units, *IEE Proceedings*, 139, 499-504.
- Thirault, D., Bésanger, Y., Hadjsaid, N., Almeida, A., & Huard, G. (2002) Cost Estimation of Different Electric Systems for Rural Areas in Developing Countries. *Power Engineering Society Summer Meeting IEEE*, 1, 23-28.
- Thomadsen T., & Stidsen T. (2007) The generalized fixed-charge network design problem. *Computers and Operations Research*, 34, 997-1007.
- Türkay B. (1998) Distribution System Planning Using Mixed Integer Programming. *Elektrik*, 6, 37-48.
- Wall D.L., Thompson G.L., Northcote-Green J.E.D. (1979) An Optimization Model for Planning Radial Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 3, 1061-1068.
- White, L, Smith, H., & Currie, C. (2013) OR in developing countries: A review. *European Journal of Operational Research*, 226, 293–300.
- Williams, R. G. (1999) Non-Linear Surface Interpolations: Which Is The Wind Blowing? *ESRI 1999 International Users Conference. Environmental Systems Research Institute, Inc., (ESRI). San Diego (Estats Units)*
- Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L., & Yang, H. (2010) Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid sola-wind power generation systems. *Applied Energy*, 87, 380-389.