

Tesi Doctoral

**Lleis d'Escala i Complexitat Estructural de les
Infraestructures Tecnològiques. Els Sistemes
Biològics com a Analogia pel Disseny i Optimització
del Transport i Distribució de l'Energia Elèctrica**

Ricard Horta Bernús

Universitat Politècnica de Catalunya

Director

Martí Rosas i Casals

Programa de doctorat en Sostenibilitat

Institut de Sostenibilitat

Desembre de 2013

Tesi presentada per obtenir el títol de Doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya

Resum

Dins del paradigma de la sostenibilitat, aquesta tesi pretén aportar punts de vista complementaris als de l'enginyeria convencional amb l'objectiu de proposar eines que facilitin per una banda, trobar solucions per millorar el disseny de les línies elèctriques d'alta tensió, i per una altra optimitzar les xarxes constituïdes per aquestes. Pel que fa a la millora del disseny d'una línia d'alta tensió, s'han utilitzat les teories de les Lleis d'Escala i els Models Gravitacionals per aportar noves variables als càlculs de previsió de demanda elèctrica d'una regió. S'han proposat modificacions al diagrama vectorial de funcionament d'una línia elèctrica, conegut com a Diagrama Perrine-Baum, per incorporar les noves variables proposades amb l'objectiu que aquest diagrama pugui ser una eina d'aplicació en projectes reals. Pel que fa a les xarxes elèctriques s'han aplicat les eines d'anàlisi aportades per les teories de Xarxes Complexes per estudiar la seva topologia i les característiques espacials, amb l'objectiu de proposar dissenys més òptims.

Paraules clau

Línies elèctriques d'alta tensió; xarxes elèctriques d'alta tensió; lleis d'escala; models gravitacionals; diagrama Perrine-Baum; xarxes complexes

Abstract

Within the paradigm of sustainability, this thesis aims to provide complementary views to the conventional engineering in order to put forward tools that facilitate, on the one hand the search of solutions to improve the design of high-voltage power lines , and on the other hand to optimize their networks. As per the improving of a high-voltage line design, Scaling Laws and Gravity Models are used to provide new variables to estimate calculation of the electricity demand of a certain area. This article proposes modifications to the vector diagram of a transmission line operation, known as a Perrine-Baum Diagram to incorporate the new variables proposed with the objective to use this diagram as an application tool in real projects. Regarding the electric power networks, this work applies the analysis tools provided by the theories of Complex Networks to study its topology and spatial features in order to suggest more optimal designs.

KEYWORDS

High-voltage power lines; high-voltage electric networks; scaling laws; gravity models; Perrine-Baum diagram; complex networks.

Agraïments

Hi ha dies que poden esdevenir punts d'inflexió en les nostres vides. Se'ns dubte, el dia que el Martí Rosas va posar a les meves mans el llibre que porta per títol *Six Degrees of Separation* de Duncan Watts, va ser un d'aquests dies en la meva vida. És el primer que li he d'agrair. Li he d'agrair també la seva oferta de treballar amb ell i amb el seu equip, i sobre tot la seva dedicació i paciència amb mi. Amb ell i gràcies a ell, he descobert que dins de la paraula “recerca” s'amaga molt més del que jo pensava. Ell m'ha posat en contacte amb investigadors reconeguts que m'han obert els ulls i de vegades m'han posat en el lloc que em pertocava: sóc un infant en el món de la recerca. Aquest és el cas del Sergi Valverde, al que també li agraeixo les seves visions i contribucions “rupturistes”. Vull agrair també a l'Oliver Planes que arruïnés repetidament els meus resultats amb els seus tests d'anàlisi estadístic.

Vaig iniciar els meus estudis de doctorat fa més anys dels que habitualment són necessaris per doctorar-se. Normalment sempre hi ha motius personals aliens als propis estudis quan això succeeix. En el meu cas s'afegeix el fet que els àmbits de recerca triats dins de la meva àrea de coneixement, l'enginyeria elèctrica, no cobrien les meves “ambiciosos” expectatives del que jo volia aportar al món científic i a la societat en general, la qual cosa va provocar canvis en les línies de recerca triades. I dic “ambiciosos”, perquè d'alguna manera, volia imitar als 17 científics del MIT comandats per Donella Meadows, que al 1972 van publicar l'informe *The Limits to Growth* encarregat pel Club de Roma. La seva lectura va canviar la meva manera de veure el món. Agraeixo a Josep Xercavins el fet que me'l recomanés quan ell era professor meu.

Vull agrair el recolzament del meu professor Ricard Bosch per ajudar-me a obrir els ulls dins el meu departament. Ell em va fer veure que hi ha camins diferents i em va animar a no tenir por d'endinsar-me en ells. Em va mostrar que era possible escapar dels “clixés” investigadors imperants en el meu departament.

La meva convicció que havia de fer alguna cosa, més enllà del que els meus coneixements d'enginyeria elèctrica em permetien, va quedar confirmada quan vaig llegir *Collapse* de Jared Diamond. Agraeixo al meu professor i actualment company Juan Martínez el fet que em recomanés la seva lectura i també les moltes converses que he mantingut amb ell.

Vull agrair al meu professor i company Luis Martínez Barrios, haver estat sempre al meu costat i haver-me recolzat en els meus deliris docents i investigadors. Ell ha estat el millor professor que he tingut, i per això, font d'inspiració en intentar fer les coses el millor possible. També va ser ell qui em va temptar ja fa quasi dues dècades a dedicar-me a la docència, i per tant és ell el responsable en primer terme de la meva trajectòria professional que finalment m'ha portat a realitzar aquesta tesi.

Vull agrair l'ajuda de la Marilà Lucas en les traduccions dels articles publicats i dels que estan en procés de publicació. També la seva comprensió amb mi pel poc temps lliure del que he disposat durant tots aquests estudis.

Cada vegada que assoleixo una fita en el meu progrés intel·lectual, tinc molt a agrair a la meva mare i la meva àvia. A la meva mare, la confiança que ha tingut sempre en mi, i a la meva àvia per haver-me inculcat des de ben petit la idea que amb treball es pot aconseguir qualsevol fita.

Terrassa, desembre de 2013

Pròleg

El conjunt de fets i processos que giren al voltant de l'ésser humà, des que apareix fins la nostra actualitat, es coneix com a *Història Universal*¹. Els historiadors solen dividir-la en quatre grans períodes, l'últim dels quals se'l coneix com a Edat Contemporània. Aquest període s'inicia al 1789 (Revolució Francesa) amb la Il·lustració i la Revolució Industrial, i arriba fins els nostres dies. Tot i que la història de la humanitat ha estat marcada per una successió de descobriments i invents, no va ser fins el segle XVIII, que el coneixement i la tecnologia van ser responsables d'un canvi de paradigma, especialment a Europa, portant a la humanitat a la Revolució Industrial. La industrialització i la producció en sèrie van permetre abaratir els costos de producció, i van fer possible arribar molts productes, que fins llavors eren considerats de luxe, a la major part de la població (Escudero 1997). Va sorgir una classe mitjana i una societat basada en el consum a gran escala, la societat de consum. Aquest comportament, junt amb l'important increment de la població², han provocat l'explotació dels recursos naturals de la terra a un ritme no comparable amb etapes anteriors, portant-nos en la actualitat a una degradació dels ecosistemes a escala terrestre per contaminació i pèrdua de biodiversitat. Als efectes mediambientals cal sumar-li la influència en l'aparició de greus desequilibris socials, tant a escala local, com nacional o internacional. Les societats són ens complexos que es caracteritzen per disposar d'un gran flux d'informació per prendre decisions de forma centralitzada, amb una sofisticada coordinació entre els seus diferents sectors i canals de comandament formals. Gran part d'aquesta estructura sembla que estigui capacitada per contrarestar els problemes mediambientals i socials, però la veritat és que altres societats antigues, com el cas de l'illa de Pascua, els anasazi, els maies o els víkings han col·lapsat i desaparegut per aquests motius, i fan que ens preguntem ¿per què algunes societats prenen decisions catastròfiques que acaben malmetent-les o fins i tot destruint-les?. Jared Diamond (Diamond 2005) ho analitza i proposa tres possibles respostes a aquesta pregunta. Una possibilitat és que la societat no sigui capaç de preveure un problema abans que aquest es manifesti. Una segona resposta pot ser, que aquesta societat, una vegada s'ha adonat del problema, no intenti solucionar-lo. Per últim, en cas que el vulgui solucionar, pot ser que no ho aconsegueixi. Actualment la nostra societat és conscient d'importants problemes mediambientals i socials que té, i està intentant lluitar contra ells. Però, tal i com molt bé il·lustren els autors de *The limits to growth* (Meadows et al. 1972), amb el símil del estany i el nenúfar³, la majoria d'aquests tipus de problemes tenen una evolució temporal exponencial, i quan el problema és detectat, el temps que hi ha

¹ Diccionari de la Real Academia Española (<http://www.rae.es/rae.html>) [Consulta: 4 de febrer 2013]

² Al voltant del 1800 la població era de 1.000 milions, i en l'actualitat és de 7.000 (http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/history_07) [Consulta: 5 de febrer 2013]

³ Per il·lustrar d'una manera gràfica l'evolució exponencial, els autors de *The limits to growth* comparen aquestes evolucions amb el creixement d'un nenúfar dins d'un estany, que creix duplicant les seves dimensions cada dia. Per tal que el nenúfar ocupi una quarta part de la superfície de l'estany han de passar molts dies, però una vegada arribat a aquestes dimensions, només li queden dos dies per cobrir-lo completament.

per reaccionar és molt limitat. En aquesta tesi, s'utilitzen i es combinen conceptes i coneixements de disciplines com la biologia, l'estadística, l'economia o la física, per aportar altres punts de vista que pretenen ser complementaris als aportats per l'enginyeria convencional, amb l'objectiu de proposar eines que facilitin la proposta de solucions per millorar el disseny i optimitzar les línies elèctriques d'alta tensió.

En cierto sentido, nada podría ser más simple que una red. Reducida a lo básico, una red es sólo una colección de objetos relacionados de un cierto modo entre sí. Por otro lado, la generalidad misma del término “red” hace que resulte escurridiza a toda definición exacta, y ésta es una de las razones por las cuales una ciencia de las redes es una tarea importante.

Duncan J. Watts¹

We believe that some of the most challenging questions in networking can only be solved in interdisciplinary teams tied to basic knowledge in engineering but also investigating unorthodox methods.

Falko Dressler i Ozgur B. Akany²

Al analizar las obras de los ingenieros, arquitectos y constructores que en tiempos pretéritos intentaron copiar a la Naturaleza, podemos constatar que muy pocos de ellos se dieron cuenta de que la Naturaleza no solo está “bellamente” construida, sino que también está idealmente “calculada”, y que al crear en su proceso evolutivo cualquiera de sus obras, une en un todo único la armonía de la belleza con la armonía de lo racional, dando la única forma justa que des de el punto de vista del ingeniero resulta ser la óptima.

I.B. Litinetski³

Gracias a la globalización, al comercio internacional, a los vuelos en avión o a Internet, hoy día todos los países de la Tierra comparten recursos y se afectan mutuamente, exactamente igual que lo hicieron la docena de clanes de Pascua. La isla polinesia de Pascua estaba tan aislada en el océano Pacífico como la Tierra lo está hoy día en el espacio.

Jared Diamond⁴

Si la industrialización, la contaminación ambiental, la producción de alimentos y el agotamiento de los recursos mantienen las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial, este planeta alcanzará los límites de su crecimiento en el curso de los próximos cien años. El resultado más probable sería un súbito e incontrolable descenso, tanto de la población como de la capacidad industrial

Donella i Dennis Meadows⁵

¹ Watts, D.J. *Seis grados de separación. La ciencia de las redes en la era del acceso*. Barcelona: Paidós, 2005

² Dressler, F., & Akan, O. B. (2010). Bio-inspired networking: from theory to practice. *Communications Magazine, IEEE*, 48(11), 176-183.

³ Litinetski, I. B. *Iniciación a la biónica*. Barcelona: Barral Editores, 1974.

⁴ Diamond, J. *Colapso*. Barcelona: Debate, 2005

⁵ Meadows. *Los límites del crecimiento*. Madrid: Santillana, 1972

0	Contingut i estructura de la tesi	25
1	Introducció	29
1.1	La inspiració en la natura	29
1.1.1	Biónica, biomimètica i biomímesis	32
1.2	Les xarxes infraestructurals	35
1.2.1	El cas de la xarxa elèctrica	36
1.3	¿Què poden aportar la biologia, l'economia o la física a l'estudi de les xarxes elèctriques?	41
1.4	Bibliografia	42
2	Lleis d'escala i consum d'energia elèctrica	43
2.1	Estat de la qüestió	43
2.1.1	Lleis d'escala en biologia	43
2.1.2	Ciutats i urbanisme	46
2.1.3	Lleis d'escala urbanes i consum elèctric	47
2.2	Objectius	52
2.3	Metodologia i hipòtesi de treball	52
2.4	Cas d'estudi (Ia): La comunitat autònoma d'Andalusia	57
2.5	Models gravitacionals	76
2.5.1	Estat de la qüestió	76
2.5.2	Objectius i hipòtesi	79
2.5.3	Metodologia	80
2.5.4	Cas d'estudi (Ib): La comunitat autònoma d'Andalusia	81
2.5.5	Problemes d'implementació. Propostes de recerca futura	87
2.6	Resum	89
2.7	Bibliografia	91
3	Complexitat estructural	95
3.1	Estat de la qüestió	95
3.1.1	Xarxes complexes	95
3.1.2	Transport vs. distribució	111
3.2	Objectius	114
3.3	Metodologia i cas d'estudi (II): Les xarxes de l'UCTE, i les xarxes de distribució XD1 i XD2.	115
3.3.1	Anàlisi purament topològic	115
3.3.2	Anàlisi espacial i optimització	119
3.3.3	Continuïtat del subministrament d'energia elèctrica	122
3.4	Resum	123

3.5 Referències	124
4 Disseny i optimització del transport i distribució de l'energia elèctrica: Integració de les lleis d'escala i models de predicció de demanda d'energia elèctrica en el diagrama Perrine-Baum.	127
4.1 Estat de la qüestió	127
4.1.1 Previsió de la demanda	127
4.1.2 Topologia de la xarxa	129
4.1.3 El consum	130
4.1.4 Al·lometria i capacitat màxima de transport d'una línia elèctrica	130
4.1.5 El diagrama de funcionament Perrine-Baum d'una línia elèctrica	132
4.2 Metodologia i hipòtesis: Proposta de modificació del sistema de traçat del diagrama Perrine-Baum	133
4.2.1 Incorporació al diagrama de Perrine-Baum d'un eix per predir la obsolescència. La influència de les lleis d'escala en la predicció del consum	137
4.3 Impacte mediambiental associat al creixement al·lomètric de la demanda	139
4.3.1 Millora de l'ús dels recursos de generació	139
4.3.2 Reducció de les pèrdues en els sistemes de transport i distribució	140
4.4 Cas d'estudi (Ic): La Comunitat Autònoma d'Andalusia	140
4.4.1 Anàlisi al·lomètric del consum d'energia elèctrica tenint en compte la grandària de la regió escollida	140
4.4.2 Anàlisi al·lomètric del consum d'energia elèctrica tenint en compte els sectors econòmics	141
4.4.3 Avaluació del coeficient al·lomètric β	142
4.4.4 Previsió de la demanda d'energia elèctrica	143
4.4.5 Dades per la construcció del diagrama Perrine-Baum	145
4.4.6 Interpretació del diagrama	148
4.5 Resum	149
4.6 Referències	150
5 Conclusions	155
5.1 Aportacions, conclusions i noves línies d'investigació	153
5.2 Una última reflexió	165
5.3 Referències	166

Annexes

Annex 1	Cas d'estudi (III): Exemple docent d'implementació del diagrama de Perrine-Baum modificat	167
Annex 2	Articles publicats i enviats per revisió	171
	Article I	171
	Article II	175
	Article III	183
	Article IV	201

Índex de figures

Figura 0.1 Organització dels capítols que configuren la tesi	25
Figura 0.2 Diagrama relacional conceptual del conjunt de la tesi	26
Figura 0.3 Casos desenvolupats en els diferents capítols de la tesi	28
Figura 0.4 Articles publicats i en procés de revisió	28
Figura 1.1 Còdex de Leonardo Da Vinci	29
Figura 1.2 Experiments de Luis Galvani	30
Figura 1.3 Electricitat animal	31
Figura 1.4 Adaptació al cinema de Frankenstein per Boris Karloff el 1.931	31
Figura 1.5 Articles amb l'ítem Biònica	33
Figura 1.6 Expressió matemàtica i gràfica de l'eficiència i la eficàcia	35
Figura 1.7 Fonts primàries i consums finals d'energia als EUA	37
Figura 1.8 Procés de generació, transport, distribució, i consum de l'energia elèctrica	38
Figura 1.9 Evolució de la xarxa elèctrica francesa	39
Figura 1.10 Gràfica d'evolució de la xarxa de transport de 400 i 220 kV	39
Figura 1.11 Ubicació de les centrals de base a Espanya	40
Figura 1.12 Densitat de la població d'Espanya al gener de 2009	40
Figura 1.13 Mapa del sistema elèctric ibèric de l'any 2013	41
Figura 2.1 Figura original de Max Kleiber	46
Figura 2.2 Energia elèctrica disponible i subministrada	49
Figura 2.3 Representació gràfica del Rang respecte de la Població per diferents ciutats d'Estats	49
Figura 2.4 Províncies de la Comunitat Autònoma d'Andalusia amb la seva extensió i nombre de municipis	57
Figura 2.5 Cas d'estudi Ia: Consums vs. habitants	59
Figura 2.6 Cas d'estudi Ia: Bandes de confiança i de predicció	62

Figura 2.7 Cas d'estudi Ia: Residus (I)	63
Figura 2.8 Cas d'estudi Ia: Residus (II)	64
Figura 2.9 Cas d'estudi Ia: Resultats obtinguts en depurar les dades	65
Figura 2.10 Cas d'estudi Ia: Anàlisi estadístic del consum total	67
Figura 2.11 Cas d'estudi Ia: Evolució en el temps del coeficient al·lomètric	69
Figura 2.12 Cas d'estudi Ia: Distribució del consum mitjà d'electricitat	70
Figura 2.13 Cas d'estudi Ia: Histograma de freqüències dels residus del consum industrial	71
Figura 2.14 Cas d'estudi Ia: Evolució temporal dels residus pels diferents sectors	73
Figura 2.15 Cas d'estudi Ia: Scatterplot i regressió	74
Figura 2.16 Cas d'estudi Ia: Comportament dels consums de les poblacions de Marbella i El Ejido	75
Figura 2.17 Cas d'estudi Ia: Dades socioeconòmiques de les poblacions de Marbella i El Ejido	76
Figura 2.18 Cas d'estudi Ib: Situació relativa de les 768 poblacions de l'estudi ubicades en la Comunitat Autònoma d'Andalusia	81
Figura 2.19 Cas d'estudi Ib: Delimitació de la zona geogràfica corresponent a la Comunitat Autònoma d'Andalusia, les províncies i la situació de les seves capitals	82
Figura 2.20 Cas d'estudi Ib: Relacions al·lomètriques (I)	84
Figura 2.21 Cas d'estudi Ib: Relacions al·lomètriques (II)	85
Figura 2.22 Proposta de regions d'estudi per aplicar models gravitacionals	89
Figura 3.1 Extrems estructurals	96
Figura 3.2 Exemple de graf amb sis vèrtexs i sis arestes	98
Figura 3.3 Distribucions de grau acumulada de sis xarxes reals	101
Figura 3.4 El fenomen 'small world' (I)	105
Figura 3.5 El fenomen 'small world' (II)	106
Figura 3.6 El pas de xarxa regular a xarxa aleatòria	107
Figura 3.7 Representació gràfica d'una xarxa amb pes	108
Figura 3.8 Definició topològica i geomètrica	110
Figura 3.9 Temps d'interrupció mig (TIM)	112

Figura 3.10	Esquema de xarxes de transport i subtransport	113
Figura 3.11	Esquema d'una xarxa de distribució MT a BT	114
Figura 3.12	Cas d'estudi II: Xarxa de transport de l'UCTE i xarxes de distribució XD1 i XD2	116
Figura 3.13	Cas d'estudi II: Distribució de probabilitat acumulada del grau	118
Figura 3.14	Cas d'estudi II: Distribució de probabilitat acumulada de la longitud de branca	119
Figura 3.15	Cas d'estudi II: Resultats de les simulacions EE i VS	120
Figura 3.16	Cas d'estudi II: Gràfic en escala log-lineal de la distribució acumulada de nusos en les antenes	121
Figura 3.17	Cas d'estudi II: Gràfic en escala log-lineal de la distribució acumulada de nusos en els bucles	121
Figura 3.18	Evolució del valor del TIEPI per les xarxes XD1 i XD2	123
Figura 4.1	Evolució del PIB i de la demanda elèctrica	128
Figura 4.2	Comparació de la potència neta instal·lada prevista respecte l'evolució de l'estimació de la potència neta instal·lada	129
Figura 4.3	Posició relativa dels vectors del sistema d'equacions	134
Figura 4.4	Posició de la recta de caiguda de tensió	135
Figura 4.5	Càlcul de l'error comès en la construcció del diagrama	136
Figura 4.6	Disposició dels conductors de la línia exemple	136
Figura 4.7	Exemple de representació d'un diagrama Perrine-Baun	137
Figura 4.8	Aspecte del diagrama final	138
Figura 4.9	Cas d'estudi Ic: Escalat al·lomètric entre el consum total d'energia elèctrica i el nombre d'habitants de les poblacions d'Andalusia	141
Figura 4.10	Cas d'estudi Ic: Escalat al·lomètric	142
Figura 4.11	Cas d'estudi Ic: Increment del consum CT (I)	145
Figura 4.12	Cas d'estudi Ic: Increment del consum CT (II)	145
Figura 4.13	Cas d'estudi Ic: Situació de la línia utilitzada com a exemple en el sistema elèctric d'alta tensió	146
Figura 4.14	Cas d'estudi Ic: Diagrama Perrine-Baum de la línia de l'exemple	148
Figura 4.15	Cas d'estudi Ic: Lectures al diagrama PB	149
Figura 5.1	Gràfic conceptual	155

Índex de taules

Taula 2.1	Taula original de l'article Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities (Bettencourt et al. 2007)	50
Taula 2.2	Cas d'estudi Ia: Nombre de poblacions per províncies i extensió	58
Taula 2.3	Cas d'estudi Ia: Distribució dels habitants per províncies i el total de la comunitat andalusa (any 2009)	58
Taula 2.4	Cas d'estudi Ia: Nombre de ciutats segons intervals de nombre d'habitants	58
Taula 2.5	Cas d'estudi Ia: Dades estadístiques (I)	61
Taula 2.6	Cas d'estudi Ia: Dades estadístiques (II)	65
Taula 2.7	Cas d'estudi Ia: Comparativa dels coeficients de determinació	66
Taula 2.8	Cas d'estudi Ia: Dades estadístiques (III)	67
Taula 2.9	Cas d'estudi Ia: Exponents al·lomètrics	68
Taula 2.10	Cas d'estudi Ib: Distribució del nombre d'habitants de les poblacions d'Andalusia	82
Taula 2.11	Cas d'estudi Ib: Resum de dades manipulades	83
Taula 2.12	Cas d'estudi Ib: Dades estadístiques (I)	86
Taula 2.13	Cas d'estudi Ib: Dades estadístiques (II)	86
Taula 3.1	Propietats bàsiques mesurades i publicades d'algunes xarxes	104
Taula 3.2	Tensions nominals segons el reglament de línies elèctriques d'AT	111
Taula 3.3	Cas d'estudi II: Informació bàsica de les xarxes objecte d'estudi	115
Taula 3.4	Cas d'estudi II: Indicadors purament topològics	117
Taula 4.1	Dades del consum final d'electricitat	132
Taula 4.2	Característiques de la línia elèctrica escollida com a exemple	136
Taula 4.3	Coeficients de pèrdues en % de l'energia consumida	140
Taula 4.4	Cas d'estudi Ic: Dades de la comunitat d'Andalusia de l'any 2002	141
Taula 4.5	Cas d'estudi Ic: Resultats d'estudis de l'al·lometria d'Andalusia	143

Taula 4.6 Cas d'estudi Ic: Valors de β i R^2	143
Taula 4.7 Cas d'estudi Ic: Previsió de la població d'Andalusia	144
Taula 4.8 Cas d'estudi Ic: Característiques de la línia elèctrica	146
Taula 4.9 Cas d'estudi Ic: Paràmetres utilitzats en la construcció del diagrama PB	147
Taula 4.10 Cas d'estudi Ic: Escenaris baix, mig i alt, per les projeccions de demanda de potència	147

Abreviatures i Símbols

Ac	Acer
Al	Alumini
an.	Anglès
AT	Alta tensió
BT	Baixa tensió
C	Coefficient d'agrupament
cal	Caloria, unitat d'energia del Sistema Internacional d'Unitats
CT	Centre de transformació
EE	Edge exchange
EUA	Estats Units d'Amèrica
FP	Factor de potència
GDP	Gross Domestic Product
I+D	Investigació i desenvolupament
IEA	Instituto de Estadística de Andalucía
INE	Instituto Nacional de Estadística
INEM	Instituto Nacional de Ocupación
kV	10^3 volts
L	Longitud de camí característica
ln	Abreviació de la funció matemàtica logaritme en base e
log	Abreviació de la funció matemàtica logaritme
MC	Monte Carlo
MG	Models gravitacionals
MT	Mitja tensió
NIEPI	Nombre d'interrupcions equivalents de la potència instal·lada
p.e.	Per exemple
PB	Perrine-Baum
PIB	Producte Interior Brut
R^2	Coefficient de correlació de Pearson
REE	Red Eléctrica Española
Ref	Referència
R_{Fase}	Resistència de fase
S	Error estàndard d'estimació
TIEPI	Temps d'interrupció equivalent de la potència instal·lada
UCTE	Union for the Coordination of the Transmission Electricity
UE	Unió Europea
UN	Organització de les Nacions Unides
UNESA	Asociación Española de la Industria Eléctrica
V	Volt, unitat de potencial elèctric del sistema internacional
VA	Volt amper, unitat d'energia aparent equivalent
VS	Vertex swapping
vs.	Versus
W	Watt, unitat de potència activa del Sistema Internacional d'Unitats

W·h	Watt hora, unitat d'energia activa
X_{Fase}	Reactància de fase
XD1	Xarxa de distribució 1
XD2	Xarxa de distribució 2
β	Símbol utilitzat a la tesi per l'exponent de la variable independent en les lleis d'escala
\cup	Símbol matemàtic d'unió de conjunts
\cap	Símbol matemàtic d'intersecció de conjunts

0 Contingut i estructura de la tesi

Aquesta tesi consta de 5 capítols, organitzats segons es mostra a la Figura 0.1. El Capítol 1 és introductor i s'hi defineixen les disciplines i les àrees de coneixement principals en les quals es recolza la tesi. Els capítols 2, 3 i 4 són el cos pròpiament de la tesi, on es plantegen i es desenvolupen els objectius, l'estat de l'art, la metodologia, les hipòtesis de treball i els casos d'estudi de la tesi. El Capítol 5 fa un recull de les aportacions, les conclusions i possibles noves línies d'investigació, així com una darrera reflexió per concloure el document de la tesi.

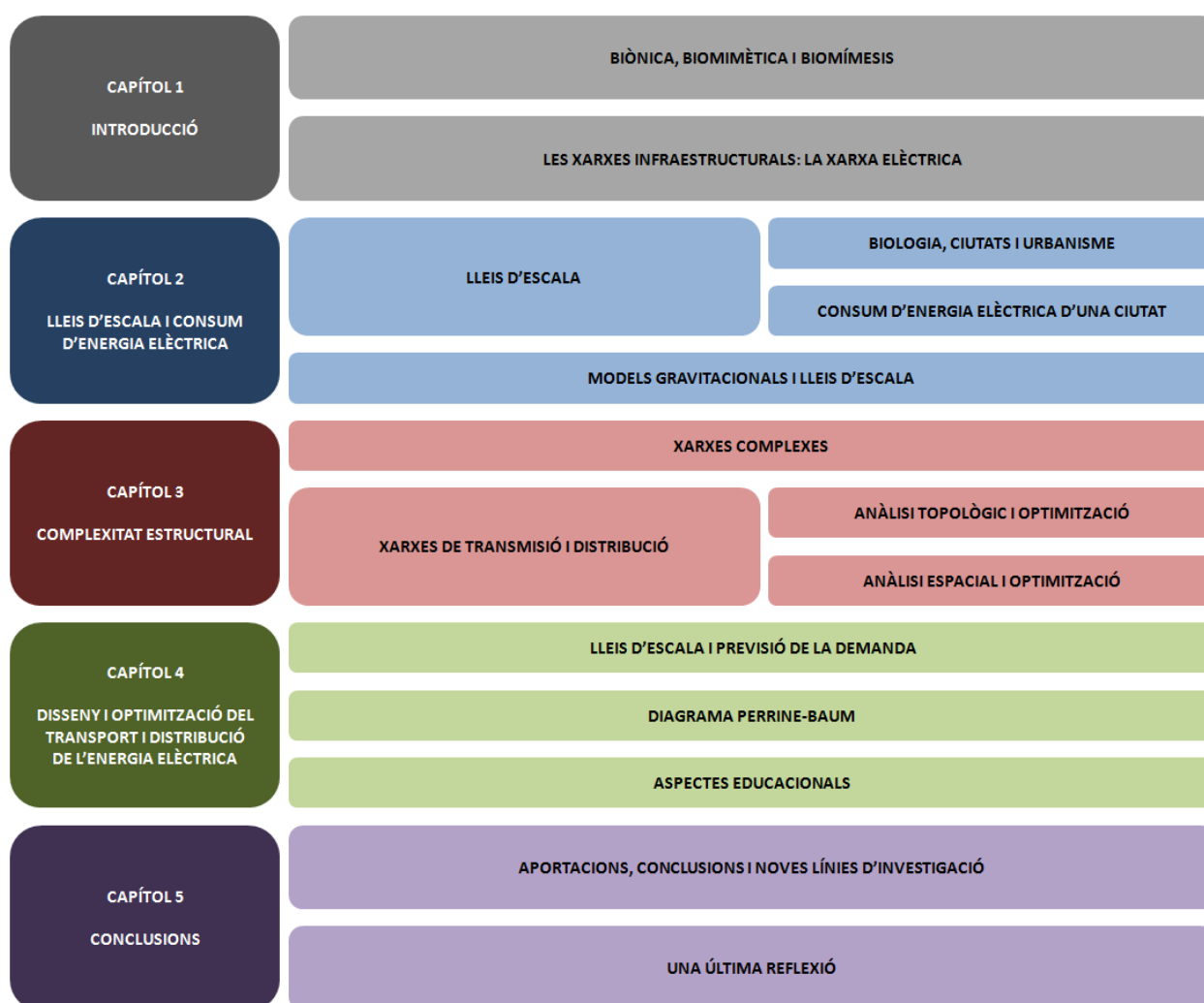
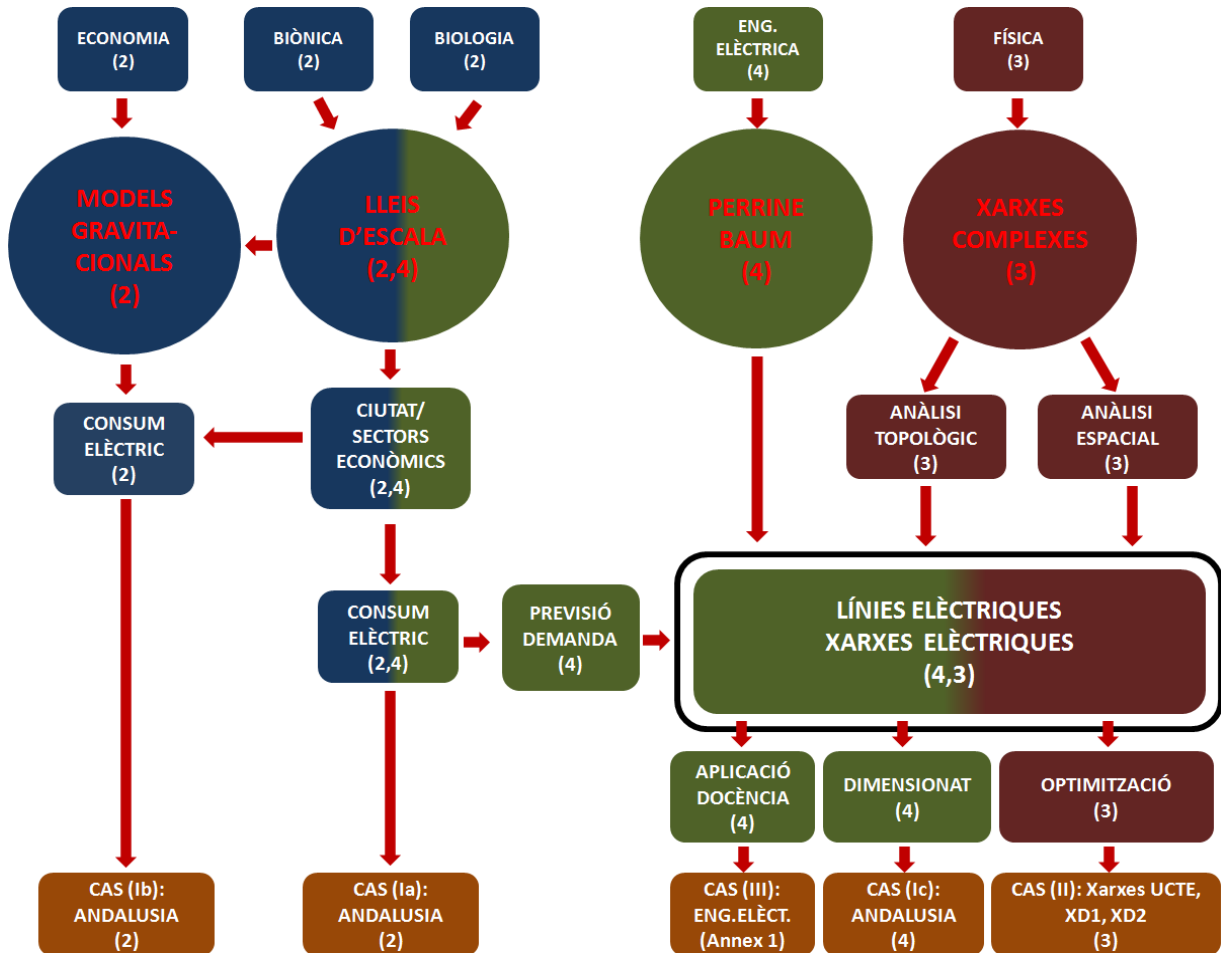


Figura 0.1 Organització dels capítols que configuren la tesi

Els continguts dels capítols 2 al 4 presentats a la Figura 0.1 es relacionen segons la Figura 0.2. Hi ha 4 blocs conceptuals principals (a la Figura 0.2 estan continguts en cercles) en els que es fonamenta el contingut de la tesi: *Lleis d'Escala* (capítols 2 i 4); *Models Gravitacionals* (Capítol 2); *Xarxes Complexes*

(Capítol 3); *Diagrama Perrine-Baum* (Capítol 4). Els blocs conceptuals *Lleis d'Escala* i *Models Gravitacionals* tenen com a objectiu l'estudi del consum d'energia elèctrica d'una població. El bloc *Xarxes Complexes* té com a objectiu aplicar les seves tècniques d'anàlisi, a l'estudi de la topologia i distribució espacial de les xarxes elèctriques de transmissió i distribució en alta tensió. Per últim el bloc *Perrine-Baum* proposa un seguit de modificacions al diagrama vectorial que pren aquest nom i que representa gràficament el funcionament d'una línia elèctrica d'alta tensió.



Simbologia



Figura 0.2 Diagrama relacional conceptual del conjunt de la tesi. El número que es mostra entre parèntesi indica el capítol. Per afegir claredat a la relació entre els diferents capítols s'ha utilitzat un codi de colors diferents. Els quadres amb dos colors indiquen una presència del concepte en dos capítols diferents.

Una de les modificacions proposades en aquest diagrama consisteix a incorporar els resultats de l'estudi dels consums d'energia elèctrica amb els mètodes de les *Lleis d'Escala*, per tal de predir la data

aproximada en què la línia cas d'estudi quedarà obsoleta pel que fa a capacitat de càrrega. Aquesta relació entre el Capítol 2 i el 4 queda reflectida amb la caixa *PREVISIÓ DE DEMANDA (4)* de la Figura 0.2.

S'han desenvolupat tres casos d'estudi on s'apliquen les hipòtesis i metodologies proposades al llarg dels capítols 2 al 4 (Figura 0.3). El *Cas d'Estudi I* utilitza les dades de consum elèctric de la Comunitat Autònoma d'Andalusia per aplicar la metodologia descrita en els capítols 2 i 4. Aquest cas s'ha dividit en 3 seccions: *Ia* i *Ib* al Capítol 2 on s'apliquen les *Lleis d'Escala* i els *Models Gravitacionals* respectivament, i *Ic* al Capítol 4 on s'aplica el *Diagrama Perrine-Baum*. El cas II es desenvolupa en el Capítol 3 amb dades de les xarxes elèctriques de l'UCTE¹, i les xarxes de distribució XD1 i XD2. El cas III (Annex 1) és l'estudi de la implementació docent del *Diagrama Perrine-Baum*, amb les modificacions proposades en el Capítol 4.

El treball del casos ha donat lloc a la publicació i enviament per publicació d'un article en congrés i tres articles en revistes indexades al JRC² (Figura 0.4):

ARTICLE I

Acta a congrés: COMPENG 2010, *Complexity in Engineering 2010*. Roma (Itàlia).

IEEE COMPUTER SOCIETY

Títol: *Discerning Electricity Consumption Patterns from Urban Allometric Scaling*³

ARTICLE II

Article en revista: IEEE Transactions on Education (Volume: 56, Issue:3).

Agost del 2013

Títol: *Modification of the Perrine–Baum Diagram to Improve the Calculation of High-Voltage Transmission Lines*⁴

ARTICLE III

Article en procés de revisió en revista Physica A

Títol: *Scaling laws in electricity consumption as a tool to characterize the evolution of economic sectors in cities*

¹ UCTE: *Union for the Coordination of Transmission Electricity*

² *Journal Citation Reports*

³ <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/COMPENG.2010.29>

⁴

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6320640&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6320640

ARTICLE IV

Article en procés de revisió en revista Journal of Urban Technology

Títol: *Obsolescence in Urban Energy Infrastructures: The Influence of Scaling Laws on Consumption Forecasting*

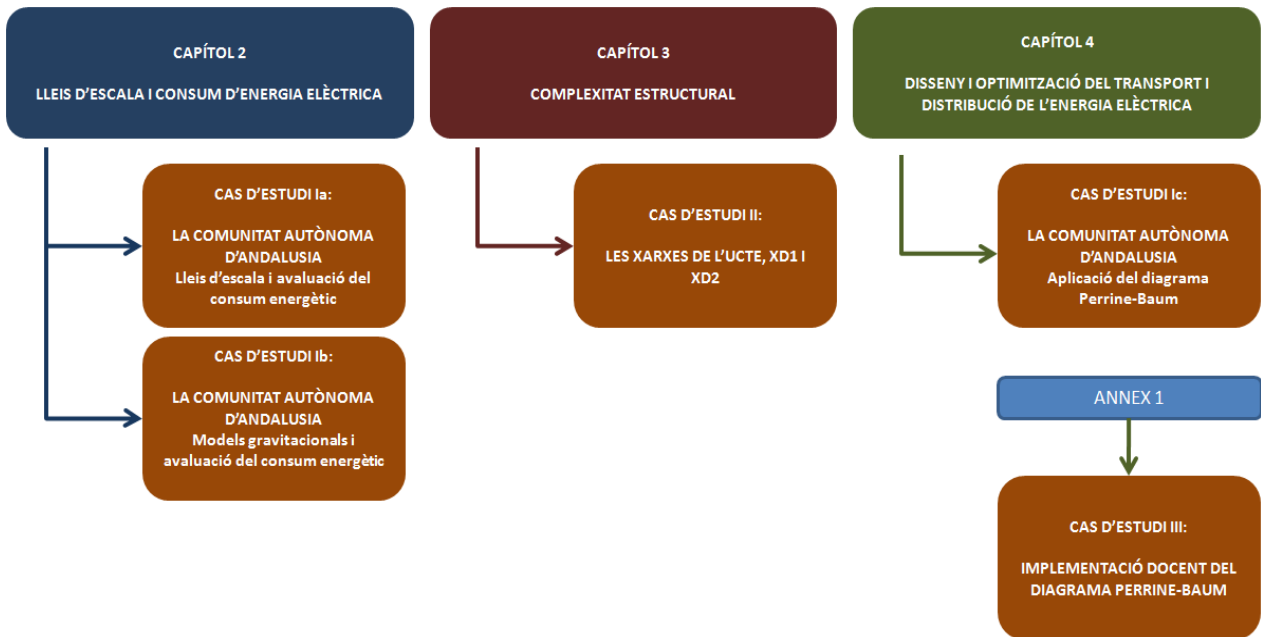


Figura 0.3 Casos desenvolupats en els diferents capítols de la tesi

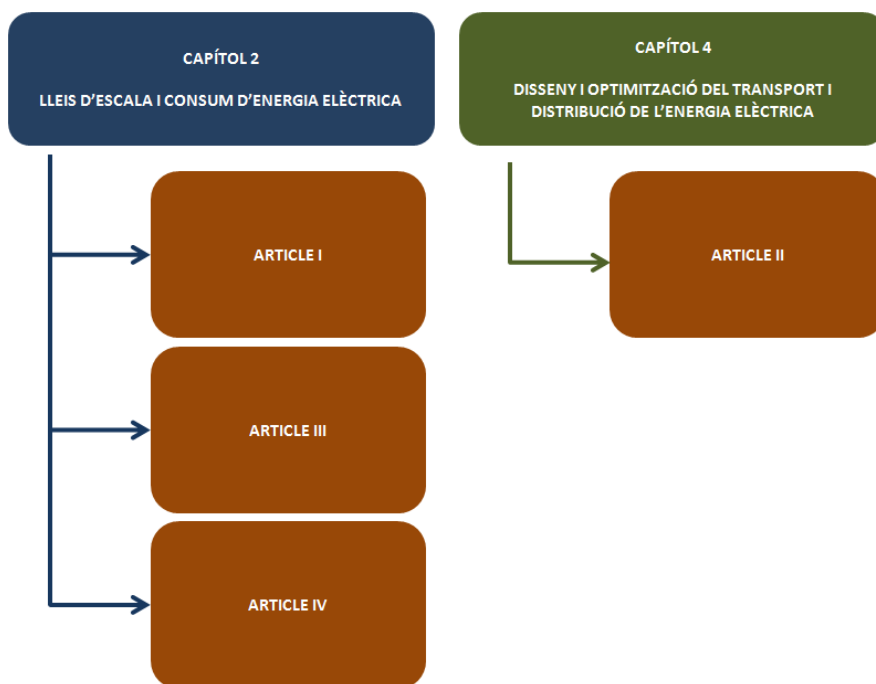


Figura 0.4 Articles publicats i en procés de revisió

1 Introducció

1.1 La inspiració en la natura

L'ésser humà en el seu intent de conèixer la realitat i construir-ne una imatge interna, utilitza diferents eines, una de la quals és el símil. Quan veiem dues realitats que s'assemblen, inconscientment tendim a construir models similars per entendre-les millor. És d'aquesta forma com s'intenten utilitzar els principis de la biologia per explicar comportaments del nostre entramat social, la nostra economia, la nostra conducta, etc.

L'home, d'una manera o altra, ha imitat a la natura per dissenyar els seus estris o màquines. Alguns dels primer exemples els trobem en les eines dels homes primitius. Les troballes arqueològiques de les primeres destrals demostren que la part tallant d'aquestes, era una pedra molt aguda que recorda la dent d'un os, és a dir, representa la còpia directa d'un model natural. Al llarg de la història de la humanitat s'han donat molts exemples d'imitació de la natura, que cada vegada són més sofisticats per les eines de càlcul utilitzades. En aquest sentit, el cas de Leonardo Da Vinci (Laurenza et al. 2006) (Figura 1.1) és un dels primers ben documentats.

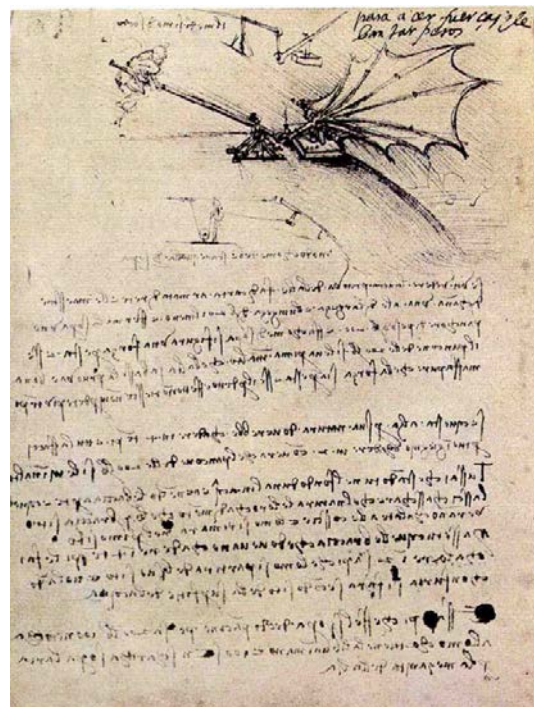
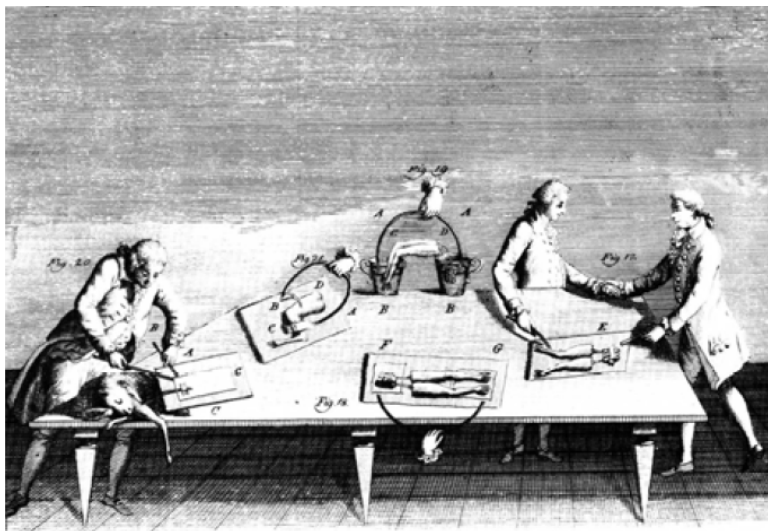
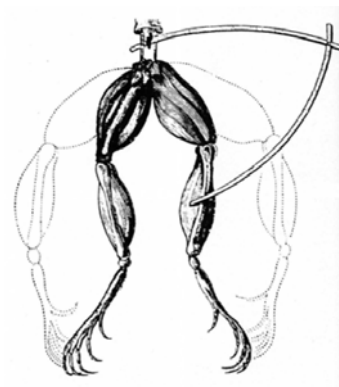


Figura 1.1 Còdex de Leonardo Da Vinci. Després d'haver fet moltes observacions d'aus i insectes, tal i com està documentat en els seus escrits (còdex Ashburnham, Milà 1485-1490), es va inspirar en les ales dels ratpenats i les libèl·lules per dissenyar enginys voladors. Se li atribueix a ell, el disseny del primer aeroplà amb possibilitats de volar. Imatges: <http://www.unmuseum.org/leosketch.htm> [Consulta: 14 de gener 2013]

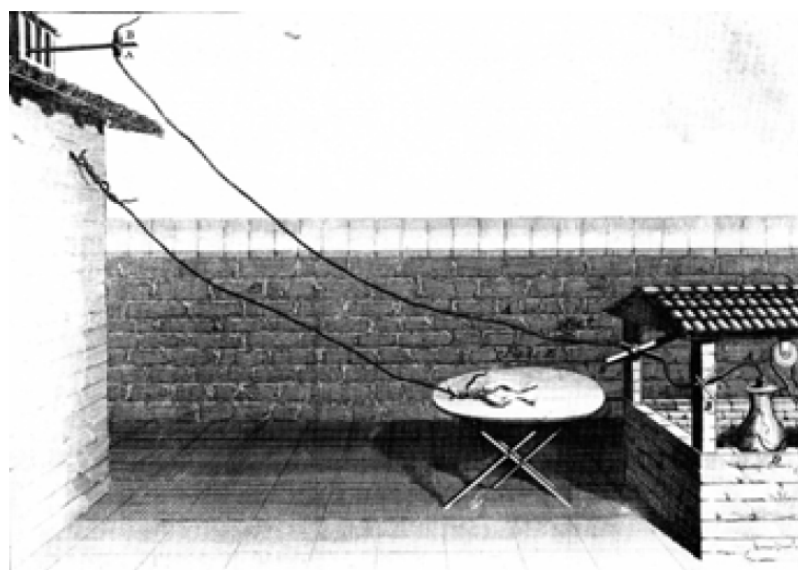
Existeixen infinitat d'exemples, però per la temàtica d'aquesta tesi, cal destacar que l'estudi de molts principis fonamentals de la teoria de l'electricitat van començar amb l'anàlisi de l'anomenada electricitat animal. Els coneguts experiments del fisiòleg italià del segle XVIII, Luis Galvani (1737-1798), realitzats amb les extremitats d'una granota, van conduir a la creació dels acumuladors galvànics, fonts químiques d'energia elèctrica (Figura 1.2). Es va experimentar amb molts altres animals, com per exemple les nombroses espècies en les quals l'electricitat era present en elles mateixes (Figura 1.3).



a



b



c

Figura 1.2 Experiments de Luis Galvani. En el seu intent de demostrar l'origen animal de l'electricitat, l'anatomista Galvani, va realitzar infinitat d'experiències en el seu laboratori (a) amb potes de granota per confirmar les seves teories. En aquests experiments "s'electrocutava" l'extremitat per tal que es contraguessin els músculs que la constituïen (b). El gravat de la figura (c) mostra l'intent de "reviure" una pota de granota captant l'electricitat d'un llamp i acumulant-la en una ampolla de Leyden¹ (Martínez 1995).

¹ Primer condensador elèctric atribuït a Pieter van Musschenbroeck (1.692-1.761)

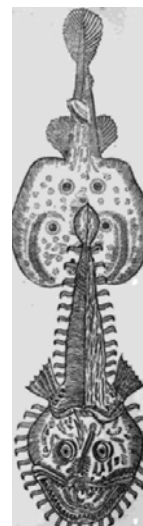


Figura 1.3 Electricitat animal. Escena del segle XVIII que il·lustra la transmissió de la descàrrega del peix torpede a una cadena humana de dues persones. A la dreta, dos dels peixos capaços de generar electricitat, la rajada (dalt) i el peix torpede (sota) (Martínez 1995)

El personatge més important del moviment “naturalista” va ser Humboldt (1769-1859). Va fer més de 4.000 experiments amb animals, plantes i amb el seu cos. En literatura, el romanticisme alemany va ser defensor d’aquest moviment “naturalista”, i l’exemple més paradigmàtic el trobem en la novel·la gòtica *Frankenstein o el modern Prometeu* (1818) de la poeta alemanya Mary Shelley (1797-1851) (Figura 1.4)



Figura 1.4 Adaptació al cinema de Frankenstein per Boris Karloff el 1931 (Font: <http://cartelesmix.es/?p=7303>) [Consulta: 19 de gener 2013]

Actualment són molts els invents i dissenys de productes que estan inspirats en els éssers vius en diferents camps de la tecnologia. Un exemple en són les xarxes tecnològiques inspirades en la natura. Les xarxes de transport per la distribució de nutrients i l'eliminació de productes de rebuig, són vitals pel funcionament dels éssers vius. Aquestes xarxes (el sistema circulatori dels animals, el sistema respiratori i neuronal o el sistema vascular de les plantes) tenen una topologia jeràrquica i característiques fractals (West et al. 2005), propietats en les que es basen les teories de l'al·lometria i les lleis d'escala² que s'utilitzen per repensar les xarxes tecnològiques. Aquests sistemes són centralitzats, però hi ha éssers vius que utilitzen xarxes descentralitzades. Els fongs en són un cas, i demostren que aquests tipus de xarxes poden ser extremadament adaptatives al medi, eficients i robustes: un fong és capaç de continuar vivint amb tota normalitat, fins i tot quan se li ha extret una part important del seu cos (Bebber et al. 2007).

Si observem detingudament la natura, és fàcil veure que les dinàmiques de molts sistemes biològics estan basades en un nombre sorprenentment petit de regles genèriques, que creen patrons de col·laboració molt eficaços per la gestió i l'assignació de tasques, la diferenciació social o la sincronització, sense la necessitat de cap ens exterior de control. Els sistemes naturals formats per múltiples elements en interacció, com la societat mateixa, el cervell, un ecosistema o una cèl·lula en són alguns casos. El seu estudi i la seva comprensió no és possible estudiant únicament les seves parts per separat. Si hom es fixa en les colònies de termites, per exemple, ens podem adonar que sense un pla de treball predefinit, ni una jerarquia entre els individus, la colònia aconsegueix construir estructures realment impressionants: si tenim es compte les escales, un termiter mesura milers de vegades l'alçada d'una termita, és a dir l'equivalent humà d'un edifici de varis quilòmetres d'alçada. Al intentar comprendre fenòmens a escales superiors a partir d'escales inferiors³, topem amb una realitat en la qual les interaccions entre els elements creen nous fenòmens (Solé 2009). En el cas de les termites, les interaccions entre els individus donen lloc a una intel·ligència col·lectiva. Aquests comportaments de la natura, han inspirat als científics en àrees com la computació (*bio-inspired computing*) dissenyant algorismes focalitzats en l'eficiència computacional i l'optimització dels processos i patrons de reconeixement; la teoria de sistemes (*bio-inspired systems*), dissenyant estructures arquitectòniques amb instal·lació massiva de sistemes "col·laboratius"; la connexió de xarxes (*bio-inspired networking*) construint estratègies per assegurar una alta eficiència de resposta sota condicions no previsible (Dressler et al. 2010); etc

1.1.1 Biònica, biomimètica i biomímesis

De vegades, hom tendeix a confondre aquests conceptes. Tot i que són similars, no signifiquen el mateix i cal fer algunes distincions. El terme *biònica*, en anglès *bionics*, va ser inventat per Jack Steele al 1960, un enginyer i psiquiatra de les forces aèries americanes que treballava a la divisió de medicina. Va utilitzar els termes *biologia* i *tècnica*, per descriure el procés de copiar, imitar i aprendre de la biologia posant un

² Aquests conceptes són eixos centrals d'aquesta tesi i s'exposen àmpliament en capítols posteriors

³ El mètode a partir del qual s'intenta comprendre un sistema a partir de les seves parts aïllades s'anomena *reduccionista*. El reduccionisme ha estat el mètode que ha dominat la visió científica durant la major part de la història de la ciència. Són exemples clars la biologia molecular i la física de partícules (Solé 2009)

èmfasi especial en la neuro-anatomia. Quan es vol recórrer a la biologia per millorar un sistema tecnològic, és la Biònica la ciència que s'encarrega d'estudiar les solucions dels éssers vius, per aplicar-les al disseny o millora dels sistemes de l'enginyeria, l'arquitectura i la tecnologia moderna (Litinetski 1974). El terme *biomimètica*, en anglès *biomimetics*, prové dels termes grecs *bios* (vida) i *mimesis* (imitar). Va ser encunyat per Otto H. Schmitt al 1969, un enginyer biomèdic que intentava imitar el moviment muscular a partir dels impulsos nerviosos generats per l'electricitat produïda pels éssers vius. Finalment el terme *biomimesis*, en anglès *biomimicry*, va ser proposat per Janine Benyus als anys 70, inspirant-se en els principis de l'ecologia i els seus dissenys. Es podria dir doncs, que la biomimètica és un concepte més restrictiu que el de biònica, i que biomimesis és més ampli, abraçant les interaccions dels éssers vius entre ells i el medi, tenint en compte per tant, tot l'ecosistema⁴. Dels tres, el terme que més s'ajusta a les propostes d'aquesta tesi és el de biònica.

La biònica s'estén a tots els camps de la recerca en biologia, des de la fisiologia i la biologia molecular a l'ecologia, i des de la zoologia a la botànica. En la darrera dècada hi ha hagut un nombre important de publicacions que contenen la paraula biònica o alguna de les seves variants. En l'estudi *The estate of the art in biomimetics* (Lepora et al. 2013), Lepora i els seus col·laboradors han trobat, en els últims 15 anys, més de 18.000 articles relacionats. Conclouen que el ritme de publicacions és actualment de 3.000 per any, i no para de créixer (Figura 1.5).

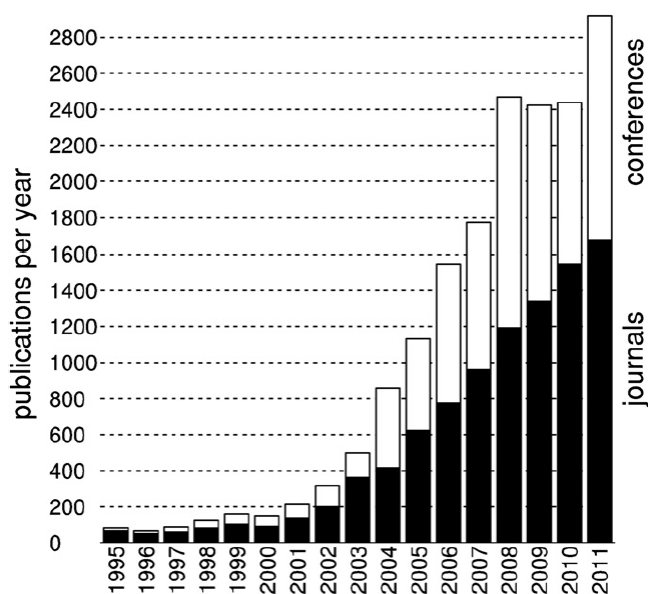


Figura 1.5 Articles amb l'ítem Biònica. Creixement per anys del nombre d'articles, conferències i llibres relacionats amb la biònica, des de 1995. Les barres negres representen la proporció en articles i les blanques a les conferències i llibres. Font: (Lepora et al. 2013)

S'espera en el futur un impacte social i econòmic important amb els avanços relacionats amb la biònica, que reportaran beneficis en la medicina i la qualitat de vida, en les tecnologies de la informació, la robòtica, la nanotecnologia i el disseny de xarxes entre d'altres.

⁴ Sobre els tres termes: <http://biologytodesign.wordpress.com/2012/05/08/design-biology-linguistics/> [Consulta: 21 de gener 2013]

Quan es mira la natura des d'una mirada biònica, és des d'una visió condicionada fortament pel principi de l'eficiència, entre d'altres. Comparar la tecnologia natural i artificial, comporta repensar conceptes centrals com els de l'eficiència i l'eficàcia i poder respondre a preguntes com: ¿són eficients els éssers vius?; ¿l'evolució és un procés que busca la constant millora de l'eficiència?; ¿l'home optimitza les seves produccions artificials de la mateixa manera que ho fa la natura?. L'eficiència es pot pensar com un acostament o allunyament d'un comportament ideal buscat, és a dir com un indicador qualitatiu. Usualment s'expressa com un quocient entre una magnitud d'entrada (denominador) i una de sortida (numerador). Si la magnitud estudiada fos per exemple, l'energia utilitzada per un animal per desplaçar-se, la magnitud d'entrada seria l'energia continguda en els aliments que ingereix l'animal, i la magnitud de sortida, l'energia mecànica equivalent del desplaçament de la massa de l'animal. En un cas ideal, aquest quocient seria 1, és a dir, no hi ha pèrdues d'energia en el procés o activitat considerada. Però les transformacions energètiques no són ideals i sempre hi ha “pèrdues” o efectes no desitjats, i per tant el quocient serà sempre menor que 1. Com més s'acosti a la unitat, més eficient es considera el sistema estudiat. Així doncs podem dir que l'eficiència ens diu com son d'adequats els mitjans utilitzats per tal d'aconseguir els objectius proposats. Es pot considerar una mesura de com són de racionals els mitjans invertits per aconseguir uns objectius. Per altra banda, per eficàcia es pot entendre el grau en que s'aconsegueixen els objectius que es pretenen assolir o també el grau en que el conjunt d'objectius està inclòs dins el conjunt de resultats. Si s'obtenen tots els fins buscats, llavors l'eficàcia és màxima (Miralles et al. 2008). Aquest dos conceptes els podem expressar matemàticament (Equacions 1.1 i 1.2) i gràficament (Figura 1.6):

$$Eficiència = \frac{|O \cap R|}{|O \cup R|} \quad 1.1$$

$$Eficàcia = \frac{|O \cap R|}{|O|} \quad 1.2$$

Un altre concepte important a tenir en compte és el de l'ajust de l'acció tècnica. Aquest el podem definir com el grau en que els objectius assolits s'ajusten als resultats reals. El cas d'ajust màxim seria el que es donaria si a la Figura 1.6 els dos cercles fossin iguals i concèntrics. Molts sistemes tecnològics tenen una eficiència baixa per haver obtingut resultats no desitjats i una eficàcia màxima per haver assolit tots els objectius previstos. Un exemple en són les xarxes elèctriques o de comunicacions. En l'apartat següent es fa una exposició de les principals característiques d'aquestes xarxes, incidint en les xarxes elèctriques que són el motiu principal d'estudi d'aquesta tesi.

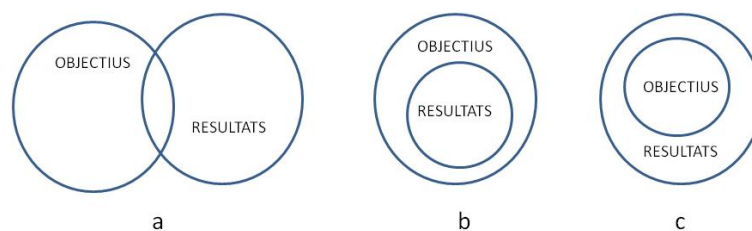


Figura 1.6 Expressió matemàtica i gràfica de l'eficiència i la eficàcia. En aquestes figures es mostren diferents relacions entre objectius i resultats. L'eficiència i l'eficàcia són molt baixes en "a", ja que els objectius assolits són pocs (tots els que estan dins la intersecció) i dels resultats obtinguts, molts no són desitjables (tots els que no estan dins la intersecció). Igualment, tant l'eficiència com l'eficàcia són baixes en "b", en quedar molts objectius per cobrir, encara que no tants com en el cas anterior. A "c" l'eficiència és baixa ja que s'han obtingut molts resultats no desitjats, però en canvi tots els objectius previstos s'han assolit i per tant l'eficàcia és màxima. Aquest últim cas pot ser el cas de molts sistemes tecnològics des de petits aparells fins a grans infraestructures com les xarxes de comunicacions o les xarxes elèctriques.

1.2 Les xarxes infraestructurals

Des del punt de vista etimològic de la paraula, *infraestructura* vol dir estructura de base (*infra=sota*⁵). Es refereix a una realització humana dissenyada i dirigida per professionals especialistes de l'àrea en que s'emmarca l'obra, i que sol estar destinada a permetre el desenvolupament d'altres activitats i el seu funcionament⁶. Quan la paraula *infraestructura* va de la mà de la paraula *xarxa*, aquestes activitats, normalment estan lligades al transport de persones o bens, ja siguin materials (mercaderies), subministraments d'energia (electricitat, gas), aigua, senyals de comunicació, etc. La societat actual necessita d'aquests subministraments per desenvolupar-se, realitzant contínuament el transport d'aquests bens i de les persones. L'origen i destinació d'aquests transports poden estar propers, dins una mateixa ciutat o regió, o allunyats entre regions diferents, països o continents. Les principals infraestructures segons aquest punt de vista són:

- Energètiques (electricitat, calor, combustibles, aigua destinada a centrals)
- De transport (terrestre, marítim, aeri)
- Hidràuliques (aigua potable, clavegueram)
- De telecomunicacions (telefonía, televisió, fibra òptica)

Normalment aquestes infraestructures són propietat de les administracions locals o centrals, i estan gestionades per aquestes. La gestió sol tenir com objectiu el manteniment d'un estàndard de servei, el canvi d'aquest per millorar-lo, o la seva eliminació. Aquest estàndard no es manté a qualsevol preu. Cal minimitzar els costos i maximitzar els beneficis associats⁷.

⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/Infraestructura_urbana [Consulta: 10 de gener 2013]

⁶ <http://oxforddictionaries.com/definition/english/infrastructure> [Consulta: 29 de gener 2013]

⁷ <http://regulationbodyofknowledge.org/> [Consulta: 29 de gener 2013]

Aquestes xarxes, no deixen de ser un conjunt d'elements interrelacionats, connectats entre si, amb una estructura⁸ determinada per constriccions espacials i geogràfiques, que condicionarà el seu funcionament i el seu comportament dinàmic⁹. Les xarxes infraestructurals es poden mirar des de perspectives diferents, com poden ser: territorial (dimensional), social, econòmica, i tècnica entre d'altres. Si les mirem simultàniament des de visions combinades, en podem destacar algunes característiques que darrerament estan sent focus d'interès d'estudis. Una d'aquestes característiques, és que les xarxes, per definició, deixen sense connexió punts intermedis entre els elements connectats. Aquest fenomen que s'ha anomenat "efecte túnel", suposa un impacta important en el territori i el seu teixit social, i de fet, provoca debats que diàriament ens mostren els mitjans de comunicació. Una altra característica rellevant de les xarxes és que el seu desplegament sobre el territori obeeix entre d'altres, a motius històrics que han forçat a conviure als diferents actors que intervenen (administracions, empreses privades, equips tècnics i actors econòmics) i que en ocasions tenen lògiques diferents que compliquen la gestió i operació de la pròpia xarxa. Per aquests i altres motius no exposats aquí, les xarxes tenen un elevat potencial organitzador del territori en tots els seus àmbits.

Quan hom intenta comprendre el funcionament d'una xarxa, amb l'objectiu de controlar-la i operar-la de manera segura i eficient, es troba amb una complexitat molt elevada. Els motius són varis (Rosas 2009). Per una banda, aquestes xarxes poden estar formades per milers de components connectats entre si a diferents nivells (temporals, espacials, capacitat, etc). En segon lloc, i tal i com s'ha exposat més amunt, en la operació d'aquestes xarxes solen estar implicats una multitud d'agents (administracions públiques centrals, regionals o locals i ens privats) amb interessos que no tenen perquè ser coincidents. Per últim i molt important, les relacions entre els elements constitutius de la xarxa, són difícils de definir, i moltes vegades massa complexes per ser tractades amb teories matemàtiques i metodologies de control convencionals (Amin 2000). Justament, aquest caràcter complex que presenten aquestes xarxes en general, i la xarxa elèctrica en particular, fa que darrerament s'estudiïn també des d'un punt de vista estadístic i topològic, utilitzant el marc teòric de la complexitat i la física estadística.

1.2.1 El cas de la xarxa elèctrica

L'electricitat és sens dubte la forma d'energia més utilitzada en el món, representa més d'un terç de l'energia consumida en els països desenvolupats¹⁰ (Figura 1.7). L'electricitat és clau en el desenvolupament industrial de tots els països, part important del desenvolupament social, i un element essencial pel desenvolupament tecnològic. Aquesta forma d'energia juga un paper molt important en la vida de les persones, ja que ha permès moltes comoditats que amb el decurs dels anys s'han tornat indispensables. L'energia elèctrica s'obté dels generadors elèctrics, a partir de la conversió d'energia

⁸ Aquí, estructura es refereix a la topologia de la xarxa, la seva forma.

⁹ Considerar una xarxa segons el seu comportament dinàmic, implica tenir en compte en un moment determinat, l'estat de tots els elements que la formen, a l'hora de calcular el flux entre aquests components.

¹⁰ El terme "desenvolupat" aplicat a un país, origina debats i controvèrsies que fan difícil proposar una definició. En tot cas, en aquest context es refereix a països amb un alt nivell de desenvolupament segons els criteris de PIB (Producte Interior Brut) per càpita i un grau elevat d'industrialització, ja que aquests dos criteris estan relacionats amb el consum energètic.

mecànica provinent d'una turbina. Per moure la turbina s'utilitza l'energia cinètica d'un fluid, com per exemple, vapor d'aigua (centrals tèrmiques i nuclears), aigua (centrals hidràuliques) o aire (centrals eòliques).

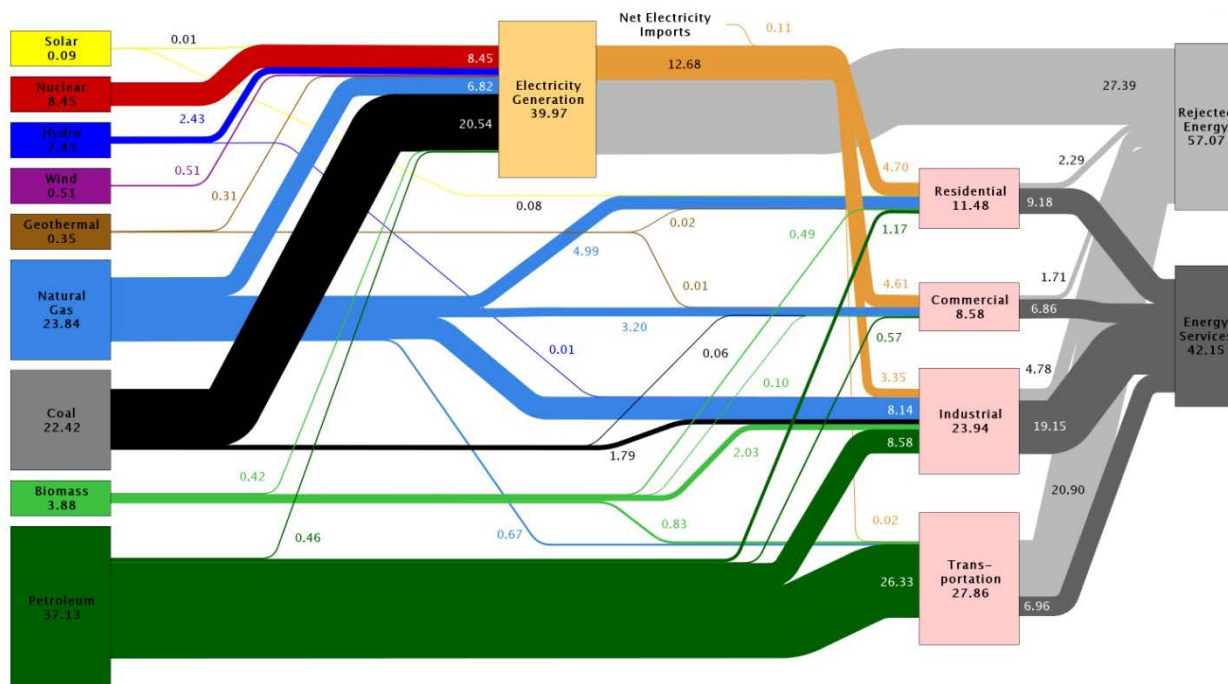


Figura 1.7 Fonts primàries i consums finals d'energia als EUA. Del total d'energia primària que utilitza el país, un 39,97% s'utilitza per produir electricitat, que s'utilitza en proporcions similars en els sectors residencial, comercial i industrial. (Font: Lawrence Livermore National Laboratory, Global Energy Network Institute <http://www.geni.org/globalenergy/library/energytrends/world-regions/usa-canada/index.shtml> [Consulta: 22 de gener 2013])

Abans de poder utilitzar l'electricitat, cal transportar-la des de les centrals productores fins els punts de consum mitjançant línies de transport a alta tensió. Cal també, adaptar la tensió a valors manejables mitjançant subestacions transformadores i repartir pel territori el fluid elèctric mitjançant subestacions distribuïdores i d'interconnexió (Figura 1.8). A la sortida de les centrals generadores es situen per tant, les estacions elevadores d'alta tensió (400 kV), es transporta a aquesta tensió fins les subestacions de transformació on es rebaixa la tensió a 220 kV. A partir d'aquest punt, hi ha una important ramificació a menor tensió, constituint la xarxa de distribució. A aquesta tensió ja hi pot haver consumidors, normalment grans consumidors industrials que per motius econòmics (el preu de venda del kW·h és més baix) contracten el subministrament a alta tensió. En successives estacions de transformació la tensió es va disminuint fins al valor de 400 V en subministrament trifàsic, i 230 V en subministrament monofàsic per arribar als consumidors finals. Cal dir que aquests valors corresponen a Espanya i la major part de països europeus (a la Figura 1.8 es mostren valors utilitzats al Japó).

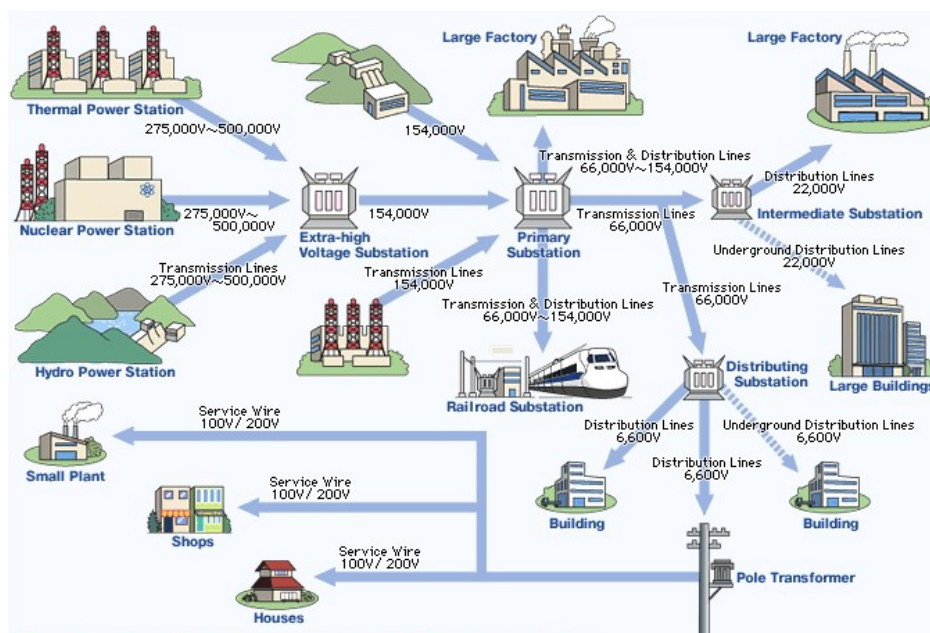


Figura 1.8 Procés de generació, transport, distribució, i consum de l'energia elèctrica. Els valors de voltatge poden variar segons els països. Els europeus presenten algunes diferències als mostrats, que corresponen al Japó. (Font: Tokyo Electric Power Company (<http://www.tepco.co.jp/en/challenge/energy/pow-net-e.html>) [Consulta: 24 de gener 2013]

Donat que l'objectiu que persegueixen aquestes xarxes és portar l'energia elèctrica des de les centrals als consumidors, el seu desenvolupament al llarg del temps obeeix a les necessitats de consum que van sorgint en el territori (Figura 1.9)

A Espanya, REE (Red Elèctrica Española), transporta l'energia elèctrica en alta tensió. Gestiona les infraestructures elèctriques que componen la xarxa de transport i connecten les centrals de generació amb els punts de distribució als consumidors. La Llei 17/2007, de 4 de juliol, va confirmar a REE com a gestor únic. REE és responsable del desenvolupament i ampliació de la xarxa, de realitzar el seu manteniment i de gestionar el trànsit d'electricitat entre sistemes exteriors i la península. La xarxa de transport és mallada i consta de més de 41.200 quilòmetres de línies d'alta tensió (Figura 1.10), més de 5.000 subestacions elèctriques i més de 78.000 MVA de capacitat de transformació¹¹. Donat que l'energia elèctrica no es pot emmagatzemar en grans quantitats, la seva producció s'ha d'igualar amb el seu consum d'una manera precisa i instantània. REE, com a operador únic del sistema, ha de garantir aquest equilibri entre producció i consum. Per fer-ho, fa previsions del consum i supervisa constantment la generació i transport, i en cas que ambdós difereixin, fa les correccions oportunes regulant la producció de les centrals. Realitza també previsions de demanda, tan a mig com a llarg termini, que s'utilitzaran a posteriori per la planificació del desenvolupament de la xarxa de transport en els anys següents.

¹¹ <http://www.ree.es/transporte/transporte.asp> [Consulta: 11 de maig 2013]

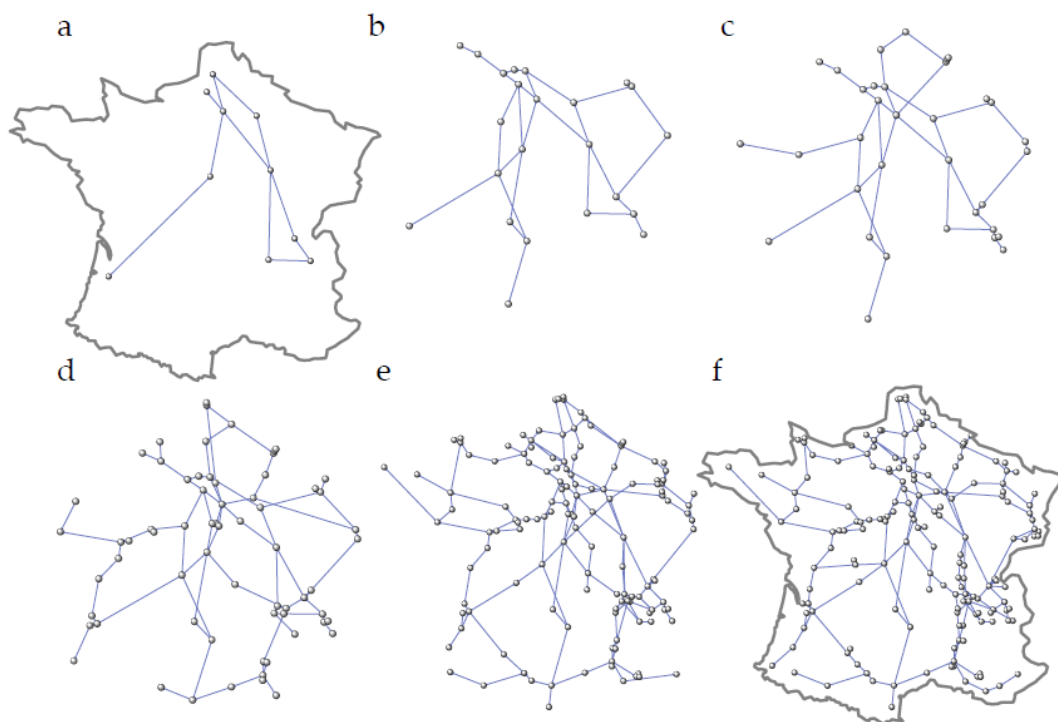


Figura 1.9 Evolució de la xarxa elèctrica francesa: (a) 1962, (b) 1972, (c) 1976, (d) 1982, (e) 1992 i (f) 2005. El punts representen centrals generadores o subestacions transformadores o d'interconnexió. Font: (Rosas 2009)

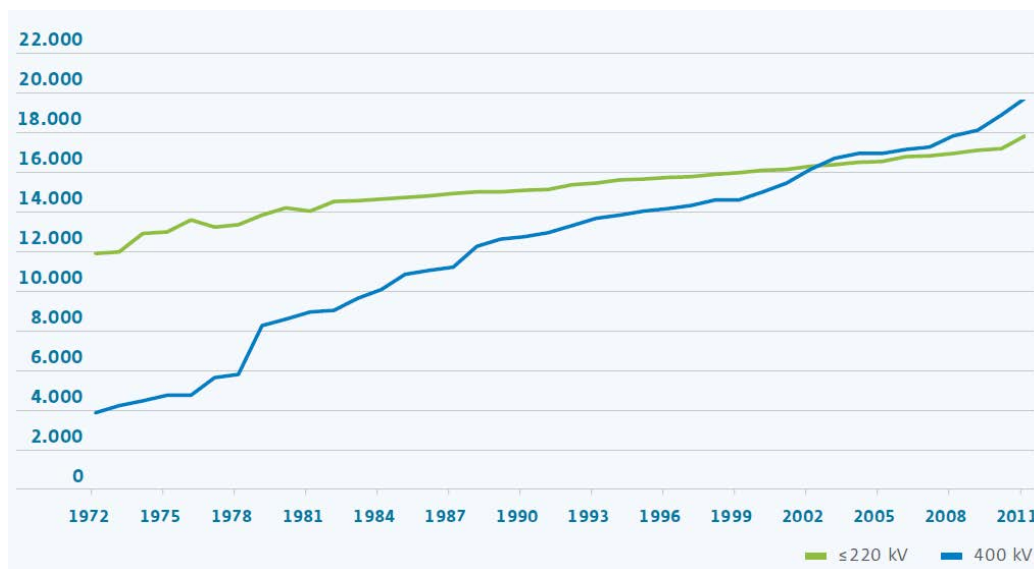


Figura 1.10 Gràfica d'evolució de la xarxa de transport de 400 i 220 kV, en km.(Font: REE)

A Espanya no existeix relació geogràfica entre els centres de generació d'electricitat i els punts de consum, és a dir, no hi ha correlació entre el mapa de generació elèctric (Figura 1.11) i la localització de

la població (Figura 1.12). Les centrals més grans es troben en la franja nord i prop de la costa, amb majors recursos hidràulics i reserves de carbó més abundants. El sistema de transport i distribució d'electricitat d'Espanya està centralitzat, i els seus 41.200 quilòmetres (Figura 1.13) de línies suposen unes pèrdues d'energia molt importants. En contrapartida, la UE (Unió Europea) postula per una energia distribuïda, és a dir, centres petits de generació i xarxes curtes pel consum local (Elías et al. 2011).

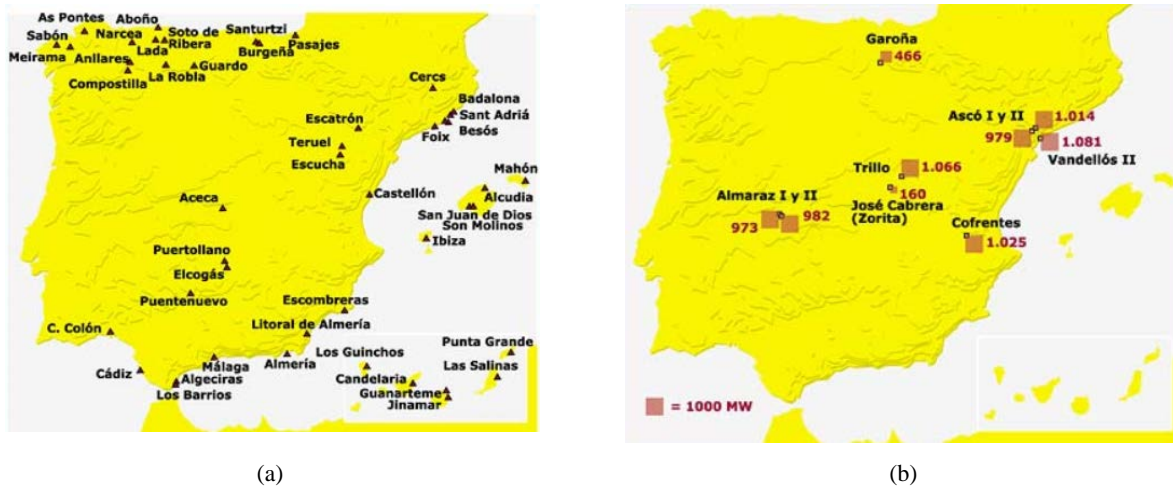


Figura 1.11 Ubicació de les centrals de base a Espanya: centrals tèrmiques (a); centrals nuclears (b). (Font UNESA, Asociación Española de la Indústria Eléctrica: <http://www.unesa.net/unesa/html/sabereinvestigar/mapas/centralestermicas.htm> [Consulta: 25 de gener 2013])

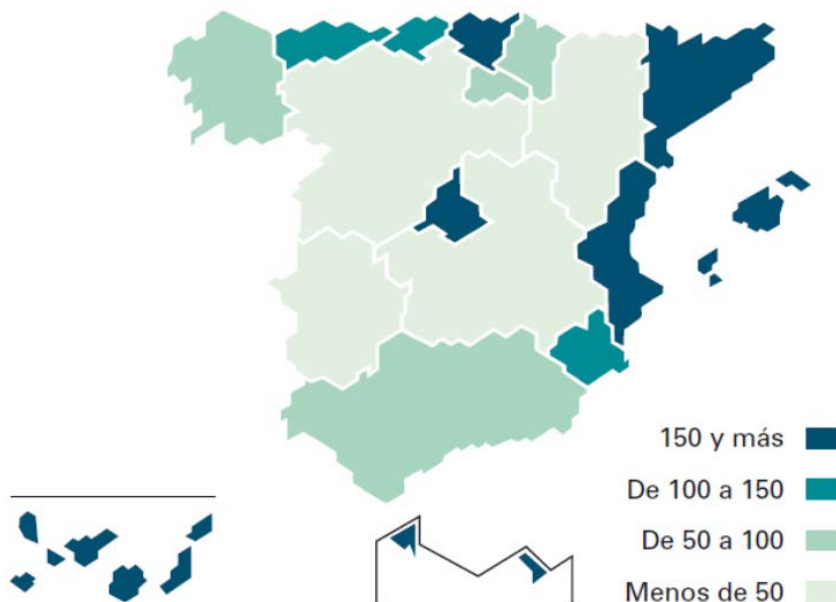


Figura 1.12 Densitat de la població d'Espanya al gener de 2009. (Font: INE. Boletín 5/2009)



Figura 1.13 Mapa del sistema elèctric ibèric de l'any 2013 (Font: REE http://www.ree.es/transporte/mapa_red_transporte.asp) [Consulta: 24 de gener 2013]

Els danys ambientals derivats de la producció, transport i consum són molt diversos, i poden ser locals o més globals (IDAE 2000). Alguns impactes locals poden ser: l'esgotament progressiu dels recursos no renovables; emissions a l'atmosfera de contaminants com el diòxid de carboni, òxids de sofre i nitrogen, metà, monòxid de carboni, i metalls pesants; contaminació de l'aigua i del sol; generació de residus; ocupació d'importants espais de sol; impactes visuals i acústics. Alguns impactes globals poden ser: el canvi climàtic; la disminució de la capa d'ozó estratosfèric; la pluja àcida; els efectes negatius sobre la biodiversitat. Per tot això, l'anàlisi en profunditat dels sistemes de generació, transport o consum de l'energia elèctrica, és de vital importància per poder reduir els impactes negatius associats.

1.3 ¿Què poden aportar la biologia, l'economia o la física a l'estudi de les xarxes elèctriques?

En els següents capítols d'aquesta tesi s'utilitzen els coneixements de disciplines com la biologia, l'economia o la física en l'estudi de les xarxes elèctriques. Com s'ha vist a l'apartat 1.1.1 la biologia ho pot fer a partir de la biònica. En capítols posteriors es recorre també a conceptes de l'àmbit de l'economia (usant les teories dels models gravitacionals) i de la física (utilitzant les teories de les xarxes complexes).

L'objectiu és proposar una nova manera d'aproximar-nos a l'anàlisi i la millora en el disseny i l'optimització dels sistemes de transport i distribució d'energia elèctrica, i com aquesta nova aproximació hauria de permetre un desenvolupament apropiat d'aquestes infraestructures.

1.4 Bibliografia

Amin, M. National infrastructures as complex interactive networks, in control and complexity: An integrated Approach. *Automation, Control, and Complexity: An Integrated Approach* . 2000, p. 263 - 286 .

Bebber, D. P., et al. Biological solutions to transport network design. *P. Roy. Soc. B-Biol. Sci* . 2007, vol. 274, no. 1623, p. 2307-2315 .

Dressler, F.; and Akan, O. B. Bio inspired networking: From theory to practice. *Communications Magazine, IEEE* . 2010, vol. 48, no. 11, p. 176 - 183 .

Elías, X.; and Bordas, S. *Energía, agua, medioambiente territorialidad y sostenibilidad*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A, 2011. ISBN 8499690092.

IDAE. Impactos Ambientales de la Producción de Electricidad [en línia]. 2000. [Consulta: 20 desembre 2012]. Disponible a: <http://www.appa.es/descargas/Resumen_Estudio_ACV.pdf>.

Laurenza, D.; Taddei, M. and Zanon, E. *Las máquinas de Leonardo. Secretos e invenciones en los Códices da Vinci*. Madrid: Susaeta Ediciones, S.A., 2006. ISBN 84-305-5669-9.

Lepora, N.; Verschre, P. and Prescott, T. The state of the art in biomimetics. *IOP Science. Bioinspiration & Biomimetics* . 2013, vol. 8, no. 1.

Litinetski, I. B. *Iniciación a la biónica*. Barcelona: Barral Editores, 1974. ISBN 9788421174197.

Martínez, L. *Historia de las máquinas elèctricas*. Barcelona: Edicions UPC, 1995. ISBN 84-7653-450-7.

Miralles, M.; and Giuliano, G. Biónica: eficacia versus eficiencia en la tecnología natural y artificial. *Scientiae Studia* . 2008, vol. 6, no. 3, p. 359-369 .

Rosas, M. *Topological Complexity of the Electricity Transmission Network. Implications in the Sustainability Paradigm*. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009 .

Solé, R. *Xarxes Complexes*. Barcelona: Biblioteca Universal Empúries, 2009. ISBN 8497874013.

West, G. B.; and Brown, J. H. The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization. *The Journal of Experimental Biology* . 2005, vol. 208, no. 9, p. 1575-1592 .

2 Lleis d'escala i consum d'energia elèctrica

2.1 Estat de la qüestió

2.1.1 Lleis d'escala en biologia

Tots els éssers vius estan formats per subunitats d'una grandària semblant, anomenades cèl·lules. En el món animal, des dels unicel·lulars microscòpics a les balenes, o en el món vegetal, des d'un petit fong als grans arbres de desenes de metres d'alçada. Aquestes cèl·lules que els construeixen necessiten energia, evacuar residus i regular les seves activitats internes. Alguns científics creuen que la selecció natural ha resolt aquest problema mitjançant un conjunt de xarxes de topologia jeràrquica i característiques fractals (West et al. 2005). El sistema circulatori dels animals, el sistema respiratori i neuronal o el sistema vascular de les plantes en són alguns exemples. Per tant, el metabolisme i consegüentment la distribució d'energia i recursos, juguen un paper central, un rol universal, constrenyent l'estructura i organització de tota la vida en totes les seves escales, establint les bases de les teories que utilitzen el concepte de l'al·lometria¹. És cert que hi ha diferències entre una producció natural (p.e., la xarxa del sistema vascular en els mamífers) i una producció artificial (per exemple una xarxa elèctrica), però ambdues estan subjectes a les mateixes lleis físiques. Això ens ha de fer reflexionar respecte si les produccions humanes han d'imitar o no a les naturals segons els objectius perseguits i la manera d'assolir-los.

L'al·lometria es pot definir com la relació de creixement entre parts homòlogues de dos organismes o d'un mateix organisme en diferents edats². Una de les aplicacions més importants de l'al·lometria en el camp de la biologia, és l'anàlisi estadística de la forma dels cossos. L'al·lometria estudia les diferències de la forma respecte les dimensions en termes de ràtios. De l'al·lometria es dedueix que dos éssers vius de diferent grandària i de forma semblant, tindran la mateixa ràtio en les seves dimensions. Si es donen canvis en les seves dimensions, però aquests no donen lloc a canvis en les proporcions de les diferents parts del cos, es parla d'*escalat isomètric*. Contràriament, l'*escalat al·lomètric* estudia els creixements que tenen desviacions respecte l'escalat isomètric.

L'escalat isomètric obeeix a una llei anomenada *lleï del quadrat i el cub*. Aquesta llei estableix que en un organisme que dobla les seves dimensions isomètricament, la seva superfície creix quatre vegades mentre que el seu volum i massa creixen vuit vegades. Això comporta que les necessitats dels teixits augmenten en el conjunt del cos en una proporció de vuit, mentre que la superfície del cos per intercanviar calor o respirar només augmenta quatre vegades. Això pot provocar un augment de la temperatura interna dels cossos, i atès que la variació de la temperatura interna dels éssers vius els pot afectar negativament, en la natura l'organisme que creix isomètricament es veu obligat a reduir proporcionalment les necessitats

¹ Concepte definit i exposat àmpliament al llarg d'aquest capítol

² Diccionari de la llengua catalana de l'Institut d'Estudis Catalans (2^a edició).

energètiques dels teixits per unitat de volum o massa. Es podria dir que a mesura que augmenta la grandària, disminueix el consum d'energia per unitat de volum, i per tant, augmenta l'eficiència energètica de l'organisme.

Les lleis al·lomètriques normalment s'expressen segons una llei potencial com la de l'equació 2.1 (Wiesenfeld 2001).

$$f(x) = kx^\beta \quad 2.1$$

on β és l'exponent d'escala, i k és una constant. En una llei potencial quan creix o decreix la variable, la funció creix o decreix més ràpidament depenent del valor de l'exponent β i segons sigui negatiu o positiu. Quan la velocitat de creixement o decreixement de la funció varia respecte la variable amb una constant, llavors l'anomenem *funció potencial d'escala*. Una de les característiques d'aquestes funcions és que si es prenen logaritmes (Eq. 2.2),

$$\ln(f(x)) = \ln(k) + \beta \cdot \ln(x) \quad 2.2$$

l'expressió que en resulta és una funció lineal amb pendent β . Una altra de les propietats de les funcions potencials és que si les reescalem amb una constant obtenim el mateix resultat formal (això és, mateixa funció) que el que obtindríem sense reescalar-les, i per això es coneixen amb el nom de *funcions d'escala* (Eq.2.3)

$$x \rightarrow \lambda x \Rightarrow f(x) = (k\lambda^\beta)x^\beta \quad 2.3$$

Quan aquestes funcions expliquen fenòmens a la natura, se sol afegir el terme "ε" (Eq. 2.4), que té en compte la incertesa de les mesures realitzades. És a dir, l'error implícit en aquestes, incorporant els valors observats que s'aparten de la funció potencial per raons estocàstiques (Clauset et al. 2009).

$$f(x) = kx^\beta + \varepsilon \quad 2.4$$

En biologia, l'al·lometria s'expressa normalment en termes d'exponents d'escala basats en la massa. L'escalat isomètric prediu un exponent unitat entre la massa i el volum, 2/3 entre superfície i massa, i 1/3 entre longitud i massa. Quan l'al·lometria prediu un exponent menor a la unitat, llavors se'n diu *al·lometria negativa*, ja que els valors reals són menors que el que prediu l'al·lometria isomètrica. En el món animal i vegetal hi ha una diversitat molt gran respecte la massa corporal dels diferents organismes que els constitueixen; aproximadament uns 27 ordres de magnitud. Es podrien considerar el sistema físic més complex de l'univers conegut. El pes corporal, i per tant la grandària del cos, influeixen en les estructures biològiques que els constitueixen i en els diversos processos interns, com per exemple en els processos metabòlics. Tot i que presenten aquesta gran diversitat quant a formes, mides i característiques, tots aquests obeeixen unes simples lleis d'escala empíriques que expliquen com canvien les seves característiques en funció de la seva grandària en tot el rang d'ordres de magnitud que presenten.

Aquestes lleis són vàlides per a moltes formes de vida diferents, mamífers, aus, rèptils, organismes unicel·lulars o plantes. El fet que aquestes lleis d'escala presentin aquesta universalitat ens està dient quelcom important respecte el camí que segueix la vida per desenvolupar-se segons les restriccions físiques que l'envolten (West 1999).

L'equació 2.5 caracteritza la dependència entre les diferents variables biològiques Y i la massa corporal M

$$Y = Y_0 M^\beta \quad 2.5$$

on Y_0 és una constant pròpia del tipus d'organisme i β és l'exponent d'escala. Molts fenòmens biològics tenen com a exponent β un múltiple simple d' $1/4$. Aquest valor el va proposar per primera vegada Max Kleiber, un químic agrònom suís, pioner en aquest camp. Va proposar una de les lleis d'escala més conegudes, la corresponent a la ràtio metabòlica³ dels capil·lars sanguinis respecte la massa corporal dels cossos dels animals (Kleiber 1932). En un article posterior (Kleiber 1947) va publicar una gràfica (Figura 2.1) que ha esdevingut un clàssic en la majoria d'escrits relacionats amb l'al·lometria. En aquesta figura es poden veure alguns dels diferents animals estudiats per ell. Actualment aquesta llei s'ha ampliat a 27 ordres de magnitud, des dels grans mamífers fins el metabolisme catalític molecular. L'exponent resultant és $3/4$, i això implica que l'energia per sustentar un gram de massa d'un organisme decreix amb les dimensions d'aquest. Així doncs, un gram de massa d'un ratolí que pesa 100 vegades menys que un gat, consumeix aproximadament 30 vegades més energia que un gram de massa del gat. Cal posar de relleu, que les màquines inventades per l'home tenen un coeficient d'escala aproximadament d' 1 per l'energia consumida respecte la massa. En comparar aquest valor amb l'exponent $3/4$ dels animals, es podria dir que l'eficiència de les màquines inventades per l'home no depèn de les seves dimensions, i contràriament en els animals sí que hi ha una dependència: un increment de les dimensions suposa una major eficiència.

Existeixen altres exemples de relacions al·lomètriques amb la massa del cos de l'animal. És el cas de l'energia total necessària per unitat de massa, que durant la vida sencera de qualsevol mamífer és similar. Això vol dir que com més gran és el mamífer, més temps viu (Kleiber 1947); La secció de la vena aorta dels mamífers escala en $3/4$, i el nombre de batecs del cor escala amb $-1/4$ (West et al. 1997); L'esperança de vida escala amb $1/4$ (West et al. 2002); L'energia consumida durant el desplaçament d'un ésser viu, escala amb coeficients diferents segons sigui el medi: $0,4$ si és terrestre i $0,3$ si és aeri o aquàtic (Yorke 1973).

³ Quantitat d'energia que consumeix un ésser viu en un dia. Es mesura en *kcal/dia*

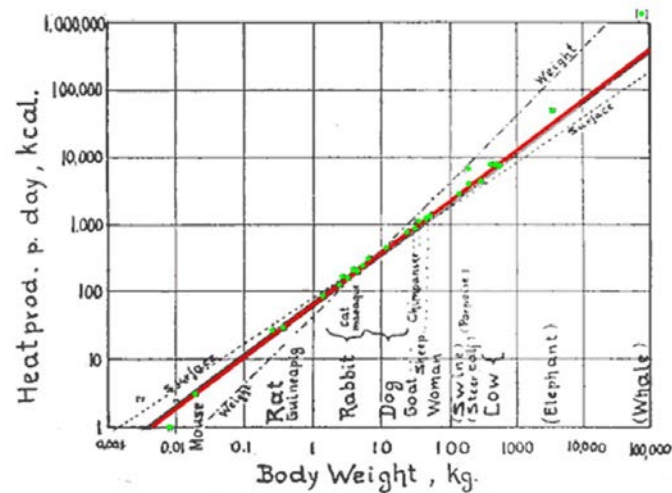


Figura 2.1 Figura original de Max Kleiber de la relació entre el pes corporal i la ràtio metabòlica per diferents éssers vius representada en eixos log-log (Kleiber 1947). Els punts verds són els valors reals obtinguts, i la línia vermella correspon a la regressió d'aquests. El pendent d'aquesta línia és 0.756, aproximadament 3/4; La línia "ratlla i punt" mostra on haurien de ser els punts verds si la ràtio metabòlica fos proporcional al pes corporal, i la línia de punts mostra on haurien de ser els punts si la ràtio metabòlica fos proporcional a la superfície del cos. Font: (Kleiber 1947)

Actualment no hi ha cap teoria general clara que expliqui l'origen d'aquestes lleis d'escala. Amb l'objectiu d'explicar aquests exponents, s'han proposat relacions entre l'estructura de les xarxes que transporten els fluids i l'energia en els organismes (com poden ser el sistema circulatori i respiratori) i els exponents d'escala observats. El físic Geoffrey West i els seus col·laboradors proposen un model general que descriu com són transportats els materials i l'energia a través d'aquestes xarxes a les que atribueixen propietats fractals (West et al. 1997). El model prediu propietats funcionals i estructurals de diferents xarxes de distribució, presents en els sistemes biològics. Consideren que les relacions d'escala deduïdes del seu model, poden explicar l'origen de les lleis d'escala observades en altres variables. En tenir característiques estructurals similars, aquestes xarxes serveixen per proveir a organismes molt diferents de quantitats d'energia i matèria, també diferents. Cal dir, que altres autors han analitzat els treballs anteriorment citats, i després de fer un estudi en base a un volum considerable de dades obtingudes empíricament, dedueixen que l'exponent proposat 3/4 només és exactament correcte si es consideren organismes de grandària infinita (Savage et al. 2008). Com més petit és l'organisme més s'aparta el valor real de l'exponent teòric 3/4, i s'incrementa fins poder arribar a 0,81. Posen en dubte que el model de la ràtio metabòlica i la massa del cos correspongui a una pura llei potencial, i proposen que cal revisar aquest model i introduir paràmetres fisiològics i evolutius per tal de perfeccionar els resultats.

2.1.2 Ciutats i urbanisme

Durant milers d'anys, els humans van viure com a nòmades en petites agrupacions tribals. Més tard es van establir en assentaments permanents, que amb el temps es van convertir en poblacions. Però, continuaven vivint de les seves granges, i la seva vida es limitava a un cercle més o menys reduït de persones i espais. Poc a poc les poblacions van anar creixent, fins a convertir-se en entitats que

condicionaven la vida social i laboral de les persones que hi vivien. Tenim exemples ja a l'antiga Mesopotàmia i Egipte, després a Grècia i Roma, i posteriorment a Europa i Amèrica. Més recentment s'ha donat aquesta evolució en Àfrica i Àsia, i en aquest darrer continent, s'ha donat d'una manera espectacular. En els últims 20 anys, el ritme de creixement anual de la població a les ciutats, ha estat entre el 2,1% i el 2,4 % ⁴. Actualment el 51% de la població mundial viu en les ciutats⁵ i s'espera que al 2050 aquest percentatge augmenti fins el 72%, amb 6,3 bilions de persones (UN 2012). Durant les últimes dècades hi ha hagut un increment de dades disponibles de milers de ciutats arreu del món, tant en publicacions oficials com acadèmiques, que mesuren múltiples variables d'aquests assentaments humans. Molts investigadors han analitzat aquestes dades i la seva evolució, i han proposat teories sobre el comportament de les ciutats com a ens. Alguns dels resultats ens diuen que, existeixen variables socioeconòmiques per càpita que s'incrementen a mesura que creix la població: el nombre de patents, el nombre d'inventors, l'I+D, el PIB o el nombre de crims en poden ser exemples (Bettencourt et al. 2007, Bettencourt et al. 2010-b). Hi ha altres variables per càpita que decreixen a mesura que creix la població, com poden ser el nombre de benzineres o la superfície de les carreteres (Bettencourt et al. 2010-a, Bettencourt et al. 2011). Segons aquests estudis, de mitjana, les ciutats són més eficients quant a consum de materials en construcció d'infraestructures, consum energètic (Bettencourt et al. 2011) o emissions de CO₂ (Dodman 2009). Una possible explicació del comportament d'aquestes variables pot ser que, a mesura que creix el nombre d'habitants d'una ciutat, creixen també la intensitat i la freqüència de les seves interaccions, motivant més productivitat i innovació. Les pressions econòmiques els empenyen a buscar noves formes d'organització, productes i serveis que els comportin més beneficis amb menys despesa. L'eficiència mediambiental és un dels reptes que la humanitat ha d'afrontar arreu del món, però és especialment important tenir-la en compte en nacions, com la Xina o la Índia, en les quals apareixeran grans ciutats amb milions d'habitants. En els apartats següents, es proposen mètodes per aplicar i en alguns casos avaluar, aquestes afirmacions en el àmbit del consum d'energia elèctrica.

2.1.3 Lleis d'escala urbanes i consum elèctric

Malgrat es pensa que l'evolució espai-temps de les ciutats ha estat el resultat de plans urbans centralitzats, des que existeixen les teories de sistemes complexos⁶ s'ha començat a pensar que l'estructura de les ciutats és el resultat d'un procés d'autoorganització⁷. En un sistema autoorganitzat pot sorgir un determinat ordre o coordinació, de les interaccions locals entre components inicialment desordenats (Gribbin 2005). Aquests processos són espontanis i no estan dirigits ni controlats per cap ens intern o extern. S'ha observat aquest comportament en una gran varietat de sistemes físics, químics, biològics,

⁴ World Bank Serch: <http://search.worldbank.org/data?qterm=urban%20population&language=EN> [Consulta: 26 de desembre de 2012]

⁵ 2012 World Population Data Sheet <http://www.prb.org/Publications/Datasheets/2012/world-population-data-sheet/data-sheet.aspx> [Consulta: 26 de desembre de 2012]

⁶ Tot i que encara no hi ha un consens científic sobre una definició simple i general de Sistemes Complexos, es pot dir que un sistema complex està format per diferents parts, que a l'interaccionar de manera no lineal entre aquestes, donen lloc a un comportament col·lectiu no previsible del sistema, per interaccionar amb el medi. (Gallagher et al. 1999)

⁷ El terme autoorganització va ser utilitzat pels científics que estudiaven la Teoria de Sistemes en la dècada de 1960, però no va esdevenir un concepte científic fins la seva utilització per part dels físics que estudiaven els Sistemes Complexos durant les dècades dels setanta i vuitanta. (Wikipedia)

socials i cognitius (Solé 2009, Ball 2005, Lewin 1993). Darrerament s'estan observant també en les dinàmiques de les ciutats. De fet, encara que les dinàmiques de les aglomeracions urbanes siguin una conseqüència de moltes decisions humanes, amb freqüència aquestes són guiades per l'optimització d'objectius, requeriments o condicions de contorn, i d'aquesta manera apareix la necessitat de tenir en compte per la planificació, les construccions existents i les futures projectades. La utilització dels indicadors *per càpita* (renda, PIB, productivitat, etc.) impliquen assumir que, de terme mitjà, certes característiques específiques de les zones urbanes augmenten linealment amb la grandària de la població. No obstant això, aquesta aproximació pot no ser adequada per caracteritzar i comparar ciutats perquè ignora els fenòmens emergents⁸ de les aglomeracions humanes, resultat de les seves dinàmiques socials i interaccions no lineals (Bettencourt et al. 2010-a). Recents estudis (Bettencourt et al. 2007, Horta et al. 2010, Xiaowu Zhu et al. 2009, Kühnert et al. 2006, Lämmer et al. 2006) evidencien aquest fet mostrant que moltes variables urbanes, $Y(t)$, segueixen aproximadament simples lleis potencials no lineals com les de l'equació 2.6:

$$Y(t) = Y_0 N(t)^\beta \quad 2.6$$

on Y_0 és una constant de normalització, $N(t)$ és la grandària de la població en un moment t determinat, i β és l'exponent d'escala.

Alguns autors en comparar les ciutats amb organismes vius, prenen per *massa* de la ciutat, la massa de les infraestructures, km de carreteres, km de vies de tren, etc, en comptes de considerar el nombre d'habitants. Consideren que, en el paral·lelisme de l'ésser viu, els habitants serien les cèl·lules, els elements constituents que cal reparar o canviar en cas de dany o funcionament defectuós. En considerar la similitud entre un organisme i una ciutat, cal tenir en compte que l'evolució ha actuat en els éssers vius durant milions d'anys, mentre que el desenvolupament de les ciutats és relativament molt recent, d'uns pocs milers d'anys. Les lleis d'escala obtingudes en estudiar certes variables urbanes, proporcionen exponents d'escala superiors a la unitat. Els factor d'escala menors a la unitat (escalat sublineal), com els observats en els éssers vius, s'associen a comportaments òptims i eficients, en els quals a mesura que creix la grandària de l'organisme, apareixen economies d'escala. Exponents d'escala superlineals (superiors a la unitat) impliquen que a mesura que creix l'ens (en la Figura 2.2a, la *població*) creix el consum per sobre del valor de creixement que tindria si aquest fos proporcional a l'augment de la població. No hi ha equivalent a la natura, sent el creixement d'aquests sistemes accelerat. Atès que els recursos són finits, aquest tipus de creixement conduiria en un període finit de temps a un col·lapse del sistema.

⁸ La definició bàsica que actualment s'accepta més, va ser proposada per Jeffrey Goldstein [(Goldstein 1999)]: Aparició d'estructures noves i coherents, patrons i propietats, mentre dura el procés d'autoorganització en un sistema complex. En els sistemes vius, es considera que l'emergència és la causa subjacent de la pròpia evolució [(Corning 2002)]. A altres nivells de la natura l'emergència es fa més evident en algunes espècies animals que viuen en grup, com per exemple, les colònies de les formigues, els eixams de les abelles o les bandades dels ocells. El comportament d'una aglomeració de persones en un espai físic reduït com per exemple un concert de música, o els embussos de tràfic en hora punta, són una mostra de processos emergents en les ciutats.

En aquest context, l'estudi dels sistemes de distribució d'energia elèctrica, carburants, medicaments i aliments, mostra que es compleixen lleis potencials quan es relaciona el nombre d'estacions o punts de proveïment respecte el nombre d'habitants (Figura 2.2).

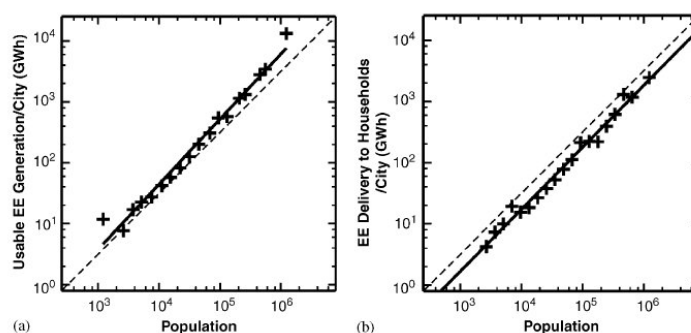


Figura 2.2 Energia elèctrica disponible i subministrada: (a) Energia elèctrica disponible respecte de la població de les ciutats alemanyes en escala logarítmica. L'exponent per aquesta llei d'escala (línia contínua) és de 1,1 (1,04-1,13 amb el 95% de confiança). (b) Energia elèctrica subministrada a les llars alemanyes respecte la població, ambdues també en escala logarítmica. L'exponent d'escala és de 1,0 (0,96-1,06 amb el 95% de confiança). Les línies discontinues en els dos gràfics tenen un pendent unitat. Font: (Kühnert et al. 2006)

En estudiar les necessitats d'aquests subministraments per diferents ciutats i relacionar-los amb la seva població, cal tenir en compte la llei de Zipf⁹ (Gabaix 1999) segons la qual, la grandària de la població d'una ciutat és inversament proporcional al seu rang (Figura 2.3).

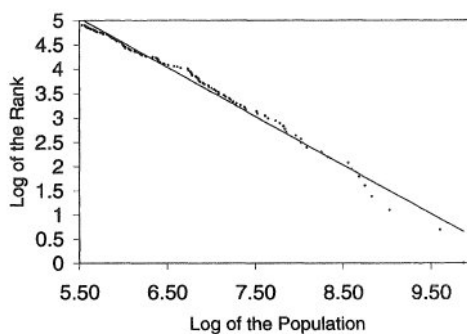


Figura 2.3 Representació gràfica del logaritme neperià del Rang respecte el logaritme neperià de la Població, per diferents ciutats d'Estats Units (dades de l'any 1991). En aquest context, el rang és el número d'ordre d'una ciutat respecte les altres, si es classifiquen de més a menys habitants: *New York* és la ciutat amb més habitants de la mostra, i per tant li correspon la primera posició del Rang, o el que és el mateix, $\ln 1=0$ en l'eix vertical; *Los Angeles* és la segona al Rang i per tant li correspon el punt $\ln 2 = 0,698$ a l'eix vertical. Una regressió potencial d'aquests punts dona lloc a la línia recta dibuixada. El seu pendent és de -1, i per tant es pot dir que és una llei potencial que escala sublinealment. Font: (Gabaix 1999)

A la Taula 2.1 es mostren els exponents d'escala deduïts d'un estudi d'àrees metropolitanes dels Estats Units, Europa i la República Popular de Xina (Bettencourt et al. 2007). Com es pot veure a la taula, al

⁹ George Kingsley Zipf va ser un lingüista de la Universitat de Harvard. Molts tipus de dades, des del món de la física als àmbits socials, poden ser aproximades amb la distribució de Zipf, també coneguda com a *Rank-Size Distribution*. Aquesta distribució proporciona una llei potencial d'exponent -1 (Marrewijk, V.)

consum elèctric de les llars alemanyes li correspon un exponent d'escala igual a 1, mentre que la longitud necessària de conductors elèctrics mostra una economia d'escala amb un exponent de 0,87. Tot i que a l'article, aquesta diferència s'explica vinculant el consum mostrat a la taula amb les pèrdues resistives dels conductors de la xarxa de distribució (que escalen en 1,11), i que per tant la fan no òptima, moltes vegades no estan clars els motius pels quals hi ha escalatge superlineal o sublineal quan s'estudien infraestructures tecnològiques.

Table 1. Scaling exponents for urban indicators vs. city size

Y	β	95% CI	Adj-R ²	Observations	Country-year
New patents	1.27	[1.25,1.29]	0.72	331	U.S. 2001
Inventors	1.25	[1.22,1.27]	0.76	331	U.S. 2001
Private R&D employment	1.34	[1.29,1.39]	0.92	266	U.S. 2002
"Supercreative" employment	1.15	[1.11,1.18]	0.89	287	U.S. 2003
R&D establishments	1.19	[1.14,1.22]	0.77	287	U.S. 1997
R&D employment	1.26	[1.18,1.43]	0.93	295	China 2002
Total wages	1.12	[1.09,1.13]	0.96	361	U.S. 2002
Total bank deposits	1.08	[1.03,1.11]	0.91	267	U.S. 1996
GDP	1.15	[1.06,1.23]	0.96	295	China 2002
GDP	1.26	[1.09,1.46]	0.64	196	EU 1999-2003
GDP	1.13	[1.03,1.23]	0.94	37	Germany 2003
Total electrical consumption	1.07	[1.03,1.11]	0.88	392	Germany 2002
New AIDS cases	1.23	[1.18,1.29]	0.76	93	U.S. 2002-2003
Serious crimes	1.16	[1.11, 1.18]	0.89	287	U.S. 2003
Total housing	1.00	[0.99,1.01]	0.99	316	U.S. 1990
Total employment	1.01	[0.99,1.02]	0.98	331	U.S. 2001
Household electrical consumption	1.00	[0.94,1.06]	0.88	377	Germany 2002
Household electrical consumption	1.05	[0.89,1.22]	0.91	295	China 2002
Household water consumption	1.01	[0.89,1.11]	0.96	295	China 2002
Gasoline stations	0.77	[0.74,0.81]	0.93	318	U.S. 2001
Gasoline sales	0.79	[0.73,0.80]	0.94	318	U.S. 2001
Length of electrical cables	0.87	[0.82,0.92]	0.75	380	Germany 2002
Road surface	0.83	[0.74,0.92]	0.87	29	Germany 2002

Taula 2.1 Taula original de l'article **Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities** (Bettencourt et al. 2007).

El creixement de les ciutats té com a principals restriccions la disponibilitat dels recursos i les ràtios de consum. Els recursos materials i energètics s'utilitzen tant per mantenir la ciutat com per fer-la créixer. Les necessitats de recursos i per tant el seu creixement es poden expressar segons Bettencourt amb l'equació 2.7:

$$Y = RN + E \left(\frac{dN}{dt} \right) \tag{2.7}$$

On Y són els recursos, R expressa la mitjana de recursos necessaris per unitat de temps t per mantenir un habitant, i E els recursos necessaris per afegir un nou habitant a la població. D'aquesta equació se'n dedueix l'equació general pel creixement de la població (2.8):

$$N(t) = \left[\frac{Y_0}{R} + \left(N_0^{1-\beta} - \frac{Y_0}{R} \right) \exp \left[-\frac{R}{E} (1 - \beta)t \right] \right]^{\frac{1}{1-\beta}} \tag{2.8}$$

Aquesta equació ens permet analitzar el creixement de la població en funció dels exponents d'escala β deduïts de l'anàlisi fet de les funcions potencials dels recursos.

- Per exponents $\beta=1$ el creixement és exponencial, clarament no sostenible respecte la disponibilitat finita de recursos
- Per $\beta<1$ el creixement segueix una corba sigmoide on el creixement s'atura en un temps llarg a mesura que la població s'aproxima a una capacitat de càrrega finita. Aquest tipus de comportament és el que presenten les poblacions d'éssers vius a la natura
- Per $\beta>1$ el creixement és més ràpid que l'exponencial i per tant tampoc sostenible.

Alhora de fer anàlisis d'exponents d'escala associats a ciutats contingudes en grans àrees (regions, països, continents) pot donar-se el cas que l'índex de correlació ens digui que la tendència trobada no és indicativa del comportament real. Això es pot donar en àrees on hi ha una heterogeneïtat elevada respecte els hàbits de consum. En països en vies de desenvolupament com la Xina aquest fet és una realitat (Xiaowu Zhu et al. 2009). En aquest cas s'agrupen les ciutats per categories de consum abans d'aplicar les equacions proposades per Bettencourt (Equacions 2.7 i 2.8). El consum elèctric als habitatges d'aquest estudi, pot ser usat per detectar diferències segons la localització geogràfica. De les ciutats xineses estudiades, es dedueix que les situades al nord i al centre mostren un exponent d'escala sublineal, i les situades a la costa i les grans ciutats mostren un exponent superlineal. En aquest context, hi ha estudis que posen de manifest lleis d'escala que relacionen l'àrea ocupada per una aglomeració urbana amb la grandària de la població:

$$A \propto M^n$$

2.9

on A és l'àrea ocupada per la població i M , el nombre d'habitants. Segons aquets estudis, el coeficient n pren valors entre 0,66 (Batty et al. 1992) i 3,7 (Marshall 2007) en funció de si l'estudi de les dades es realitza de manera sincrònica (en un moment del temps) o diacrònica (al llarg del temps) respectivament.

Darrerament, alguns autors estan posant de manifest que la definició de la regió objecte d'estudi és important alhora d'aplicar tècniques al·lomètriques (Arcaute et al. 2013). La definició de les fronteres de la zona geogràfica que es vol estudiar, pot estar subjecte a definicions polítiques, culturals i històriques. Si el que es vol és, comparar resultats d'estudis al·lomètrics de diferents zones geogràfiques (regions, ciutats, etc) amb la finalitat d'extreure'n conclusions, cal tenir en compte que l'argument per establir les fronteres d'aquestes regions, pot influir en els valors dels exponents d'escala β , que se'n dedueixin. Aquest raonament és especialment important alhora d'establir comparacions entre regions o ciutats de països o continents diferents, ja que les definicions de les seves fronteres poden estar basades en criteris desiguals. ¿Podria ser aquesta una de les causes de les discrepàncies que hi ha entre els resultats d'exponents d'escala d'indicadors socials o econòmics, en els estudis portats a terme i referenciats més amunt? Arcaute i els seus col·legues argumenten que la raó d'aquestes discrepàncies pot estar en la grandària de les ciutats considerades en els estudis. Sostenen que alguns indicadors només poden ser mesurats correctament per ciutats amb un cert nombre d'habitants. En aquesta línia, hi ha autors que

sostenen que les grans ciutats de milions d'habitants es comporten de manera molt diferent a ciutats més modestes, cosa que explicaria el fet que algunes d'aquestes apareguin com “outliers” en els estudis citats més amunt. A aquestes ciutats les anomenen “Dragon-Kinds” (Pisarenko et al. 2012, Sornette et al. 2012)

2.2 Objectius

Tal i com s'ha argumentat en apartats anteriors, l'estudi de les lleis d'escala en els éssers vius i darrerament en les aglomeracions humanes, pot ser una eina valuosa per l'estudi de l'eficiència de les entitats estudiades, i per tant, per la proposta de mecanismes i estratègies de millora. Amb aquest objectiu es proposa a continuació una metodologia per tal d'obtenir lleis d'escala que relacionen consums elèctrics amb el nombre d'habitants d'una població, per posteriorment implementar-la en una zona geogràfica concreta i discutir-ne els resultats (ap. 2.4).

2.3 Metodologia i hipòtesi de treball

La metodologia i la seqüència de treball que s'ha seguit és la següent:

a) Obtenció de dades de consums d'energia elèctrica:

Per realitzar el present estudi seran necessàries les dades en un any determinat dels consums d'energia elèctrica totals i dels consums d'energia elèctrica per sectors econòmics, també anomenats més endavant *consums desagregats*, d'un nombre significatiu de poblacions de la regió que es pretén estudiar. Si és possible es tindran en compte els arguments citats més amunt respecte la homogeneïtat de les dades preses (Arcaute et al. 2013). Aquestes dades són la base de l'estudi, i per tant, de la seva qualitat en depèn la utilitat de les conclusions extretes. Les companyies elèctriques que distribueixen i venen l'energia elèctrica, són les que tenen en primera instància aquesta informació. Desafortunadament, en els informes de les mateixes companyies només és publiquen resultats que agrupen consums de regions o províncies senceres, i no es publiquen consums de poblacions. En la pràctica, només organismes oficials poden obtenir de les companyies les dades necessàries per avaluar el consum d'una població concreta. En aquest sentit qualsevol estudi estarà limitat per l'existència o l'accés a aquesta informació.

b) Obtenció del nombre d'habitants

Les lleis d'escala que es proposaran més endavant relacionen els consums d'energia elèctrica de les poblacions objecte d'estudi amb el nombre dels seus habitants. Per tant cal disposar de les dades de població registrades el mateix any que les dades dels consums del pas anterior. En el cas de no disposar de les dades pel mateix any, es poden utilitzar dades d'un o dos anys anteriors o posteriors, ja que l'error comès és petit, en ser la variació de la població inapreciable pel còmput del consum total d'energia de tota la població.

c) Filtratge de les dades

Les bases de dades, tant dels consums d'energia elèctrica com del nombre d'habitants, poden contenir valors nuls, no numèrics, erronis o absurds. Cal filtrar curosament aquests valors si es volen evitar errors posteriors en les representacions gràfiques o en el càlcul de les regressions efectuades.

d) Grau i estructura de la dependència estadística entre les variables

L'objectiu principal és analitzar si hi ha una dependència estadística del tipus de l'equació 2.6 entre les dues variables obtingudes en els passos anteriors: el consum d'energia elèctrica i el nombre d'habitants d'una població. Per fer-ho es determinarà l'estructura de dependència utilitzant els conceptes de la regressió i s'estudiarà el grau de dependència utilitzant la teoria de la correlació. La dependència estadística que es busca és una relació potencial, i per tant no lineal. Caldrà calcular el logaritme d'ambdues variables i expressar-les gràficament per observar si el núvol de punts representat aconsella un anàlisi posterior o si pel contrari, es descarta.

d1. Estimació de la línia de regressió

S'aplicarà una regressió de Mínim-Quadràtic per explicar la variable del consum d'energia elèctrica en funció de la població. És a dir, s'escolliran aquells paràmetres que minimitzin globalment la suma de quadrats dels errors, també anomenada suma de quadrats dels residus (entenen-se per residus, la diferència entre un valor observat i un valor estimat). Tot i que aquest és un mètode de regressió lineal, i que l'expressió que busquem basada en l'equació 2.6 és potencial, aquesta es pot linealitzar prenent logaritmes i fent un canvi de variable:

$$y = kx^{\beta} \quad 2.10$$

$$\log y = \log k + \beta \log x \rightarrow v = \log k + \beta u \quad 2.11$$

La solució de la funció linealitzada amb el canvi de variables u i v és:

$$v = a + bu \quad 2.12$$

i la solució final :

$$k = \text{anti log } a ; \beta = b \quad 2.13$$

Així doncs, els estimadors $\hat{\beta}$ i \hat{k} que s'utilitzaran pels coeficients de la recta de regressió són:

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad 2.14$$

$$\log \hat{k} = \hat{v} - \hat{\beta} \bar{u} \quad 2.15$$

d2. Bondat de l'ajust

S'utilitzarà com a mesura adimensional de la bondat de l'ajust el *coeficient de determinació* R^2 que mesura el percentatge d'aquest amb el model lineal, i que equival en el cas d'una regressió lineal, al quadrat del *coeficient de correlació de Pearson* r^2 :

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})]^2}{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad 2.16$$

d3. Mesura de la dispersió dels punts al voltant de la línia de regressió

S'utilitzarà l'*Error Estàndard d'estimació* S_{uv} per quantificar la qualitat de l'ajust del model a les dades mitjançant la mesura de la dispersió al voltant de la línia de regressió. Aquest valor reflectirà la tendència de la regressió a desviar-se del valor real de v . A diferència del *coeficient de determinació* R^2 calculat a l'apartat anterior, aquest valor es mesura en les mateixes unitats que u (en el nostre cas en MW·h/any)

$$S_{uv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - a - bu_i)^2}{n - 2}} \quad 2.17$$

d4. Interval de confiança dels coeficients de la regressió

S'avaluaran el interval de confiança on es pot trobar el paràmetre b de la funció de regressió amb l'expressió:

$$b \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} S_b \quad ; \quad S_b = \sqrt{\frac{\sum (v_i - \hat{v}_i)^2}{n - 2}} \sqrt{\frac{1}{\sum (u_i - \bar{u})^2}} \quad 2.18$$

on $t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}$ és el valor d'una distribució t de Student¹⁰ amb $n-2$ graus de llibertat i nivell de significació α , S_a i S_b són els errors estàndards dels coeficients estimats. Per avaluar els intervals de confiança del paràmetre a , es procedirà de manera idèntica.

¹⁰ Es demostra que les variables segueixen una distribució t de Student amb $n-2$ graus de llibertat, ja que representen el quocient entre una normal tipificada i l'arrel quadrada d'una χ^2 amb $n-2$ graus de llibertat dividida entre els seus graus de llibertat.

d5. Inferències sobre el model de regressió

Per comprovar si l'estimació és vàlida en el sentit de si és significativa de forma que la variable explicativa u és rellevant per explicar el comportament de la variable dependent v , s'utilitzarà l'estadístic t i es contrastarà si el pendent de la recta de la regressió poblacional és significativament diferent de zero. Es rebutjarà la hipòtesi nul·la si l'estadístic t és major, en valor absolut, al valor crític, $t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-2}$, és a dir:

$$|t| = \left| \frac{\hat{\beta}}{\sqrt{\frac{SS_{vv} - \hat{\beta}SS_{uv}}{n-2}} \frac{1}{S_{uu}}} \right| > t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-2} \quad 2.19$$

On SS_{vv} , SS_{uu} són les sumes dels quadrats de la variable dependent i la variable independent, i SS_{uv} , la suma dels quadrats creuats. El p-valor¹¹ ha de ser menor a $2 \cdot \frac{\alpha}{2}$, i com més petit sigui millor serà l'estimació de la regressió.

d6. Interval de confiança per la recta de regressió

Es calcularan els intervals de confiança amb l'expressió:

$$v \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-2} \sqrt{\frac{\sum(v_i - \bar{v}_i)^2}{n-2} \left[\frac{1}{n} + \frac{(u_0 - \bar{u})^2}{S_{uu}} \right]} \quad 2.20$$

d7. Interval de predicció

Es calcularan els intervals de confiança per fer les prediccions amb l'expressió:

$$v \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-2} \sqrt{\frac{\sum(v_i - \bar{v}_i)^2}{n-2} \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(u_0 - \bar{u})^2}{S_{uu}} \right]} \quad 2.21$$

d8. Prediccions amb el model trobat

Una vegada ajustat el model, i abans d'utilitzar-lo per realitzar prediccions, és important assegurar-se que no es violen les hipòtesis sobre les quals es fonamenta: independència de les observacions mostrals, normalitat dels valors de la variable dependent per a cada valor de la variable explicativa, homoscedasticitat (la variable dependent és la mateixa per tots els valors de la variable explicativa) i relació lineal entre les dues variables. La informació més rellevant l'aporten els residus. Els residus e_i es calcularan com:

¹¹ Probabilitat de les cues d'una funció t d'Student per un interval de confiança de $100-\alpha$ i $n-2$ graus de llibertat

$$e_i = v_i - \hat{v}_i \quad 2.22$$

on v_i i \hat{v}_i són el valor i-èssim real de la variable el valor i-èssim estimat respectivament.

- Normalitat: Segons les suposicions anteriors, els residus han de tenir una distribució normal de mitjana zero i variança constant. S'utilitzarà el gràfic de probabilitat normal
- Linealitat i homoscedasticitat: S'utilitzarà el gràfic dels residus versus els valors predits. Si el gràfic mostra un núvol de punts al voltant del zero sense evidència d'estructura, tendència o canvi de la dispersió, llavors no hi ha sospita de que es violin cap d'aquests dos supòsits.
- Independència: Les dades es prendran aleatòriament sobre tot el territori a estudiar, assegurant d'aquesta manera la seva independència

d9. Influència del període temporal de les dades de consum en el valor de l'exponent d'escala β

S'analitzarà si el període en què s'han obtingut les dades pot fer variar el valor de l'exponent d'escala. Per fer-ho es calcularan els exponents d'escala per períodes anuals, cada dos anys. Es caracteritzaran estadísticament el residu mitjançant distribucions de probabilitat

$$z = \frac{r_i - \mu}{\sigma} \quad 2.23$$

on r_i és el residu calculat per una població, μ és la mitjana i σ la desviació estàndard.

d10. Anàlisi de casos particulars

S'estudiaran casos particular de municipis que presentin variacions destacables respecte de la mitjana . Per fer-ho s'utilitzaran gràfics d'evolució temporal dels residus dels casos particulars observats (Equació 2.24) i gràfics de residus entre dos dels seus sectors econòmics per determinar possibles correlacions entre aquests.

$$e_i = \log(v_i) - \log(\hat{v}_i) = \log \frac{v_i}{\hat{v}_i} \quad 2.24$$

2.4 Cas d'estudi (Ia): La comunitat autònoma d'Andalusia

S'ha escollit la Comunitat Autònoma d'Andalusia pel cas d'estudi per diferents raons. La raó principal és la disponibilitat de les dades, facilitades pel *Instituto de Estadística de Andalucía*¹². Però hi ha altres raons de pes per l'elecció. La base de dades està formada per un total de 770 municipis (Figura 2.4), sent la més extensa d'una sola regió que s'ha pogut trobar (Taula 2.2).

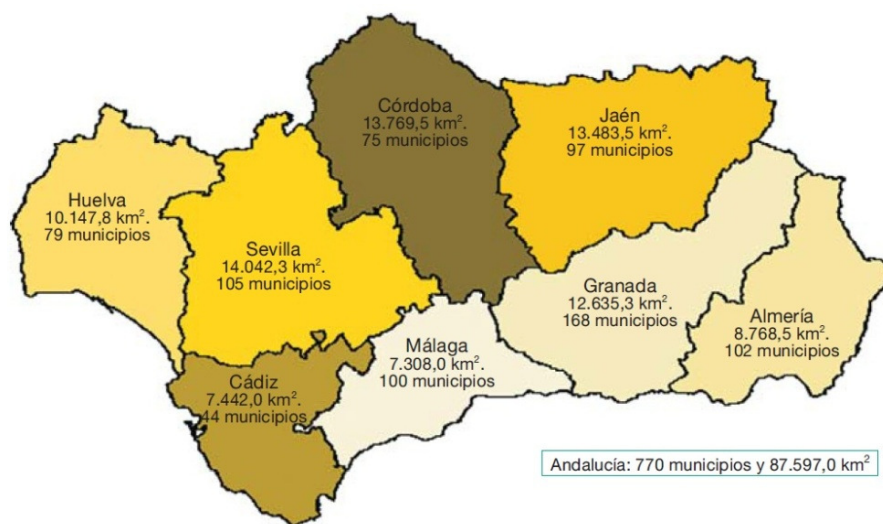


Figura 2.4 Províncies de la Comunitat Autònoma d'Andalusia amb la seva extensió i nombre de municipis¹³.
Font: *Instituto de Estadística de Andalucía (IEA)* (Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo)

Per altre banda la diversitat pel que fa a característiques és molt gran. Existeixen municipis des d'unes poques desenes d'habitants a municipis amb algunes centenes de milers (Taula 2.4). El ventall quant a extensió és també molt gran (Taula 2.2). Es dona també una àmplia representació de tots els sectors econòmics. El sector primari i secundari ocupa a la meitat de la població, i el sector terciari a l'altre meitat, sobre tot en el sector turístic. Geogràficament i climàticament parlant, hi ha també una diversitat quasi immillorable: municipis costers, de muntanya, de valls i de terrenys quasi desèrtics, amb una gran variació de temperatures mitges anuals. Pel que fa a la riquesa dels municipis, també hi ha una gran ventall que va des dels molt humils, normalment situats en zones interiors, als molt rics que solen estar situats en zones costeres.

¹² <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/index2.htm> [Consulta: 10 de desembre de 2012]

¹³ Aquest nombre pot variar lleugerament al llarg d'aquest estudi en les taules i gràfics que fan referència al nombre de municipis utilitzats pels diferents anàlisis. El motiu principal és que no tots els municipis disposen de registres de dades de consum elèctric pels anys analitzats.

Extensió/ Província	Almeria	Cadix	Còrdova	Granada	Huelva	Jaén	Màlaga	Sevilla	Andalusia
Menys de 30 km ²	30	6	12	64	14	6	37	30	199
De 30 a 49 km ²	20	5	7	26	14	19	21	13	125
De 50 a 99 km ²	31	12	13	46	16	24	20	20	182
De 100 a 199 km ²	8	10	21	19	17	29	19	20	143
De 200 a 499 km ²	12	9	16	11	17	17	2	18	102
Més de 500 km ²	1	2	6	2	1	2	1	4	19
Total	102	44	75	168	79	97	100	105	770

Taula 2.2 Cas d'estudi la: Nombre de poblacions per províncies i extensió. Font: IEA

Província	Habitants
Almeria	684.426
Cadix	1.230.594
Còrdova	803.998
Granada	907.428
Huelva	513.403
Jaén	669.782
Màlaga	1.593.068
Sevilla	1.900.224
Total	8.302.923

Taula 2.3 Cas d'estudi la: Distribució dels habitants per províncies i el total de la comunitat andalusa (any 2009). Font: IEA

Nombre d'habitants <i>P</i>	Nombre de ciutats	% sobre el total
< 5.000	526	68,4
5.000 < <i>P</i> < 20.000	180	23,4
20.000 < <i>P</i> < 60.000	46	6,0
60.000 < <i>P</i> < 700.000	17	2,3

Taula 2.4 Cas d'estudi la: Nombre de ciutats segons intervals de nombre d'habitants. La major part de les ciutats d'aquesta àrea geogràfica tenen menys de 5.000 habitants (any 2009).

S'ha realitzat un estudi al·lomètric pel consum total d'energia elèctrica i pels consums disgregats en sectors econòmics dels municipis d'Andalusia segons la metodologia explicada més amunt. Els sectors analitzats són el residencial, l'industrial, l'agricultura, el de serveis i el d'administració. De tots, els dos darrers són els més heterogenis quant a composició de tipologies de consum. En el cas del sector terciari s'inclouen els consums de les infraestructures del comerç (emmagatzematge i distribució), turisme (hotels, motels, apartaments, restauració, etc), empreses de serveis, empreses de serveis culturals no públiques (cinemes, teatres, galeries d'art, etc), banca i centres d'ensenyament no públiques. En el cas del sector de l'administració s'inclouen les edificacions de serveis administratius (ajuntaments, INEM, oficines de correus, etc), centres d'ensenyament (escoles, universitats), il·luminació (viària, d'espais públics, monuments), centres d'esports (poliesportius, pistes d'atletisme, camps de futbol) i fins i tot consums a càrrec d'instal·lacions militars si ni ha. La Figura 2.5 recull els resultats gràfics obtinguts, i la Taula 2.5 recull els resultats numèrics d'aquestes representacions.

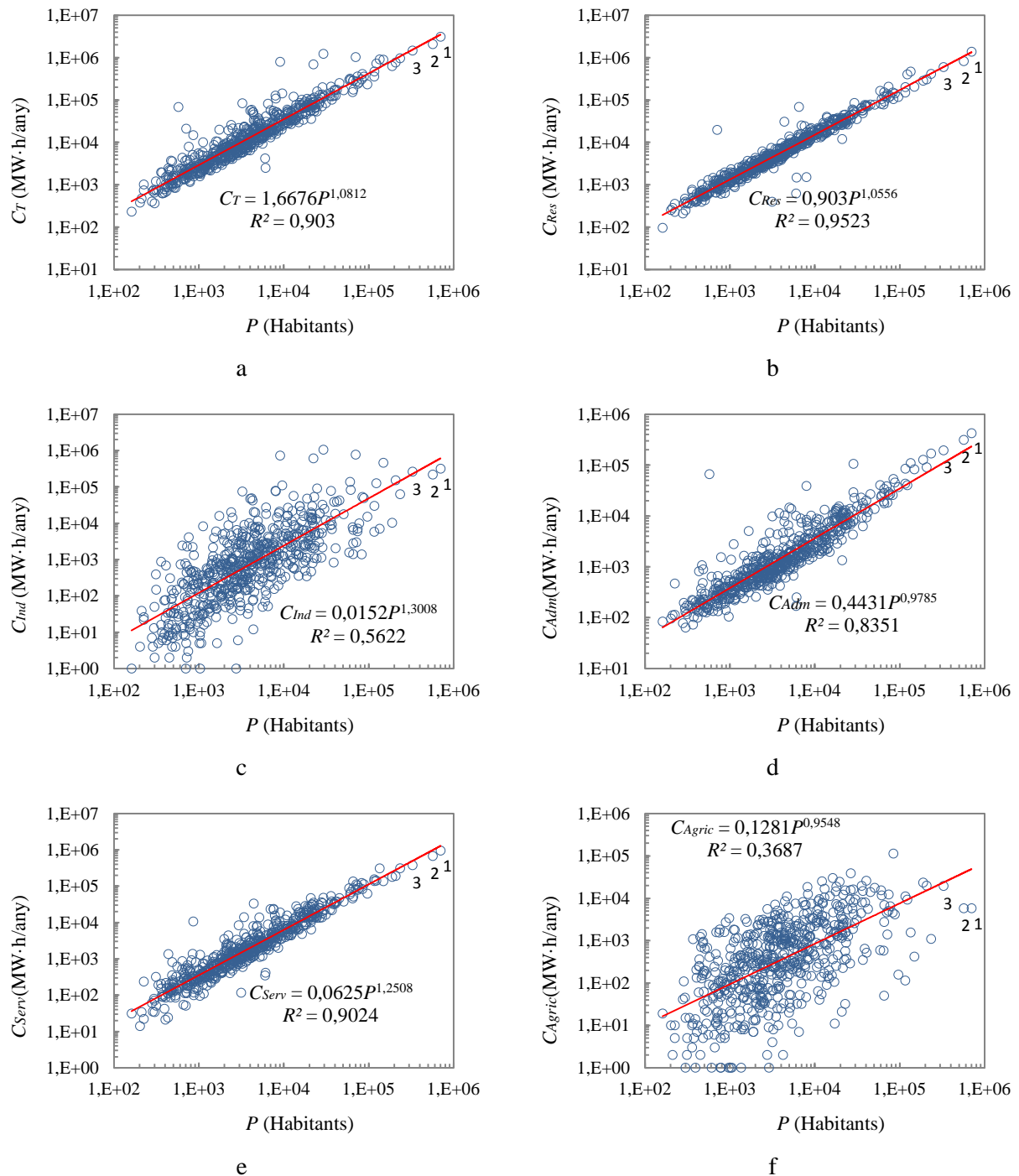


Figura 2.5 Cas d'estudi Ia: Consums vs. habitants. Relacions al·lomètriques entre els consums¹⁴ total (a), residencial (b), industrial (c), administració (d), serveis (e) i agricultura (f) de les poblacions d'Andalusia i els seus habitants. Els punts marcats corresponen a les ciutats amb més habitants i més consum de la mostra: 1-Sevilla 2-Màlaga 3-Còrdova. Les tres són capitals de província. S'inclouen les equacions de les regressions potencials (rectes en vermell) amb els coeficients de determinació.

El consum elèctric total dels municipis té un coeficient al·lomètric lleugerament superior a la unitat ($\beta=1,08$), i per tant, podem dir que escala superlinealment. Resultats similars ja els hem observat en

¹⁴ Pels càlculs, s'han utilitzat les dades dels consums d'energia elèctrica de l'any 2009 per tots els sectors (Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo)

estudis al·lomètrics d'altres investigadors (Bettencourt et al. 2007, Bettencourt et al. 2010-a, Xiaowu Zhu et al. 2009, Kühnert et al. 2006, Lämmer et al. 2006, Isalgue et al. 2007). El que no s'ha fet abans és analitzar els sectors econòmics per separat. Els resultats de fer-ho mostren que el comportament pot ser diferent segons el sector analitzat, tal i com ja es va comprovar en un estudi preliminar amb 134 municipis (Horta et al. 2010). Es pot veure en la figura, que els sectors residencial i administratiu escalen quasi linealment ($\beta=1,06$ i $\beta=0,98$ respectivament), mentre que els sectors serveis i industrial escalen clarament superlinealment ($\beta=1,25$ i $\beta=1,30$ respectivament) i el sector agricultura ho fa sublinealment ($\beta=0,95$). Els coeficients de determinació R^2 obtinguts, mostren que en el cas dels sectors industrial i agricultura hi ha una baixa qualitat del model, i no és així en la resta de sectors on aquest coeficient és alt o molt alt. El motiu d'aquesta baixa correlació (Figura 2.5 c i f) pot ser explicada pel fet que els consums de les indústries i les zones agrícoles s'atribueixen als termes municipals on estan ubicades i per tant als habitants del municipi. Això no té perquè ser necessàriament cert. Malgrat que aquestes empreses solen contractar personal del propi municipi, també en contracten procedent d'altres municipis propers als quals no se'ls atribueix cap consum d'energia. Un altre motiu que pot motivar un valor baix d'aquest coeficient en aquests dos sectors és que segons el tipus d'indústria o explotació agrària, el consum energètic pot diferir molt. Per posar un exemple: la indústria metal·lúrgica té consums elèctrics molt més elevats que la indústria de la fusta. El coeficient β proper a la unitat del sector residencial, és també previsible. El nombre d'habitants d'un municipi no té perquè influir massa en el consum energètic individual dels habitatges que el constitueixen. En el cas del sector serveis, el coeficient β superior a la unitat es pot explicar pel nombre i dimensions dels equipaments segons sigui el nombre d'habitants del municipi. Com més habitants hi ha, més equipaments i més grans són: centres comercials, cines i espais d'oci en general, entre d'altres. A diferència del cas industrial en què la ubicació de les empreses no obeeix al nombre d'habitants del municipi, en el cas comercial sí que es poden associar aquestes dues variables i per tant sí que es pot dir que hi haurà habitants d'altres municipis més petits que consumiran energia del sector comercial de municipis més grans. En ser aquesta repercutida aquesta als que resideixen en les poblacions on s'ubiquen les instal·lacions, es provoca un comportament superlineal: com més gran és un municipi, més consum per càpita d'energia elèctrica del sector comercial té. Tal i com s'ha dit més amunt, el sector administratiu té un comportament que es pot considerar pràcticament lineal. El motiu principal pot ser que tots els municipis tenen aproximadament el mateix tipus d'equipaments: ajuntament, dependències dels cossos de seguretat com la policia o els bombers, escoles, piscines municipals, il·luminació monumental entre d'altres. El consum d'aquests equipaments està produït pels habitants del propi municipi, no presentant-se la problemàtica del cas comercial. Com més gran és el municipi, més gran sol ser l'equipament, però també es reparteix el seu consum amb més habitants.

Gràfic Figura 2.5	Valors de la regressió	$Y = kX^\beta$		
		Paràmetre	Valor de la regressió	Interval de confiança 95%
a	$R^2 = 0,903$ $S_{yx} = 0,215$	k	1,668	1,317-2,111
		βa	1,081	1,053-1,109
b	$R^2 = 0,9523$ $S_{yx} = 0,144$	k	0,903	0,772-1,057
		βb	1,056	1,037-1,074
c	$R^2 = 0,5622$ $S_{yx} = 0,699$	k	0,015	0,007-0,033
		βc	1,301	1,209-1,392
d	$R^2 = 0,8351$ $S_{yx} = 0,265$	k	0,443	0,332-0,592
		βd	0,979	0,944-1,013
e	$R^2 = 0,9024$ $S_{yx} = 0,250$	k	0,063	0,048-0,082
		βe	1,251	1,218-1,283
f	$R^2 = 0,3687$ $S_{yx} = 0,760$	k	0,128	0,056-0,294
		βf	0,954	0,855-1,054

Taula 2.5 Cas d'estudi la: Dades estadístiques característiques de les regressions de la Figura 2.5, on R^2 és el coeficient de determinació, S_{yx} és l'error estàndard d'estimació, k i β són els coeficients de la recta de regressió Y obtinguda. No es presenten els p-valors associats de la funció t d'Student per ser aproximadament zero en tots els casos.

L'estudi de les bandes de confiança i les zones de predicció (Figura 2.6) poden aportar una informació valuosa i fins i tot indispensable en un estudi estadístic com aquest. Les bandes de confiança de les rectes dels sectors industrial i agricultura són més àmplies que en la resta de sectors. Això és coherent amb els resultats dels coeficients de determinació exposats més amunt. Les bandes de confiança més estretes corresponen al cas residencial. Les zones de predicció mostren un comportament similar.

L'anàlisi dels gràfics dels residus i dels percentils de la Figura 2.7 i la Figura 2.8 s'han utilitzat com a eina per assegurar que es compleixen les hipòtesis del model exposades en la metodologia (apartat 2.5.3). A excepció dels casos industrial i agricultura, els residus es mostren com un núvol el·lipsoïdal de punts al voltant del zero sense evidència d'estructura, tendència o canvi de la dispersió, i per tant es pot assegurar que es compleixen els supòsits de linealitat i homoscedasticitat. L'alineació dels punts en els gràfics dels percentils denota que es tracta de distribucions normals i amb variància constant.

Els gràfics a1 i a2 de la Figura 2.9 són el resultat de depurar les dades del consum elèctric total. Per fer-ho, s'han utilitzat els resultats obtinguts de l'anàlisi estadístic dels residus (Figura 2.7) i de les bandes de predicció (Figura 2.6). S'han eliminat un total de 28 municipis, considerats des d'un punt de vista estadístic com "outliers". Cal dir que no s'han presentat "outliers" del tipus "dragon-kinds" en el sentit descrit en la introducció d'aquest apartat 2.1.3 (Pisarenko et al. 2012, Sornette et al. 2012)

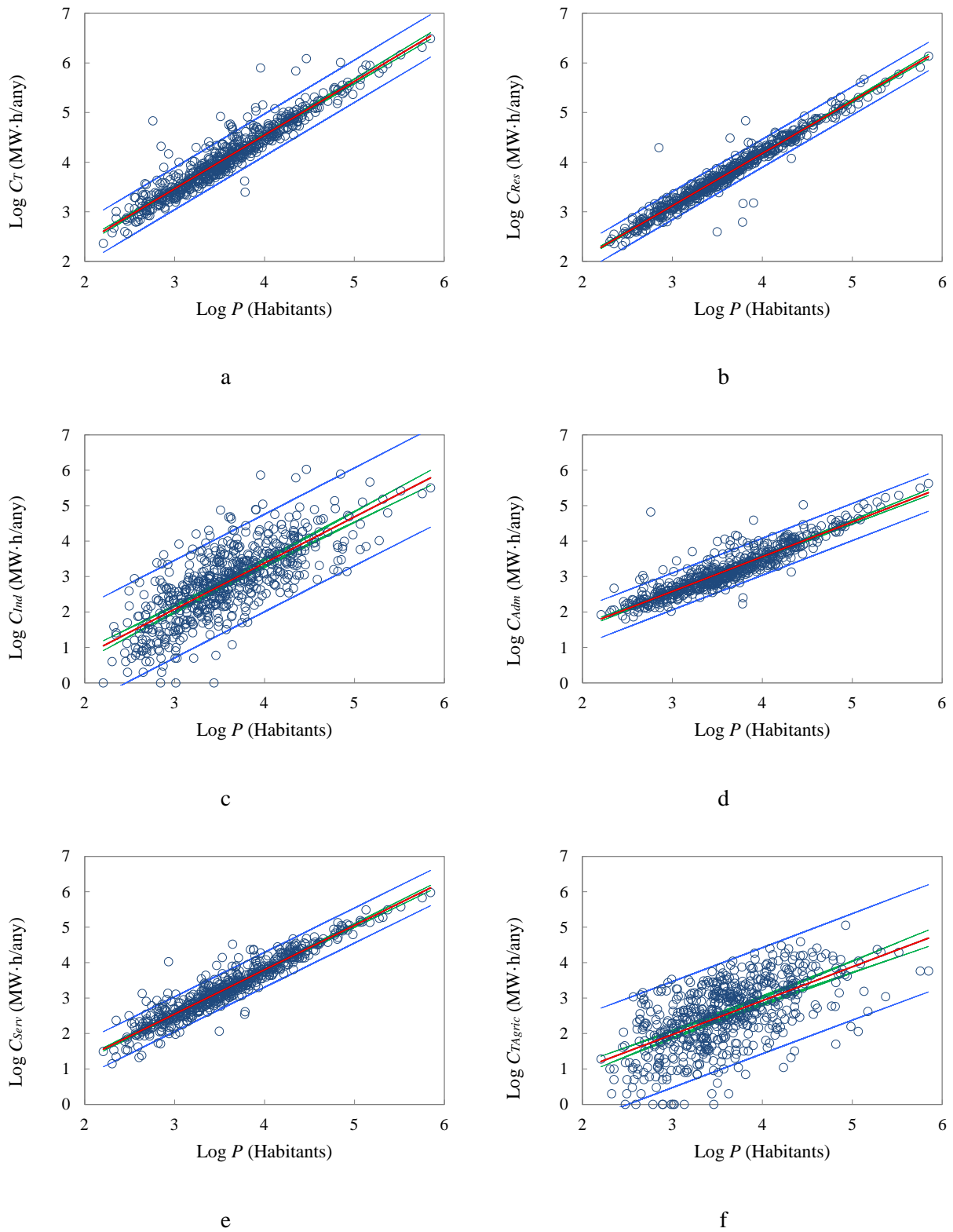
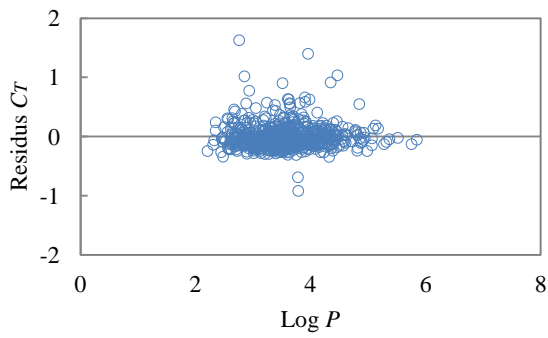
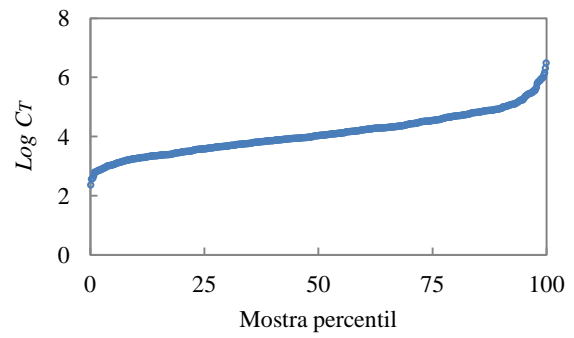


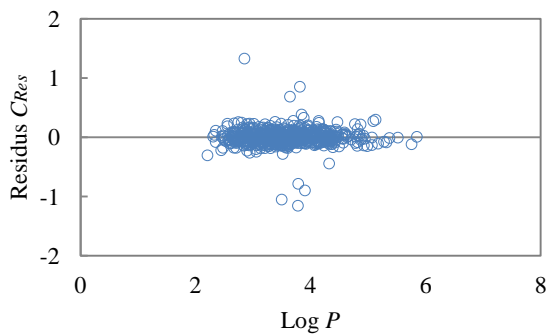
Figura 2.6 Cas d'estudi la: Bandes de confiança i de predicció. Les línies de color verd al voltant de la recta de regressió defineixen les bandes de confiança per la recta de regressió, i les línies de color blau acoten la zona de predicció, ambdues per una certesa del 95%. Els diferents gràfics corresponen als consum total (a), residencial (b), industrial (c), administració (d), serveis (e) i agricultura (f) de les poblacions d'Andalusia i els seus habitants



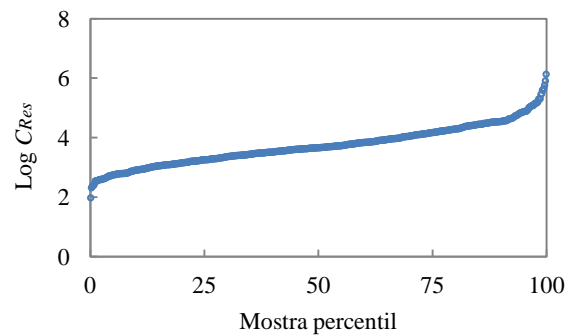
a1



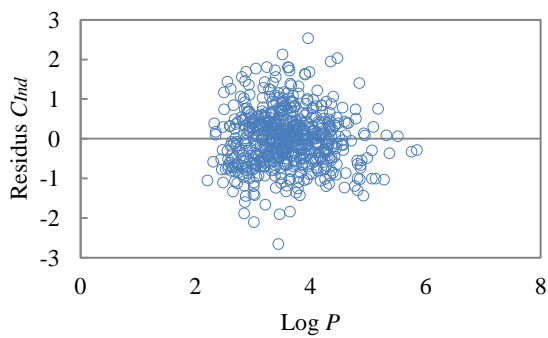
a2



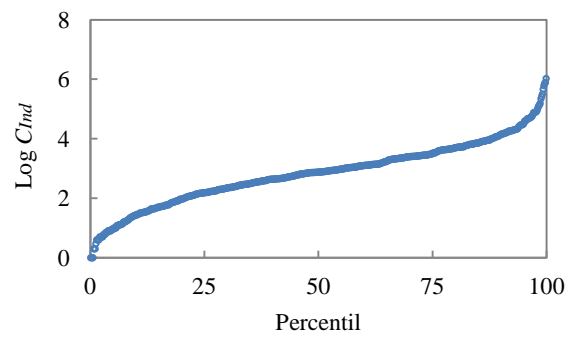
b1



b2

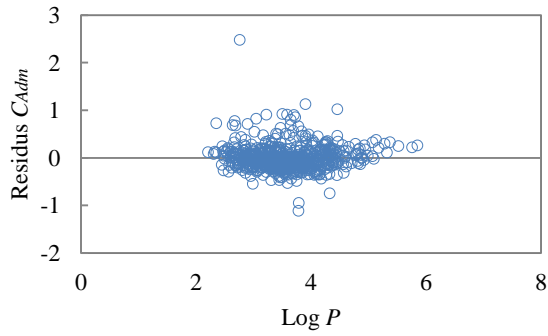


c1

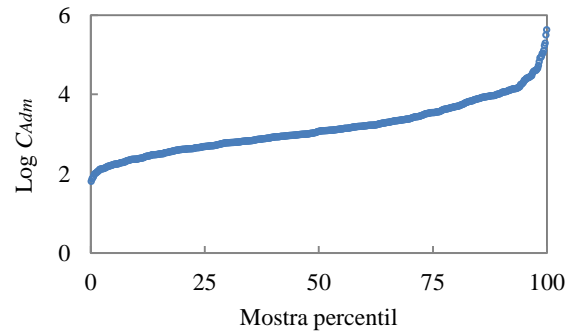


c2

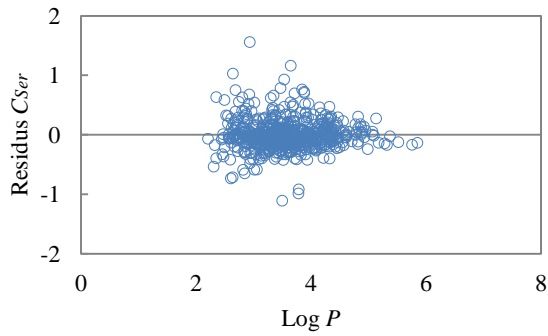
Figura 2.7 Cas d'estudi la: Residus (I). Als gràfics a1, b1 i c1, es mostren els residus dels consums total, residencial i industrial en funció de la població. Els gràfics a2, b2 i c2 són els percentils dels mateixos consums.



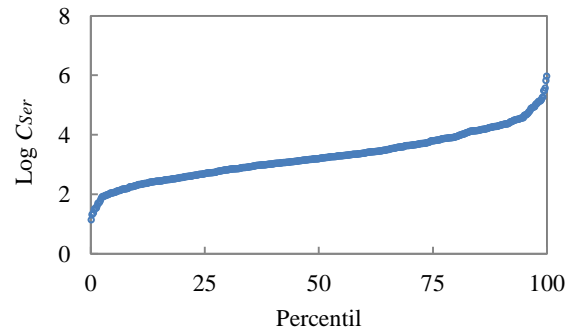
d1



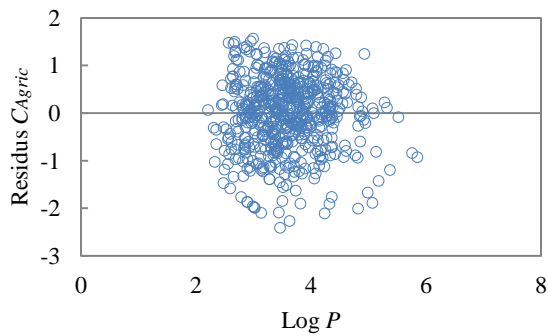
d2



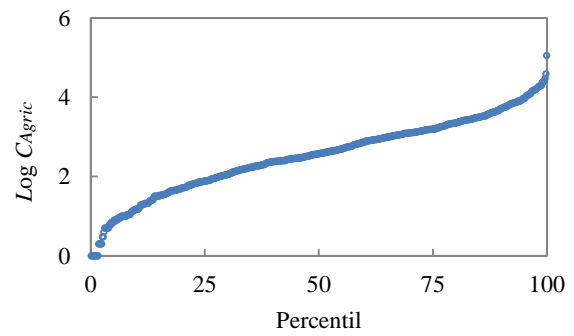
e1



e2



f1



f2

Figura 2.8 Cas d'estudi la: Residus (II). Als gràfics d1, e1 i f1, es mostren els residus dels consums administració, serveis i agricultura en funció de la població. Els gràfics d2, e2 i f2 són els percentils dels mateixos consums.

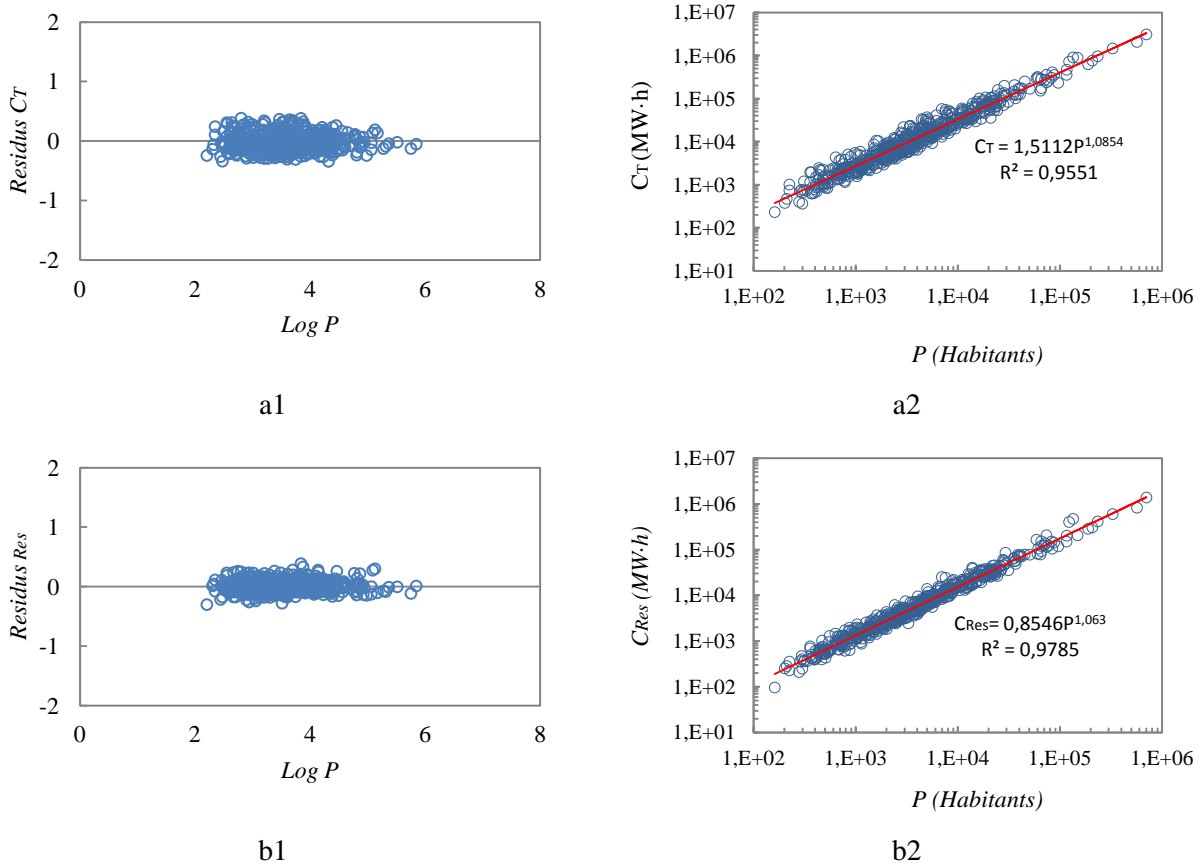


Figura 2.9 Cas d'estudi la: Resultats obtinguts en depurar les dades del consum total, a1 i a2, i consum residencial, b1 i b2. En el cas del consum total s'han eliminat 28 municipis (tots els que superaven $\pm 0,4$ de residus) de 611 en total. En el cas del consum residencial han estat 8 els municipis eliminats.

Els resultats es mostren a la Taula 2.6. La comparativa dels resultats obtinguts amb els originals (Figura 2.5 i Taula 2.5), mostra per una banda que el coeficient de determinació ha augmentat, com era d'esperar, i per altra banda, que han canviat els coeficients que defineixen l'equació de la regressió (Taula 2.7). Els coeficients al·lomètrics han augmentat lleugerament. Es referma la hipòtesi que les relacions al·lomètriques en el consum total i en el sector residencial són lleugerament superlineals, escalant amb coeficients pròxims a la unitat.

Gràfic Figura 2.9	Valors de la regressió	$Y = kX^\beta$		
		Paràmetre	Valor de la regressió	Interval de confiança 95%
a2	$R^2 = 0,9551$ $S_{yx} = 0,144$	k	1,511	1,288-1,774
		βa	1,085	1,066-1,104
b2	$R^2 = 0,9785$ $S_{yx} = 0,096$	k	0,855	0,769-0,950
		βb	1,063	1,050-1,076

Taula 2.6 Cas d'estudi la: Dades estadístiques característiques de les regressions de la Figura 2.9, on R^2 és el coeficient de determinació, S_{yx} és l'error estàndard d'estimació, k i β són els coeficients de la recta de regressió Y obtinguda. No es presenten els p-valors associats de la funció t d'Student per ser aproximadament zero en tots els casos.

		Dades originals	Dades depurades
C_T	R^2	0,903	0,955
	β	1,081	1,085
C_{Res}	R^2	0,952	0,979
	β	1,056	1,063

Taula 2.7 Cas d'estudi la: Comparativa dels coeficients de determinació R^2 i al·lomètric β , obtinguts dels anàlisis estadístics de les dades originals i les dades depurades pels consums total i residencial.

Per l'anàlisi del cas d'Andalusia que s'està desenvolupant en aquest estudi, s'han utilitzat la totalitat de municipis del territori, ja que es disposa de les dades de consums de tots aquests. Això no és el més habitual ja que normalment no hi ha bases de dades complertes o no són accessibles. Com més habitants té un municipi, més probabilitat hi ha que es disposi d'un recull de dades anuals. El motiu és que els municipis grans tenen més recursos humans i materials per realitzar anàlisis dels seus consums energètics. A la Figura 2.10 s'ha fet un anàlisi al·lomètric del consum total per franges de població per veure si aquest fet pot representar diferències prou importants en els resultats com per invalidar les conclusions que s'han anat presentat al llarg d'aquest document.

A la Taula 2.8 es recullen els resultats. Es pot observar que el coeficient de determinació R^2 pot ser molt sensible a aquest fet. L'interval que va de 2.000 a 6.700 habitants és el que presenta un coeficient més baix. Contràriament, l'interval que recull les ciutats més grans presenta el coeficient més elevat. Pel que fa a l'exponent al·lomètric, també hi ha diferències que són importants entre els municipis mitjans i els més petits. El valor del coeficient de determinació aconsella prudència alhora de treure conclusions d'aquest fet, i en tot cas, caldria aprofundir per esbrinar la repercussió del nombre d'habitants alhora de treure conclusions (Arcaute et al. 2013).

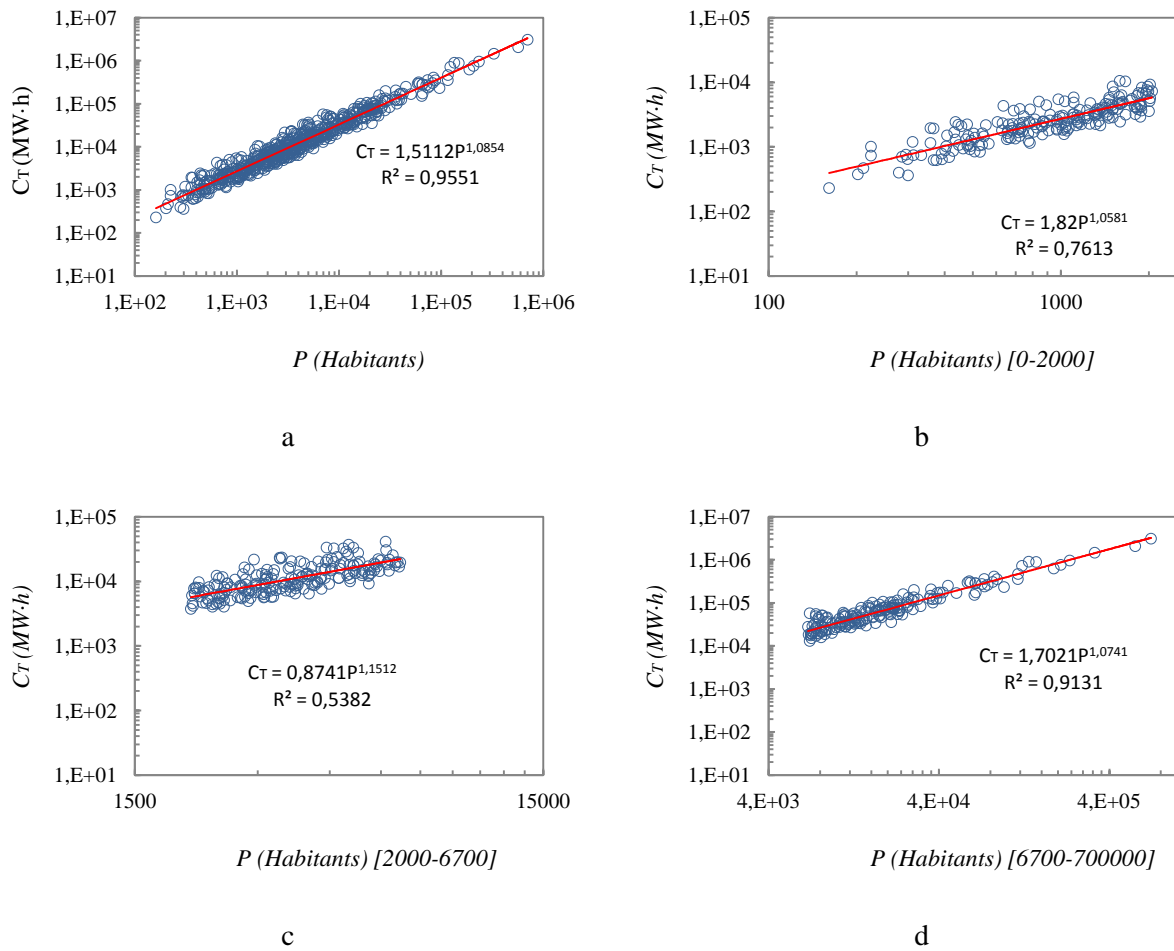


Figura 2.10 Cas d'estudi la: Anàlisi estadístic del consum total en intervals de la variable explicativa nombre d'habitants. A la figura a, es mostra l'al·lometria pel total de municipis. A la resta es mostren les al·lometries només analitzant franges d'habitants de 0 a 2.000 habitants (gràfic b), de 2.000 a 6.700 (c) i de 6700 a 700.000 (d).

Gràfic Figura 2.10	Valors de la regressió	$Y = kX^\beta$		
		Paràmetre	Valor de la regressió	Interval de confiança 95%
a	$R^2 = 0,9551$ $S_{yx} = 0,144$	k	1,511	1,288-1,774
		β_a	1,085	1,066-1,104
b	$R^2 = 0,7613$ $S_{yx} = 0,148$	k	1,820	1,031-3,211
		β_b	1,058	0,975-1,142
c	$R^2 = 0,538$ $S_{yx} = 0,153$	k	0,874	0,258-2,964
		β_c	1,151	1,002-1,300
d	$R^2 = 0,9130$ $S_{yx} = 0,129$	k	1,702	1,052-2,753
		β_d	1,074	1,026-1,123

Taula 2.8 Cas d'estudi la: Dades estadístiques característiques de les regressions de la Figura 2.10, on R^2 és el coeficient de determinació, S_{yx} és l'error estàndard d'estimació, k i β són els coeficients de la recta de regressió Y obtinguda. No es presenten els p-valors associats de la funció t d'Student per ser aproximadament zero en tots els casos.

Un estudi detallat de l'evolució temporal de l'exponent al·lomètric pot aportar informació rellevant sobre els sectors econòmics, les províncies, o les poblacions. La Taula 2.9 mostra els valors de l'exponent al·lomètric cada dos anys, junt amb l'interval de confiança i el coeficient de determinació.

Consum	Any	β	IC 95%	R ²
Agricultura	2000	1.23	[1.16,1.30]	0.63
	2002	0.97	[0.88,1.06]	0.38
	2004	0.99	[0.89,1.08]	0.39
	2006	0.97	[0.87,1.06]	0.39
	2008	0.95	[0.86,1.04]	0.40
	2010	0.92	[0.83,1.01]	0.40
Industrial	2000	1.39	[1.32,1.45]	0.71
	2002	1.32	[1.24,1.40]	0.60
	2004	1.35	[1.26,1.44]	0.59
	2006	1.36	[1.27,1.45]	0.60
	2008	1.32	[1.23,1.41]	0.58
	2010	1.29	[1.20,1.38]	0.57
Serveis	2000	1.18	[1.15,1.22]	0.85
	2002	1.30	[1.26,1.33]	0.88
	2004	1.33	[1.30,1.36]	0.91
	2006	1.31	[1.28,1.34]	0.91
	2008	1.30	[1.27,1.33]	0.91
	2010	1.27	[1.24,1.31]	0.90
Residencial	2000	1.12	[1.08,1.15]	0.83
	2002	1.09	[1.06,1.11]	0.90
	2004	1.08	[1.06,1.10]	0.96
	2006	1.08	[1.07,1.10]	0.96
	2008	1.07	[1.06,1.09]	0.96
	2010	1.06	[1.04,1.08]	0.95
Administració	2000	NA	NA	NA
	2002	1.04	[1.01,1.07]	0.83
	2004	1.00	[0.97,1.04]	0.85
	2006	1.01	[0.98,1.04]	0.85
	2008	0.99	[0.96,1.02]	0.85
	2010	0.97	[0.94,1.00]	0.85

Taula 2.9 Cas d'estudi la: Exponents al·lomètrics per cicles anuals presos cada dos anys, interval de confiança i coeficient de determinació pel període temporal del 2000 al 2010

Gràficament, l'evolució dinàmica de l'exponent β a través dels anys es pot veure en la Figura 2.11. Els valors de β es mantenen essencialment constants en el temps, encara que s'observa una petita tendència a decreixer a partir de l'any 2006 en endavant. Els sectors poden ser agrupats mitjançant els valors de l'exponent. Es pot fer la següent segregació:

- Consum de l'agricultura: Escala lleugerament sublinealment amb valors entre 0,92 i 0,99
- Consums industrial i serveis: Escalen superlinealment amb valors compresos entre 1,18 i 1,39
- Consum residencial: Escala lleugerament superlinealment entre 1,06 i 1,12
- Consum administratiu: Escala quasi linealment amb valors entre 0,97 i 1,04

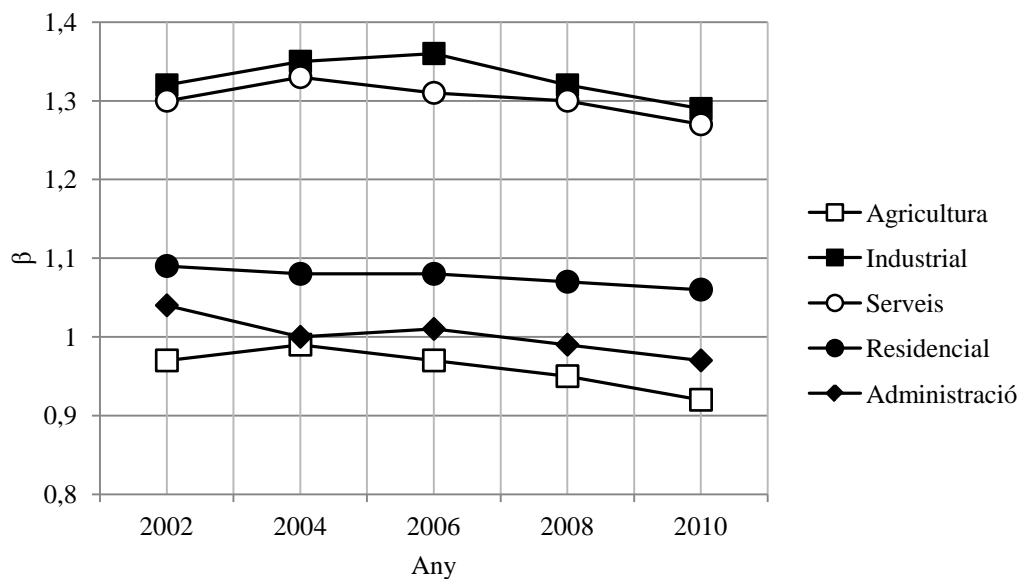


Figura 2.11 Cas d'estudi la: Evolució en el temps del coeficient al·lomètric β per diferents sectors econòmics, segons les dades de la Taula 2.9

El sector primari, és l'únic caracteritzat per una correlació sublineal que es pot relacionar amb la disminució de les àrees rurals amb increment de població, com una tendència de les aglomeracions urbanes (UN 2012). Per altra banda, mentre el consum elèctric residencial escala quasi linealment (tal i com s'espera i en concordança amb altres referències citades més amunt), el consum industrial i de serveis escalen superlinealment. Aquests dos sectors comporten quasi la meitat del consum d'electricitat de la comunitat d'Andalusia (Figura 2.12). Aquestes dades, corroboren el fet que el creixement d'una ciutat en termes de població, implica un augment dels indicadors de productivitat i riquesa, a expenses d'un consum d'energia elèctrica més gran. Tal i com ja s'ha indicat en apartats anteriors, anàlisis recents de dades de consums d'electricitat, suggereixen que les lleis de potència que escalen amb la grandària de la població, depenen d'altres factors exògens com poden ser, la localització geogràfica (Xiaowu Zhu et al. 2009) i el consum segons sigui el sector econòmic (Horta et al. 2010), en comptes de factors endògens, com poden ser, una xarxa de transport i/o distribució no òptima (Bettencourt et al. 2007). En el cas de la Comunitat d'Andalusia, tal i com es pot veure, els sectors secundari i terciari són responsables d'aproximadament el 50% del consum total d'energia elèctrica, i alhora escalen superlinealment amb la població. Això provoca que el consum total escali també superlinealment amb $\beta = 1,08$.

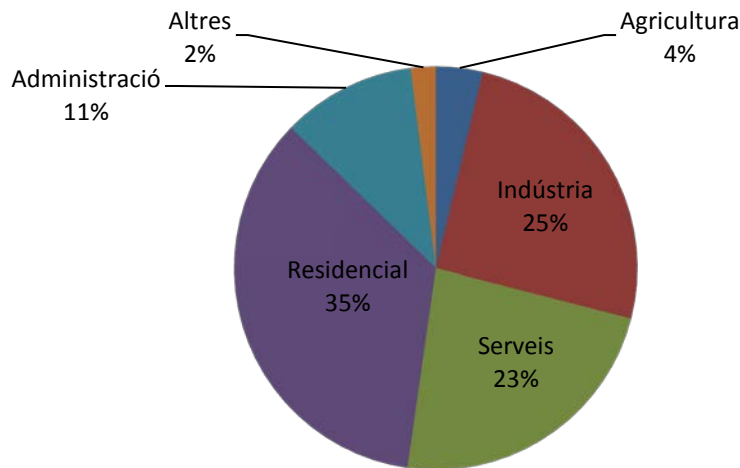


Figura 2.12 Cas d'estudi la: Distribució del consum mitjà d'electricitat, per a cada sector analitzat des de l'any 2000 fins el 2010

Per altra banda, considerant l'equació 2. 9, és senzill analitzar el comportament de l'àrea ocupada per una aglomeració urbana segons el seu consum energètic com:

$$A \propto C^{n/b} \quad 2. 25$$

Per $b=n$, el consum i l'àrea urbana escalen linealment. Per $n>b$ i $n<b$, l'àrea urbana escala súper i sublinealment respectivament amb el consum. Amb un valor mig de $n \sim 2$ (Marshall 2007), i valors de b agafats del present estudi, entre 0,9 (consum de l'agricultura) i 1,3 (consum industrial i serveis), el consum elèctric tendria a constrènyer el creixement de les àrees urbanes, especialment en aquelles ciutats caracteritzades amb sectors econòmics amb factors d'escala superlineals.

Els residus poden ser caracteritzats estadísticament mitjançant distribucions de probabilitat. A la Figura 2.13 es pot veure un exemple pel cas del consum industrial per l'any 2010. En aquest cas la funció que s'ajusta més és la funció normal, però en altres casos pot ajustar-se be la funció de distribució log-log. El gràfic suggereix fluctuacions aleatòries, però per altra banda és estable en el temps.

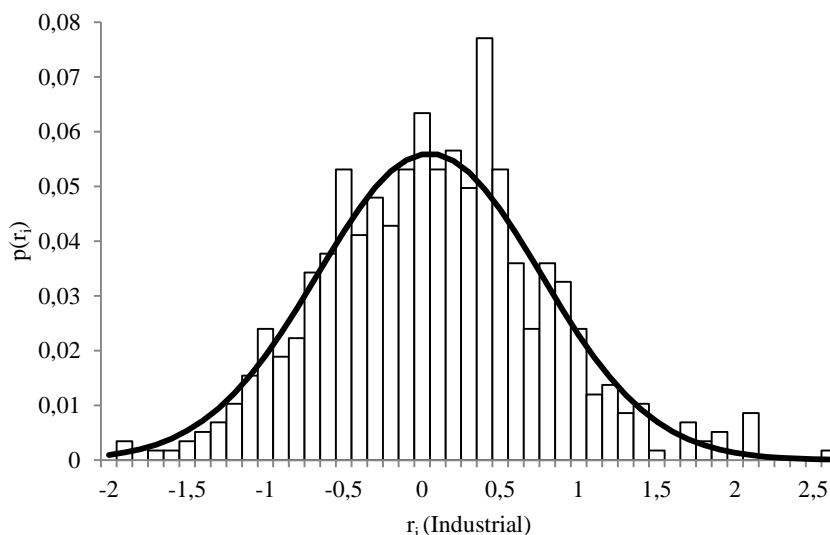


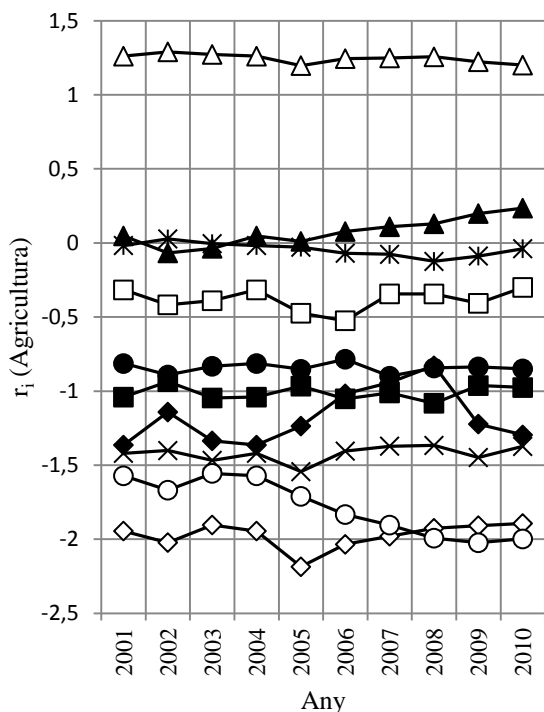
Figura 2.13 Cas d'estudi la: Histograma de freqüències dels residus del consum industrial de l'any 2010, ajustada per la funció normal

La Figura 2.14, mostra l'evolució temporal dels residus d'algunes poblacions. Els residus poden ser usats per extreure conclusions sobre el comportament individual de cada població (Bettencourt et al. 2010-b, Batty et al. 1976). Segons l'equació 2.24, quan el valor estimat sigui més gran que el valor real el residu serà negatiu, mostrant un comportament eficient respecte la mitjana. Contràriament, quan el valor estimat sigui inferior al valor real, el residu serà positiu i el comportament ineficient.

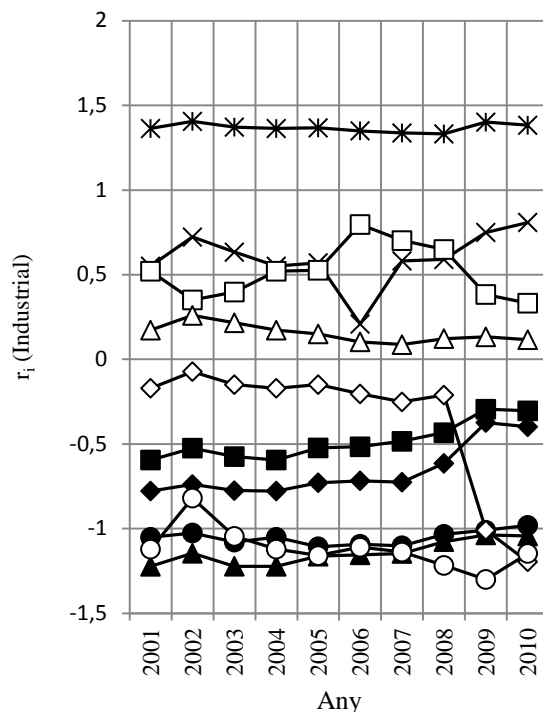
Cal destacar en primer lloc, la robustesa i estabilitat del comportament temporal dels residus al llarg dels anys, per tots els sectors analitzats. Destaca també, el fet que hi ha una àmplia variabilitat en els valors dels consums d'agricultura i industrial (entre -2,5 i 1,5), comparat amb la resta de consums analitzats (entre -0,3 i 0,6). Això està clarament relacionat amb el valor del coeficient de determinació R^2 mostrat a la Taula 2.9, on es pot veure que els valors pels consums residencial, serveis i administració, són els més alts. Entre les ciutats escollides per aquest anàlisi, hi ha capitals de regió, algunes altres grans ciutats importants, i altres exemples escollits aleatòriament, tant de l'interior del territori com de la costa. En els consums d'agricultura (gràfic a), destaquen El Ejido i Almería amb els valors més alts, ja que tenen una activitat marcadament rural. Els valors negatius corresponen a capitals de província com Huelva, Sevilla, Córdoba o Granada, i a ciutats caracteritzades amb altres factors socioeconòmics com Algeciras, i ciutats costeres com Marbella i Torremolinos. Alcalá de Guadaíra és la ciutat més industrialitzada de la regió¹⁵, i així queda reflectit en el gràfic (b) d'aquesta figura. Algeciras té un important decrement del valor dels residus a partir de l'any 2008. Aquesta ciutat té el port comercial com a principal activitat econòmica, i durant l'any 2008 va començar a afectar-li el començament de la crisi econòmica que actualment afecta a

¹⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Alcal%C3%A1_de_Guad%C3%A1lajara#Economy [Consulta: 20 de març de 2013]

bona part del món, així com l'aparició d'altres destinacions més econòmiques al mediterrani¹⁶. Al sector comercial hi ha menys variació (gràfic c), i s'observa una tendència al valor nul. Durant el darrers anys hi ha hagut una concentració del sector terciari en àrees amb més població (La caixa 2012), cosa que explicaria el decreixement dels residus negatius en les capitals (per exemple, Sevilla, Córdoba, Huelva, Almería i Granada) i un decreixement dels residus positius per ciutats més petites (per exemple, Torremolinos, Marbella o el Ejido). El comportament del consum residencial del gràfic (d) suggereixen una tendència regular per moltes de les ciutats, però es detecten algunes amb punts anòmals. El cas de Huelva, per exemple, a l'any 2006 té un punt molt anòmal. Després d'un anàlisi, s'ha arribat a la conclusió que hi ha un error en la base de dades original per aquest punt. Marbella i Torremolinos són destinacions molt turístiques, i això fa que tinguin un elevat consum residencial per ocupació d'apartaments i habitatges, que s'imputen al consum residencial i no pas al de serveis com el cas dels hotels. Al gràfic (e) del consum administratiu, es detecta un tendència creixent dels valors dels residus de les grans capitals i grans ciutats, indicant la forta tendència de concentració de despeses en aquest sector en els últims anys, causa prou coneguda de la crisi actual (La caixa 2012). La tendència més acusada la presenta Alcalá de Guadaíra a partir de l'any 2007 en endavant. Això es pot explicar per un increment en la despesa pública, que es registra en aquests anys en obres de rehabilitació del centre històric urbà (URBAN plan), amb la construcció d'infraestructures i serveis (inclòs un tramvia) que comencen al 2008 i acaben al 2013¹⁷.



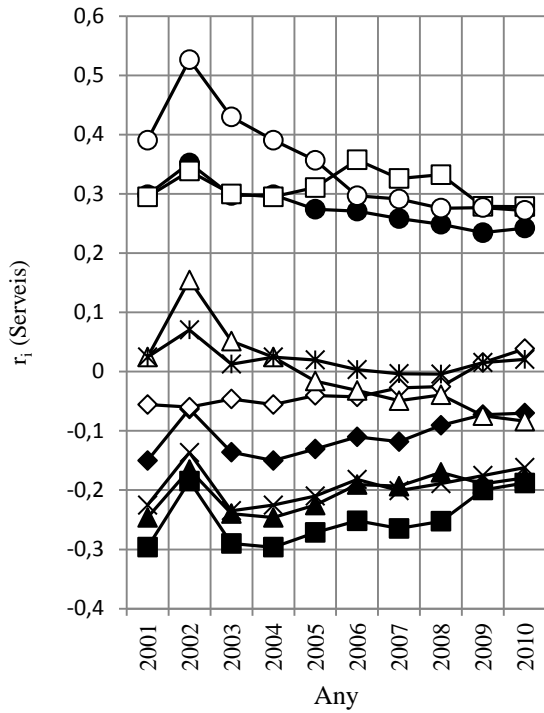
(a)



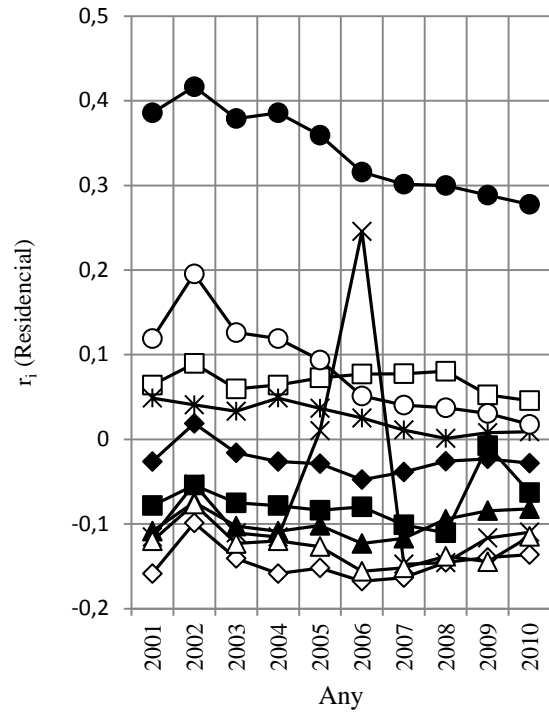
(b)

¹⁶ Spanish port faces threat from Tangier (Financial Times, April 14 2009, Robert Wright)

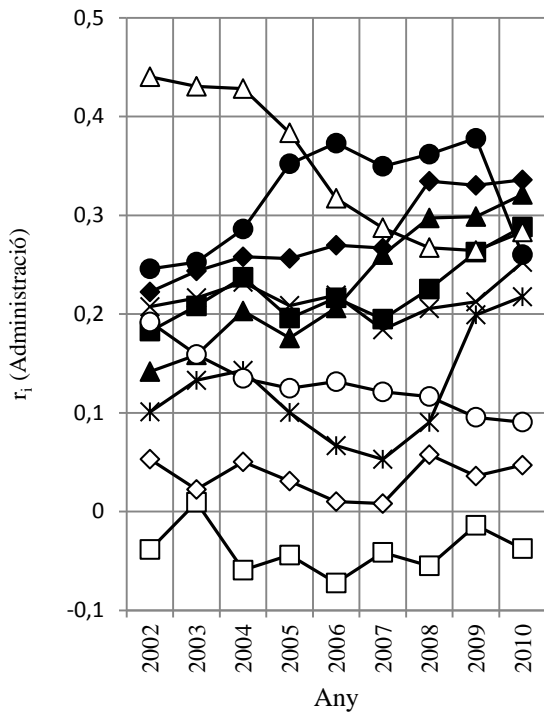
¹⁷ <http://www.ciudadalcala.org/pdf/Proyecto-URBAN.pdf> [Consulta: 13 de febrer de 2013].



(c)



(d)



(e)

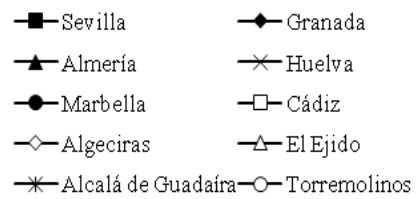


Figura 2.14 Cas d'estudi la: Evolució temporal dels residus pels diferents sectors econòmics estudiats, agricultura (a), indústria (b), serveis (c), residencial (d) i administració (e), d'algunes poblacions seleccionades com a exemple.

Per tal de trobar possibles correlacions entre sectors diferents, s'han utilitzat gràfics de residus d'un sector respecte d'un altre. La major part de correlacions presenten un baix coeficient de determinació, a excepció del parell format pel consum en serveis i residencial de la província de Cadis ($R^2=0,68$) i Huelva ($R^2=0,52$), i el parell consum administratiu i residencial per la província de Màlaga ($R^2=0,59$). El gràfic de la Figura 2.15 mostra els residus del consum de serveis respecte els residus del consum residencial de les poblacions de la província de Cadis, per detectar casos amb consums estables que estan permanentment per sota o per sobre de la mitjana . Es pot veure una bona correlació que es manté en el temps. S'observen desviacions positives tant per ciutats costeres i turístiques com San Roque, Tarifa, Rota, Chipiona i El Puerto de Santa María, com per poblacions del Parc Natural de Grazalema, Grazalema i El bosque. S'observen també desviacions negatives en ambdós residus, en poblacions industrials o interiors com Jerez, Arcos de la Frontera, Algeciras o La Línea de la Concepción.

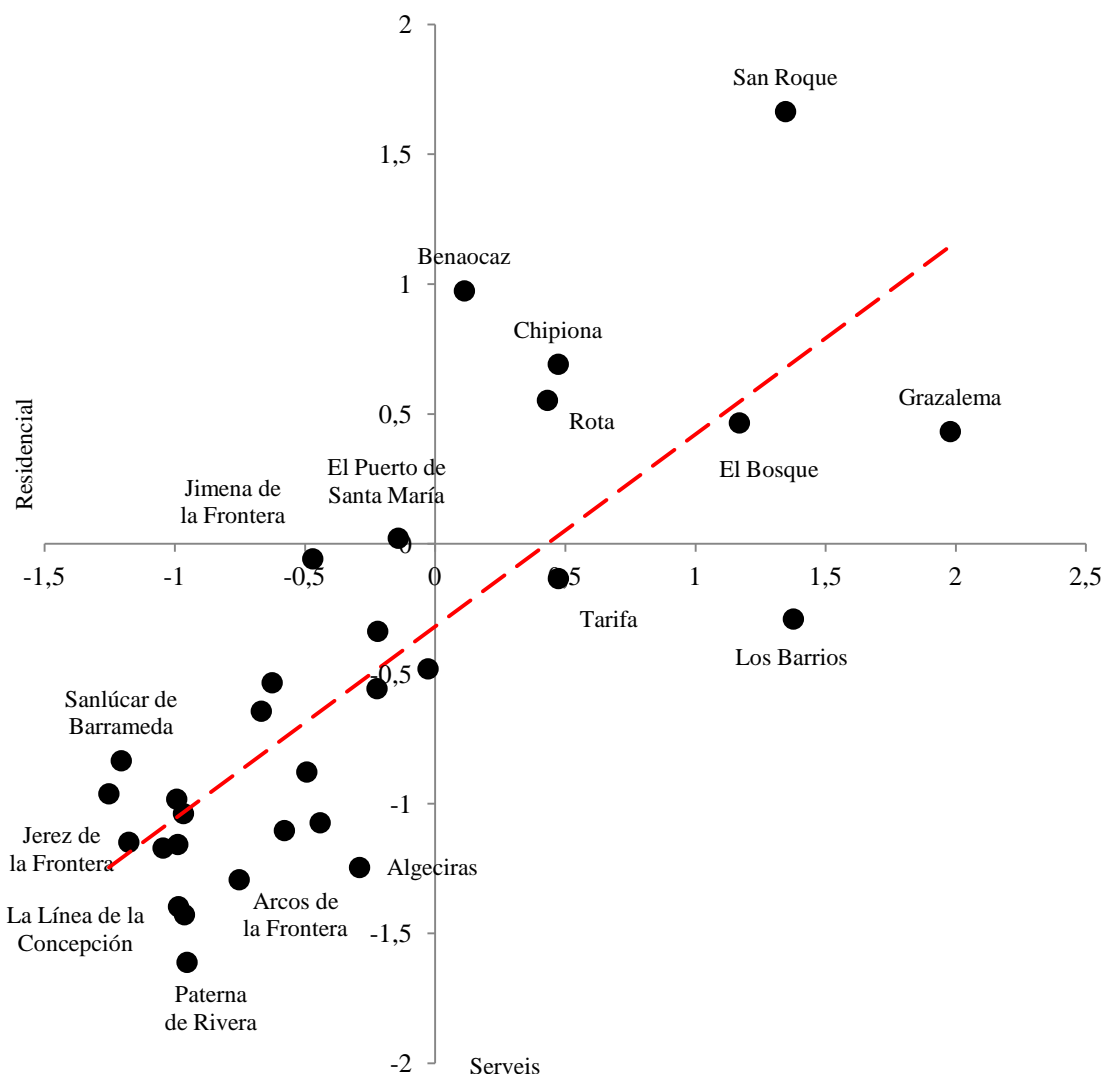


Figura 2.15 Cas d'estudi la: correlació i regressió ($R^2=0,61$) entre els residus del consum serveis i residencial per l'any 2010 de la província de Cadis.

Amb la intenció d'aprofundir una mica més en les correlacions exposades i les seves causes socials o econòmiques, s'han escollit dues poblacions amb comportaments molt diferenciats: Marbella i El Ejido. La primera té una població de 136.300 habitants i la segona 84.227, ambdues en l'any 2010. Marbella pertany a la província de Màlaga, i està situada a la Costa del Sol. És especialment popular pel seu turisme de luxe, provinent del nord d'Europa, Aràbia Saudí, Emirats Àrabs Units i Estats Units. Per aquesta raó, és normal que els sectors primari (consum en agricultura) i secundari (consum industrial) presentin valors de consum molt baixos, i en canvi els sectors terciari (consum en serveis) i residencial presenten consums elevats (Figura 2.16a). Al contrari, El Ejido, sent també una població costera, en aquest cas a la província d'Almeria, és un centre de producció de fruita i verdures. Conseqüentment, el consum al sector primari és molt superior a la resta de sectors (Figura 2.16b). Les dues poblacions presenten un comportament descendent en el consum global d'electricitat a partir de l'any 2007/2008.

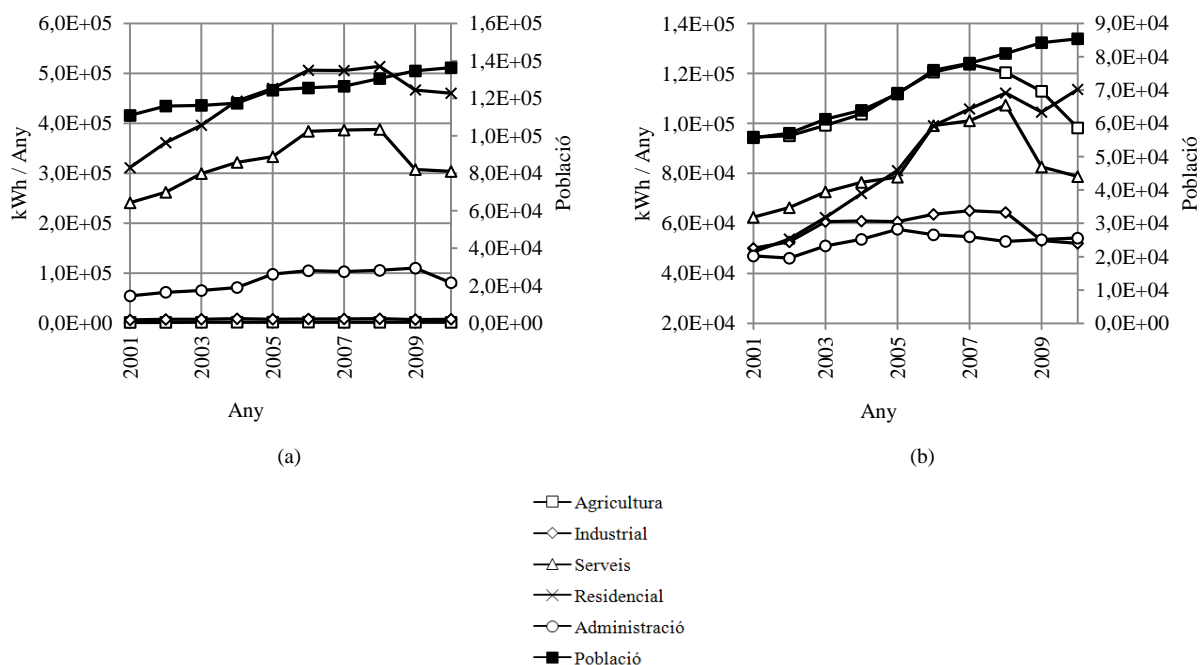


Figura 2.16 Cas d'estudi la: Comportament dels consums de les poblacions de Marbella (a) i El Ejido(b) pels anys 2001 al 2010.

Això pot tenir les seves causes en el creixement de l'atur, l'augment dels impostos comercials (IAE) i al descens del nombre d'habitacions per càpita (Figura 2.17). Si observem els residus del consum residencial de Marbella i El Ejido (Figura 2.14d), podem veure una clara tendència decreixent, que pot correlacionar positivament amb el nombre de línies telefòniques per càpita (Figura 2.17). Els residus de Marbella del consum administratiu, han estat creixent, mentre que en el cas de El Ejido, han estat decreixent (Figura 2.14e) mostrant la tendència citada més amunt, de centralitzar la despesa pública en aglomeracions urbanes amb més població. Aquesta tendència es veu més clarament en El Ejido, on les

línies telefòniques decreixen en els darrers 10 anys, mentre que Marbella ha estat mantenint el mateix nombre de línies telefòniques fins el 2007. Aquest fet pot influir en el consum de les llars, i pot ser observat en la suau reducció del consum residencial dels residus de Marbella respecte El Ejido (Figura 2.14d)

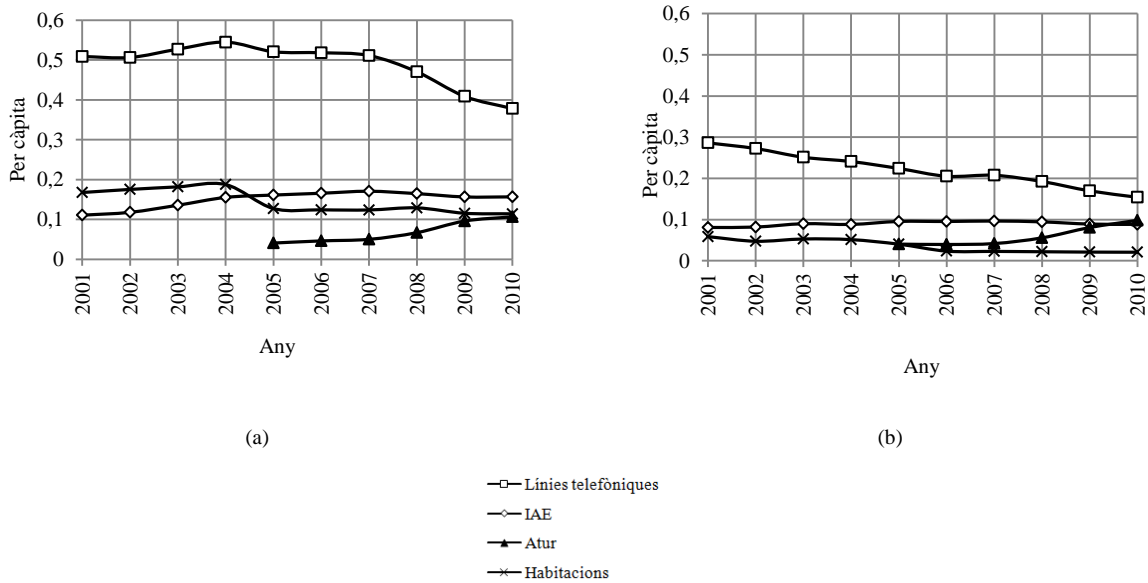


Figura 2.17 Cas d'estudi la: Dades socioeconòmiques de les poblacions de Marbella (a) i El Ejido (b) de l'any 2001 al 2010.

2.5 Models gravitacionals

2.5.1 Estat de la qüestió

Durant el segle XIX es va començar a pensar en la possibilitat d'aplicar alguns principis de les ciències físiques i matemàtiques en les ciències socials. Un d'aquests principis va ser el de la gravitació universal aplicat a l'explicació d'alguns fenòmens d'interacció espacial. Els models basats en aquest principi s'anomenen models gravitacionals. Aquests models inicialment utilitzaven certes característiques de dues àrees geogràfiques i la distància que les separa per descriure el flux observat de persones entre aquestes. Aquestes àrees poden ser des de petites poblacions a grans ciutats o fins i tot províncies. En aquest apartat s'utilitzarà "regió" per indicar qualsevol d'aquestes àrees. La primera formulació que va utilitzar aquest concepte per determinar el nombre de migracions va ser proposada per Young (Young 1928). La idea central és que el volum de migració entre dues regions és inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa i directament proporcional a la "força d'atracció" de la regió de destí. Segons el model de Zipf (Zipf 1949), sí el grau de desocupació i la renda estan uniformement distribuïts en l'àrea estudiada, la força d'atracció es pot aproximar pel nombre d'habitants de les regions (Eq. 2.26);

$$M_{ij} = G \frac{P_i P_j}{d_{ij}^2} \tag{2.26}$$

On M_{ij} , és el nombre de moviments entre dues regions, G una constant a determinar, P_i i P_j les poblacions de cada regió i d_{ij} la distància que les separa. Des de la publicació de Young i fins el present s'ha discutit molt sobre els exponents de les variables d_{ij} , P_i i P_j . Trobem investigadors que proposen en els seus estudis valors diferents de la unitat (Jung et al. 2008, Krings et al. 2009). Per altra banda, si tenim en compte que entre dues regions hi ha una “força d’atracció”, llavors totes les regions dins d’una frontera definida s’influeixen mútuament. Hi ha models que per aquest motiu tenen en compte totes les regions que formen part d’un mateix territori definit prèviament per calcular el nombre de moviments en una regió concreta. La “força d’atracció” d’aquesta regió pot expressar-se com el potencial gravitatori v_i de l’equació 2.27;

$$v_i = G \sum_{j=1}^n \frac{P_j}{d_{ij}^\alpha} \quad 2.27$$

on P_j és la població de la regió j , G i α són constants a determinar, i d_{ij} és la distància entre les ciutats i i j .

La formulació dels models gravitacionals s’ha utilitzat en nombrosos estudis que pretenen descriure altres tipus d’interaccions entre regions. El transport de viatgers o mercaderies via aèria (Rico 2008), amb ferrocarril (Zipf 1949) o amb vaixell (Kaluza et al. 2010); les xarxes de carreteres (Jung et al. 2008, Davies 1979); les xarxes de comunicació de telefonia (Krings et al. 2009) en són alguns exemples.

Un dels àmbits on hi ha més estudis en els quals s’aplica el model gravitacional és el de moviment de viatgers o mercaderies. Jung i els seus col·legues (Jung et al. 2008) van investigar el tràfic de vehicles en les autopistes coreanes i van identificar un model gravitacional. Varen trobar que la quantitat de vehicles entre dues ciutats no seguia una llei potencial i en canvi era proporcional al producte de les poblacions d’aquestes i inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa. En el cas del transport aeri, Rico (Rico 2008) va investigar la mobilitat dels passatgers que utilitzen el sistema interior de transport aeri mexicà i va concloure que la variable distància entre les ciutats d’origen i destí no era una variable explicativa, és a dir que la seva omisió no tenia un efecte important en l’equació gravitacional per reproduir el comportament del tràfic aeri. En el transport marítim també hi ha exemples d’aplicació. Kaluza i el seu equip (Kaluza et al. 2010) va investigar el transport marítim amb vaixells de càrrega. Tot i que en el seu cas el model gravitacional també proporciona una bona modelització, no tots els punts estudiats (viatges de vaixells d’un port a un altre) es poden explicar satisfactòriament, havent-hi dades predites que s’allunyen molt de les observades. Conclou que caldria millorar el model amb més informació a part del nombre de viatges i la distància entre els punts de sortida i els d’arribada.

En l’estudi que realitza l’equip de Krings (Krings et al. 2009) s’analitzen les comunicacions entre telèfons mòbils a Bèlgica amb l’objectiu de proposar un model d’interacció entre ciutats basat en la relació entre aquesta xarxa social i el seu posicionament geogràfic. Agrupen els clients segons l’adreça de les seves factures i creen dos nivells de xarxa, una “microscòpica” que correspon a les interaccions entre persones i una “macroscòpica” que correspon a les interaccions entre ciutats. La variable que relaciona a dos clients

és el temps total en segons de trucades realitzades entre aquests, i la variable que relaciona a dues ciutats és el temps total en segons de trucades realitzades entre clients que resideixen en aquestes dues ciutats. A aquests temps els anomenen “intensitat de comunicació”. D’una manera similar a la utilitzada en aquesta tesi, Krings presenta la relació al·lomètrica entre el nombre d’habitants de cada població i la intensitat de comunicació. Els resultats mostren un coeficient β sublineal de 0,96 (Apartat 2.1.3). Proposa, a més, a més relacionar aquestes persones amb les dues ciutats on resideixen i estudiar la dependència entre el temps total de trucades realitzades amb dues característiques d’aquestes ciutats: la població total i la distància que les separa. Per fer-ho utilitza el concepte dels models gravitacionals. Els resultats mostren que la comunicació entre les ciutats segueix el model gravitacional escala linealment ($\beta \sim 1$) amb la grandària de les poblacions i decreix amb el quadrat de la distància ($\alpha=2$ de l’equació 2.27).

En els estudis comentats es posa de manifest que els models gravitacionals poden tenir certes restriccions que encara no han estat aclarides. En aquest sentit l’equip de László Barabási (Simini et al. 2012) en posa de manifest algunes en el seu article “*A Universal Model for Mobility and Migration*”. Les principals limitacions que esmenta són:

- Incongruències matemàtiques en derivar l’equació 2.26 amb exponents de P_i i P_j diferents de 1.
- Ningú fins ara ha descrit un mètode general clar per utilitzar el model gravitacional.
- Es necessiten dades històriques dels desplaçaments, sent aquest un inconvenient important ja que normalment és una informació difícil d’obtenir.
- En aplicar el model es poden donar discrepàncies predictives importants. Per exemple, dues ciutats amb dades similars de poblacions i distància donarien un resultat similar al model i en canvi, en la realitat, a aquestes dues ciutats els pot correspondre un nombre de desplaçaments molt diferent.
- El model no té limitació en el nombre d’entitats desplaçades (viatgers, mercaderies, etc). Per exemple, en el cas d’estudiar els viatgers entre dues ciutats, és possible modelitzar un nombre d’habitants de la ciutat destí superior al nombre d’habitants de la ciutat origen. Això suposaria una forta incongruència.
- No té en compte les possibles fluctuacions temporals dels desplaçaments.

A la vista de totes aquestes limitacions, Barabási proposa un model que anomena “*Radiation model*” que millora o elimina les limitacions del model gravitacional. Pren el nom de “*radiation*” degut al fet que aquest model té en compte també la població de la regió continguda en un cercle amb centre, l’origen dels desplaçaments i radi igual a la distància entre les dues localitzacions. El més destacable d’aquest model és que només necessita la distribució de la població i no necessita els històrics dels trajectes.

2.5.2 Objectius i hipòtesi

El consum d'energia elèctrica d'una població, un país o fins i tot un continent es relaciona amb el seu nombre d'habitants per extreure'n conclusions. Aquesta relació es pot expressar com a consum per càpita: la despesa mitjana d'energia elèctrica de cada habitant.

El consum d'energia elèctrica d'un habitatge, un comerç, una empresa, o qualsevol altre infraestructura que utilitzi aquesta energia, és enregistrat per un equip de mesura instal·lat en el punt de subministrament que la companyia proporciona al consumidor. Aquest aparell és propietat de la companyia elèctrica i les dades que proporciona són administrades per aquesta. El període de temps estàndard durant el qual es comptabilitza i es factura l'energia consumida sol ser d'un més. Per altra banda, les bases de dades que s'utilitzen per estudiar les evolucions dels consums energètics i treure'n conclusions a mig o llarg termini, solen ser anuals. El principal motiu és evitar distorsions que poden afectar als períodes curts, com per exemple, influències climàtiques degudes a l'estacionalitat, o períodes festius que alteren el comportament del consumidor. La suma de l'energia facturada a tots els consumidors de la regió que es vol estudiar, s'imputa al nombre de persones que estan al cens¹⁸ segons les bases de dades disponibles pels organismes governamentals competents. Això pot no ser correcte si es té en compte que els censos no reflecteixen exactament el nombre de persones que realment estan consumint energia. Els motius poden ser:

- a. Els censos poblacionals tenen moltes limitacions associades als hàbits de les persones, que posen en dubte la coincidència entre el nombre de persones censades i el nombre de persones que realment són residents. Les persones no sempre habiten en el lloc on estan censades. Els motius poden ser múltiples: oblit de realitzar les gestions de canvi d'empadronament¹⁹ o residència; no haver realitzat el canvi intencionadament per tal de reduir la pressió fiscal o impositiva ja que aquesta pot variar d'uns municipis o regions a altres; estades temporals en llocs diferents de la residència habitual; hi ha persones que estan inscrites en dos municipis alhora; les entrades d'immigració i moviments d'aquests entre municipis no es recullen correctament en els padrons (Devolder et al. 2006); etc.
- b. Les persones que es desplacen a una altra població per realitzar alguna activitat, consumeixen energia en aquesta població "destí", i no apareixen en els censos que s'utilitzen per estimar les ràtios de consum energètic. Els motius d'aquests desplaçaments poden ser molts, però potser, els més usuals i que tenen un major impacte per l'estudi que ens ocupa, són:

- 1 Per motius laborals deguts al fet que la localització del lloc de treball no està en la població en què es resideix.

¹⁸ El cens d'una regió o un país disposa de les dades dels habitants de tota la població. El cens es basa en el Padró Municipal tot i que en ocasions hi ha discrepàncies entre ambdós (Godenau et al. 2004, Jurado 2004)

¹⁹ El Padró Municipal d'habitants és un registre administratiu on consten els veïns d'un municipi. Correspon als Ajuntaments la seva creació, manteniment i revisió. En el cas d'Espanya, és el *Instituto de Estadística de España* qui coordina els padrons de tots els municipis. El padró municipal és la única font a partir de la qual s'obtenen xifres oficials de la població (INE, Instituto Nacional de Estadística) ; (Wikipedia)

- 2 Per motius comercials, deguts a que l'oferta comercial de la població, no cobreix les preferències dels seus habitants. En aquest sentit, l'especialització creixent de les empreses comercialitzadores i l'increment de grans centres comercials, augmenten cada vegada més el nombre de persones que es desplacen per aquest motiu.
- 3 Per motius d'oci en horari no laborable o dies festius.

Respecte els motius “a”, cal dir que les limitacions dels censos i padrons poden ser tan degudes al fet que l'administració es veu rebassada per la quantitat de dades a corroborar, com degudes a la falta de col·laboració ciutadana. En aquesta tesi no es proposa la correcció de les desviacions que es puguin donar en les xifres de població per aquestes causes. Tot i que no es coneixen estudis que les quantifiquin, en aquesta tesi es considera que l'impacte que poden tenir els motius “a” sobre els resultats que es persegueixen, el càlcul de l'energia elèctrica que consumeix un municipi, és sensiblement menys important que el que poden tenir els motius “b”. El fonament d'aquesta afirmació es basa en l'anàlisi dels motius d'ambdós tipus en les bibliografies ressenyades.

Degut als motius “b”, hi ha poblacions que per una o més de les raons descrites, actuen com a “atractors” de població. És a dir, atrauen persones de les poblacions veïnes i per tant, converteixen a aquestes en “emissors” de persones. És en aquest punt on els models gravitacionals ens poden ser d'ajuda. Segons s'ha exposat anteriorment, els models gravitacionals aplicats als desplaçaments de les persones, poden estimar el nombre d'individus que es mouen d'una població a una altra (Zipf 1949). En apartats precedents s'han trobat relacions al·lomètriques entre el nombre d'habitants d'un conjunt de poblacions i el seu consum d'energia elèctrica. Es proposa ara, trobar una expressió basada en els models gravitacionals amb l'objectiu de millorar els models al·lomètrics obtinguts. L'expressió ens ha de permetre corregir les desviacions del nombre d'habitants de cada població a causa dels motius “b” citats més amunt. S'espera que aquesta correcció redundi en una millora de l'ajust de la funció potencial dels models al·lomètrics.

2.5.3 Metodologia

El mètode que s'utilitzarà és exploratori i consisteix a assajar diferents expressions sobre una mostra real. S'ha vist que els exponents dels paràmetres d_{ij} , P_i i P_j de l'equació 2.26 poden variar, i que cal trobar-los assajant diferents opcions sobre la mostra de la que es vol obtenir el model (Jung et al. 2008, Krings et al. 2009).

2.5.4 Cas d'estudi (Ib): La comunitat autònoma d'Andalusia

La zona geogràfica on s'aplicarà el model gravitacional correspon a la Comunitat Autònoma d'Andalusia, amb la que s'ha estat treballant amb els models al·lomètrics (Apartat 2.4). Aquesta regió té 768 poblacions recollides a les bases de dades del *Sistema de Informació Multiterritorial de Andalusia SIMA*, del *Instituto de Estadística de Andalucía*²⁰. Les poblacions i les capitals de província es distribueixen sobre el territori segons es mostra a la Figura 2.18.

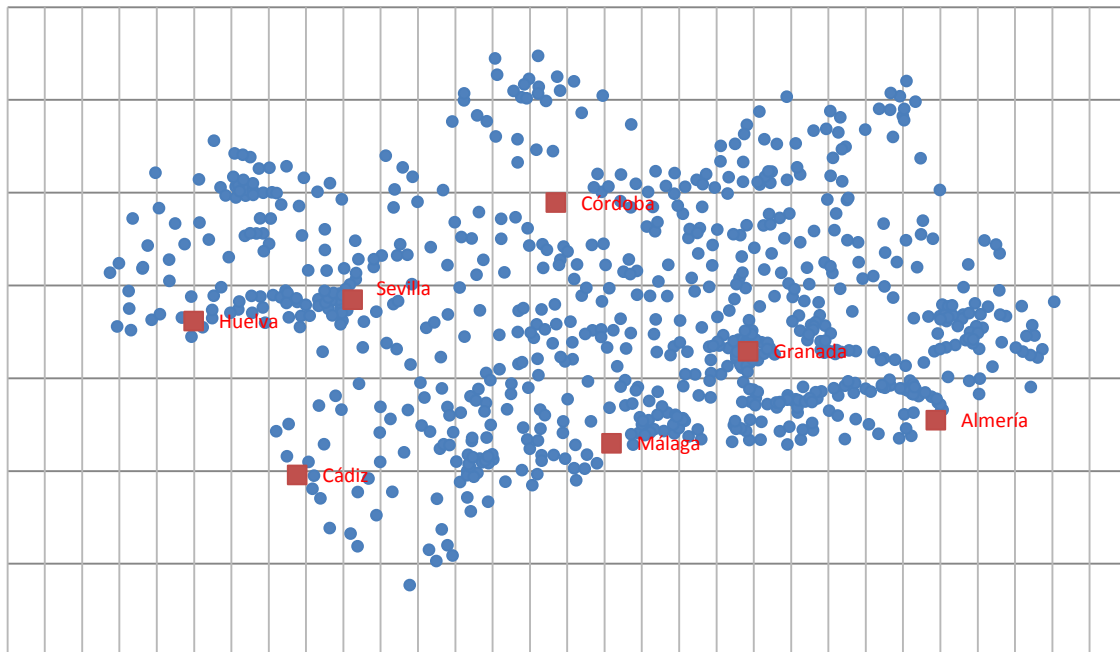


Figura 2.18 Cas d'estudi Ib: Situació relativa de les 768 poblacions de l'estudi ubicades en la Comunitat Autònoma d'Andalusia. Els quadrats vermells corresponen a les capitals de província. (Font: Pròpia a partir de posicionament geogràfic en un full de càlcul Excel)

Per aplicar els models gravitacionals s'ha considerat que les persones que es desplacen d'un lloc a un altre i consumeixen energia són un factor que provoca diferències de consum d'energia per càpita entre regions. L'equació general del model gravitacional que s'ha utilitzat en aquest cas d'estudi és l'equació 2.28.

$$F_i = G \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^\alpha} \quad 2.28$$

On F_i és el resultat de la funció gravitacional per la població i (adimensional) i que representa la *força d'atracció* de persones entre la població i i la resta de poblacions de la regió estudiada; d_{ij} és la distància euclidiana entre les poblacions i i j (Figura 2.19) en [m]; G en [$\text{hab}^2/\text{m}^\alpha$] i α (adimensional) són constants

²⁰ (Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo)

que depenen del model utilitzat; P és el número d'habitants de les poblacions de l'estudi (a la Taula 2.10 es mostra la seva distribució). S'ha associat a cada població i el corresponent valor de la funció gravitacional F_i

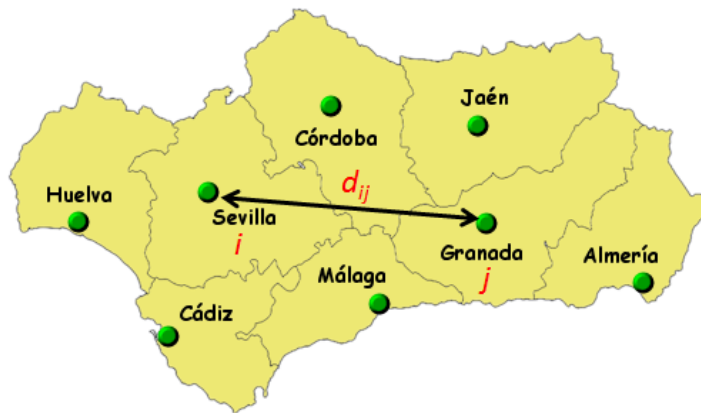


Figura 2.19 Cas d'estudi Ib: Delimitació de la zona geogràfica corresponent a la Comunitat Autònoma d'Andalusia, les províncies i la situació de les seves capitals. Es mostra la distància " d_{ij} " utilitzada a la fórmula 2.28 que correspon a la distància euclidiana entre les poblacions i i j (Font: Red Andaluza de Aerobiología²¹)

Poblacions amb menys de 1.000 habitants	191
Poblacions entre 1.000 i 5.000 habitants	334
Poblacions entre 5.000 i 10.000 habitants	109
Poblacions entre 10.000 i 50.000 habitants	110
Poblacions entre 50.000 i 100.000 habitants	12
Poblacions entre 100.000 i 200.000 habitants	8
Poblacions entre 200.000 i 500.000 habitants	2
Poblacions amb més de 500.000 habitants	2

Taula 2.10 Cas d'estudi Ib: Distribució del nombre d'habitants de les poblacions d'Andalusia. La major part de les poblacions de l'estudi tenen entre 1.000 i 5.000 habitants. Només 24 de les 768 poblacions tenen més de 50.000 habitants. Són justament aquestes poblacions les que segons els models gravitacionals tenen més capacitat d'atreure persones d'altres poblacions (Eq. 2.27).

En aquest exemple, amb 768 poblacions, l'ús de l'equació 2.28 suposa manipular un nombre elevat de dades i calcular un volum important d'operacions (Taula 2.11)

²¹ <http://www.uco.es/raa/> [Consulta: 20 de gener de 2013]

Nombre de poblacions	768
Nombre de distàncies a calcular	294.144
Nombre d'operacions a realitzar per calcular un model gravitacional (2.28)	2.064.384
Nombre d'operacions realitzades	49.545.216

Taula 2.11 Cas d'estudi Ib: Resum de dades manipulades per aplicar el model gravitacional al cas d'Andalusia. La última fila de la taula correspon al nombre d'operacions que s'han realitzat per obtenir els models presentats a la Figura 2.20 i la Figura 2.21

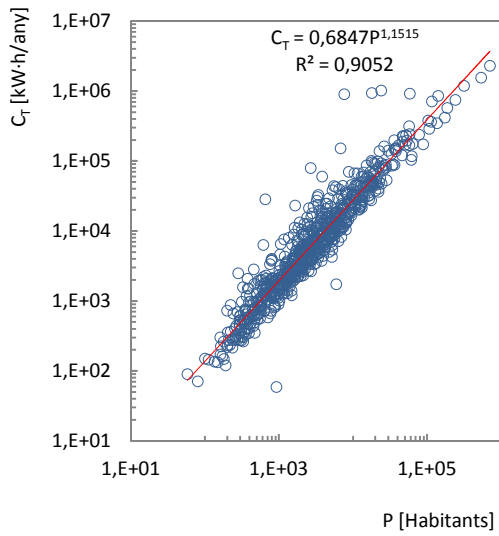
S'han estudiat diferents exponents de les variables d_{ij} , P_i i P_j per l'equació 2.28. Les equacions 2.29 a 2.31 són les que han donat els resultats estadístics més satisfactoris (Taula 2.12 i Taula 2.13).

$$F_1(i) = 10^{10} \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^4} \quad 2.29$$

$$F_2(i) = \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^2} \quad 2.30$$

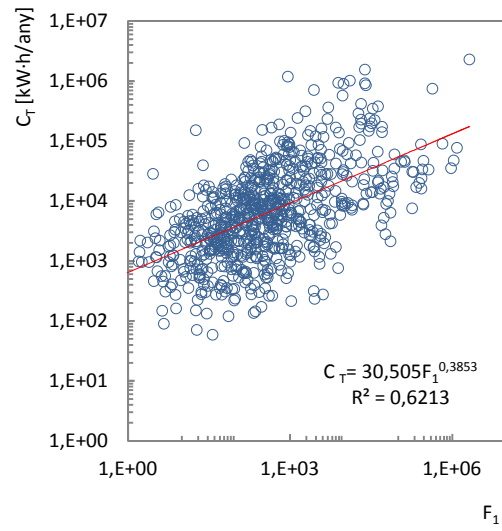
$$F_3(i) = \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^1} \quad 2.31$$

Els resultats obtinguts d'aquestes equacions s'han utilitzat per obtenir les relacions al·lomètriques pels diferents consums d'energia elèctrica analitzats en apartats anteriors: total, industrial, residencial, comercial, agricultura, serveis i administració. En fer-ho es busca un possible comportament al·lomètric entre aquesta força d'atracció F_i i els consums enregistrats a cada població, que pugui explicar l'origen dels comportaments al·lomètrics observats en els apartats anteriors. Es mostren a la Figura 2.20 i la Figura 2.21 els casos del consum total C_T i del residencial C_{Res} . La resta de consums no s'analitzen pels motius argumentats al punt 2.5.5.



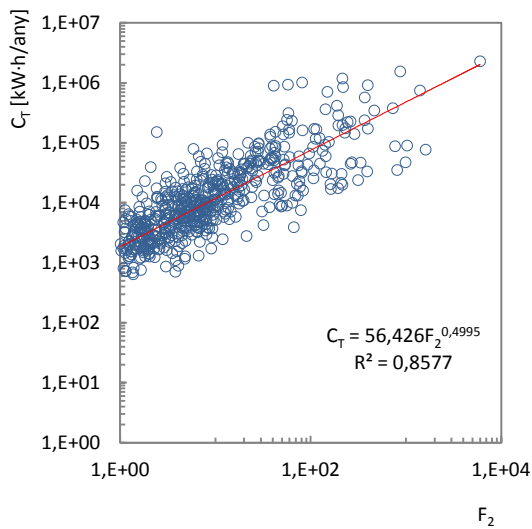
$Log C_T = f(LogP)$

a



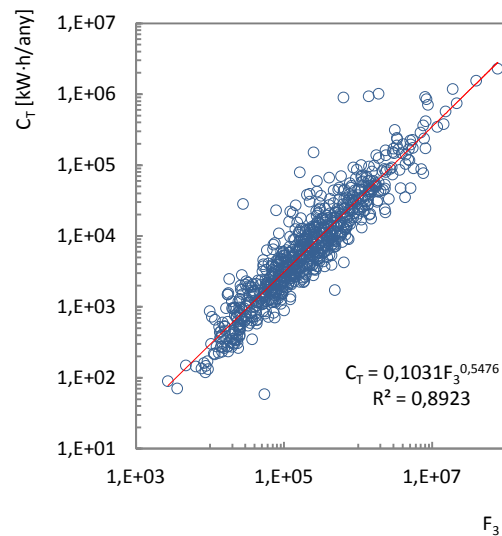
$Log C_T = f(LogF_1)$

b



$Log C_T = f(LogF_2)$

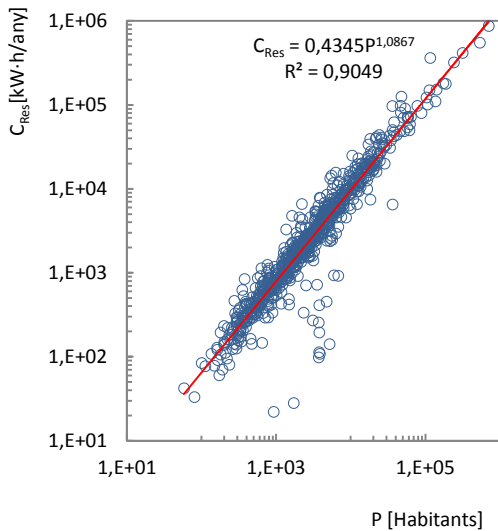
c



$Log C_T = f(LogF_3)$

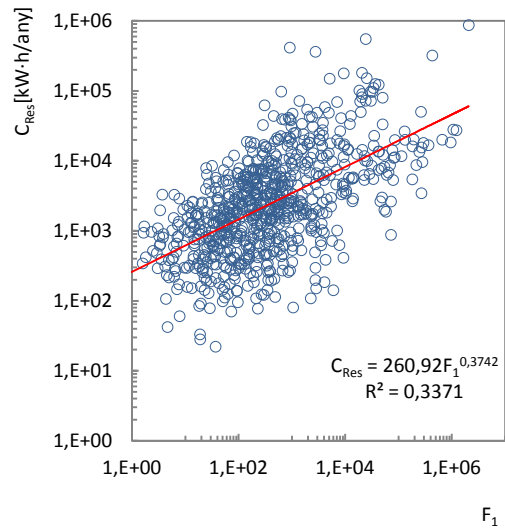
d

Figura 2.20 Cas d'estudi Ib: Relacions al·lomètriques (I). a- Es mostra la relació al·lomètrica $C_T=f(P)$ entre el consum total d'energia C_T i el nombre d'habitants P de cada població estudiada; b, c, d- Aquests tres gràfics corresponen a les relacions al·lomètriques entre el consum total d'energia C_T i els valors de població obtinguts dels models gravitacionals F_1 , F_2 i F_3 de les equacions 2. 29 a 2. 31. S'han inclòs línies de tendència potencial (rectes en vermell) a cada relació al·lomètrica, amb les corresponents equacions i coeficients de determinació.



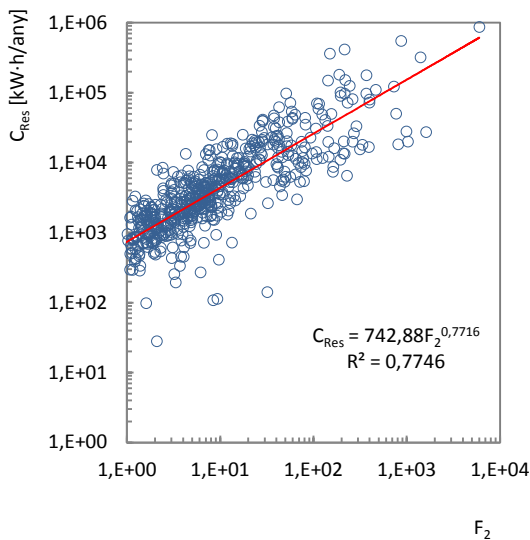
$$\text{Log } C_{Res} = f(\text{Log}P)$$

a



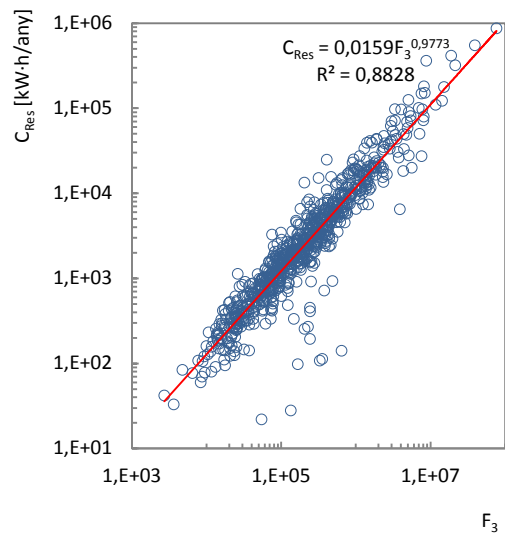
$$\text{Log } C_{Res} = f(\text{Log}F_1)$$

b



$$\text{Log } C_{Res} = f(\text{Log}F_2)$$

c



$$\text{Log } C_{Res} = f(\text{Log}F_3)$$

d

Figura 2.21 Cas d'estudi Ib: Relacions al·lomètriques (II). a- Es mostra la relació al·lomètrica $C_{Res}=f(P)$ entre el consum d'energia residencial C_{Res} i el nombre d'habitants P de cada població estudiada; b, c, d- Aquests tres gràfics corresponen a les relacions al·lomètriques entre el consum d'energia residencial C_{Res} i els valors de població obtinguts dels models gravitacionals F_1 , F_2 i F_3 de les equacions 2. 29 a 2. 31. S'han inclòs línies de tendència potencial (rectes en vermell) a cada relació al·lomètrica, amb les corresponents equacions i coeficients de determinació.

Gràfic	Valors de la regressió	Model gravitacional utilitzat	$Y = kX^\beta$		
			Paràmetre	Valor de la regressió	Interval de confiança 95%
Figura 2.20a	$R^2 = 0,9052$ $S_{yx} = 0,232$	no	k	0,6847	0,5536-0,8468
Figura 2.20b	$R^2 = 0,6213$ $S_{yx} = 0,464$	$F_1(i) = 10^{10} \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^4}$	β_a	1, 1515	1,1250-1,1779
			k	30,5048	22,5131-41,3330
Figura 2.20c	$R^2 = 0,8577$ $S_{yx} = 0,284$	$F_2(i) = \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^2}$	β_b	0,3853	0,3640-0,4066
			k	56,4261	48,8882-65,1262
Figura 2.20d	$R^2 = 0,8923$ $S_{yx} = 0,247$	$F_3(i) = \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^1}$	β_c	0,4995	0,4850-0,5139
			k	0,1031	0,0784-0,1356
			β_d	0,5476	0,5341-0,5611

Taula 2.12 Cas d'estudi Ib: Dades estadístiques característiques de les regressions de la Figura 2.20, on R^2 és el coeficient de determinació, S_{yx} és l'error estàndard d'estimació, k i β els coeficients de la recta de regressió Y obtinguda. No es presenten els p-valors associats de la funció t d'Student per ser aproximadament zero en tots els casos.

Gràfic	Valors de la regressió	Model gravitacional utilitzat	$Y = kX^\beta$		
			Paràmetre	Valor de la regressió	Interval de confiança 95%
Figura 2.21 a	$R^2 = 0,9049$ $S_{yx} = 0,219$	no	k	0,4345	0,3554-0,5312
Figura 2.21 b	$R^2 = 0,3371$ $S_{yx} = 0,579$	$F_1(i) = 10^{10} \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^4}$	β_a	1,0867	1,0617-1,1117
			k	260,92	205,60-331,12
Figura 2.21 c	$R^2 = 0,7746$ $S_{yx} = 0,338$	$F_2(i) = \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^2}$	β_b	0,3742	0,3370-0,4114
			k	742,88	692,27-797,20
Figura 2.21 d	$R^2 = 0,8828$ $S_{yx} = 0,244$	$F_3(i) = \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^1}$	β_c	0,7716	0,7421-0,8012
			k	0,0159	0,0117-0,0217
			β_d	0,9772	0,9520-1,0025

Taula 2.13 Cas d'estudi Ib: Dades estadístiques característiques de les regressions de la Figura 2.21, on R^2 és el coeficient de determinació, S_{yx} és l'error estàndard d'estimació, k i β els coeficients de la recta de regressió Y obtinguda. No es presenten els p-valors associats de la funció t d'Student per ser aproximadament zero en tots els casos.

El resultat de les regressions presentades més amunt mostren diferències importants de comportaments al·lomètrics. Si es comparen els exponents β de les relacions al·lomètriques obtingudes a partir de la funció gravitacional (β_b , β_c i β_d de la Taula 2.12 i la Taula 2.13) amb l'exponent de l'escalatge obtingut a partir de la població (β_a) es poden deduir pautes de consum molt diferents:

- Consums totals d'energia elèctrica C_T (Figura 2.20 i Taula 2.12)
 - El fet que l'exponent de l'escalatge β_a tingui un valor superior a la unitat ens diu que el comportament del consum és superlineal (Apartat 2.1.3), i per tant, a un increment de la població d'una ciutat, li correspon un increment del consum per càpita. Contràriament β_b , β_c i β_d són clarament sublineals, indicant justament el contrari, com més gran és el nombre d'habitants menor consum per càpita els correspon. Es pot veure als valors de la

taula, que un augment de l'exponent de la distància d entre les ciutats, comporta una disminució de l'exponent β . Una possible interpretació, és que a mesura que les ciutats s'allunyen entre sí, disminueix el desplaçament de persones entre aquestes. Aquesta disminució es tradueix òbviament en un nombre menor de persones que consumeixen energia a altres municipis diferents del municipi on resideixen i consegüentment repercuteix en un decreixement del consum total C_T de l'energia dels municipis “destí”. Dos dels motius comuns dels desplaçaments són, el de les persones que treballen fora del municipi on resideixen, i el de les que ho fan per motius comercials. Ambdós motius comporten un menor consum als seus municipis i un major consum als municipis “destí”.

- Consums d'energia elèctrica C_{Res} (Figura 2.21 i Taula 2.13)
 - L'exponent β disminueix a mesura que augmenta l'exponent de la distància d del model gravitacional. Es dona d'una manera similar al cas comentat més amunt del consum total de la Figura 2.20, ara bé, en el consum residencial els valors de la β són més alts, apropant-se a la unitat en al cas de β_d , com en el cas al·lomètric simple β_a . Això indica que el comportament no és tan marcadament sublineal. Els motius comuns de desplaçaments comentats al punt anterior, el laboral i el comercial, probablement no influiran, o ho faran en poca mesura en el consum de l'energia dels habitatges del municipi destí, o del municipi origen. Per una banda, el temps de permanència a les llars pot ser similar tant si es treballa al mateix municipi com si es fa en un altre. En tot cas les petites diferències es poden donar degut a un temps superior fora de la residència, que es dedica al desplaçament. Per una altra banda, el fet d'anar a un altre municipi per motius laborals o comercials no implicarà un augment del consum residencial al municipi destí.
- Els estadístics R^2 i S_{yx} tant del consum total C_T com del consum residencial C_{Res} mostren que a mesura que creix l'exponent de la distància d , empitjora la qualitat de la regressió. Els valors especialment baixos de R^2 del cas d^d indiquen que les respectives regressions no són estadísticament massa fiables. L'augment de l'error estàndard d'estimació S_{yx} quan augmenta l'exponent de la distància d , assenyalava que la dispersió dels valors observats al voltant de la línia de regressió també augmenta, tal i com es pot comprovar observant els gràfics de la Figura 2.20 i la Figura 2.21. La observació dels gràfics permet alhora visualitzar una major dispersió en valors elevats de F_i pels gràfics “b” i “c” i una menor dispersió per valors elevats de F_i pels gràfics “d”. La interpretació d'aquest fet no s'ha pogut aclarir suficientment i es proposa com a qüestió pendent per una recerca futura (veure apartat següent).

2.5.5 Problemes d'implementació. Propostes de recerca futura

En aquesta tesi, s'ha estat treballant amb models gravitacionals al llarg d'un període de temps remarcable, amb l'objectiu d'aconseguir millorar els resultats obtinguts amb els models al·lomètrics. Durant el

període de temps en què s'estaven analitzant els resultats exposats en el punt anterior es va tenir coneixement de la publicació de l'article "*A Universal Model for Mobility and Migration*" de l'equip de László Barabási (Simini et al. 2012) en què posa de manifest certes limitacions de l'aplicació dels models gravitacionals (comentades a la part introductòria del punt 2.5). Les conclusions presentades en aquest article, han estat el motiu principal per decidir posposar per a un futur, la recerca en aquesta direcció. També hi ha altres motius propis del present estudi:

- En l'apartat anterior s'han presentat els resultats gràfics de les funcions gravitacionals aplicades al consum total d'energia elèctrica i al consum del sector residencial de les poblacions d'Andalusia. Tot i que la resta de sectors (agricultura, indústria, administració i serveis) també s'han estudiat i analitzat detingudament aplicant funcions gravitacionals, no s'han presentat els resultats ni el seu anàlisi, degut al fet que no presenten prou consistència estadística.
- Els motius pels quals les persones es traslladen d'una població a una altra, poden afectar de diferent manera al consum d'energia elèctrica que aquestes fan en les poblacions "destí". Així, per exemple, els moviments per motius laborals tenen un gran impacte en el consum d'energia del sector industrial de les poblacions receptores, augmentant-lo, i per tant també influeixen en el consum total. Per contra, els moviments per motius comercials tenen un impacte molt menor. Els models gravitacionals no distingeixen els motius dels desplaçaments de les persones, i per tant, no poden explicar satisfactòriament les conseqüències energètiques d'aquests desplaçaments. Caldria incorporar una variable al model que corregís aquest fet.
- Per aplicar els models gravitacionals a una regió, cal delimitar-la geogràficament, establint unes fronteres. L'estudi es restringeix a les poblacions que hi ha a l'interior de la frontera, tenint en compte els seus habitants i les respectives distàncies. En deixar excloses les poblacions de l'exterior de la frontera es comet un error evident: aquestes poblacions també influeixen com atractors o emissors de persones en les poblacions veïnes dins la frontera. Atès que la distància d és una variable que influeix d'una manera important en el model (Eq.2.28), caldria incloure a l'estudi les poblacions situades a una certa distància més enllà de les fronteres definides inicialment, proposant una nova frontera (Figura 2.22). Caldria cercar noves variables que permetessin situar aquesta segona frontera atenent a la influència de les poblacions situades entre ambdues fronteres.

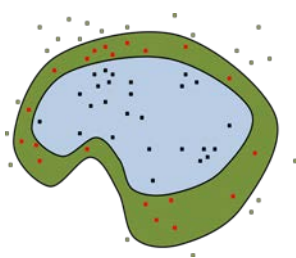


Figura 2.22 Proposta de regions d'estudi per aplicar models gravitacionals. La zona de color blau conté les poblacions (punts negres) objecte de l'estudi. La zona verda conté les poblacions (punts vermells) que es considerarien que poden influir com a atractors o emissors de persones a les poblacions de la zona blava. Els punts verds són les poblacions que estan fora d'ambdues fronteres i que no es considerarien en l'estudi. (Font: Pròpia)

- L'aplicació de l'al·lometria, ha permès trobar expressions que relacionen el consum d'energia elèctrica d'una població, amb el seu nombre d'habitants (Apartat 2.1.3). Les regressions obtingudes en aquests models, a partir de rectes de tendència potencial, tenen coeficients de determinació més elevats que les obtingudes amb els models gravitacionals. Aquest fet, obliga a replantejar la utilitat dels models gravitacionals pel que fa als objectius d'aquesta tesi.
- Per tal d'aplicar d'una manera més fiable el concepte de model gravitacional caldria disposar de les dades de mobilitat entre poblacions de la regió que s'està estudiant (Simini et al. 2012). Actualment no es disposa d'aquestes dades per la regió d'Andalusia.

2.6 Resum

Es presenten a continuació a mode de síntesi, els nuclis conceptuals més importants tractats en aquest capítol, així com les conclusions més rellevants:

- Les lleis d'escala observades en biologia es donen en moltes formes de vida diferents, mamífers, aus, rèptils, organismes unicel·lulars o plantes, i presenten una universalitat que ens està dient quelcom important respecte el camí que segueix la vida per desenvolupar-se segons les restriccions físiques que l'envolten. Actualment no hi ha cap teoria general plenament acceptada que expliqui l'origen d'aquestes lleis d'escala. Amb l'objectiu d'explicar els exponents d'aquestes lleis, s'han proposat relacions entre l'estructura de les xarxes que transporten els fluids i l'energia en els organismes, com poden ser el sistema circulatori i respiratori, i els exponents d'escala observats. És cert que hi ha diferències entre una producció natural (p. e. la xarxa del sistema vascular en els mamífers) i una producció artificial (per exemple una xarxa elèctrica), però ambdues estan subjectes a les mateixes lleis físiques. Això ens ha de fer reflexionar respecte si les produccions humanes han d'imitar o no a les naturals segons els objectius perseguits i la manera d'assolir-los.

- Recents estudis evidencien els fenòmens emergents de les aglomeracions humanes resultat de les seves dinàmiques socials i interaccions no lineals, mostrant que moltes variables urbanes segueixen aproximadament simples lleis potencials no lineals. En aquest context, l'estudi dels sistemes de distribució d'energia elèctrica, carburants, medicaments i aliments, mostra que es compleixen lleis potencials quan es relaciona el nombre d'estacions o punts de proveïment respecte el nombre d'habitants. En aquest capítol s'ha estudiat el cas del consum d'energia elèctrica de regions que contenen des de grans ciutats de centenars de milers d'habitants a petites poblacions d'uns pocs veïns.
- Els resultats del cas d'estudi presentat en aquest capítol, ens diu que els consums elèctrics totals dels municipis tenen associat un coeficient al·lomètric lleugerament superior a la unitat ($\beta=1,08$), i per tant, podem dir que escala superlinealment. Resultats similars ja els hem observat en estudis al·lomètrics d'altres investigadors. El que no s'ha fet abans és analitzar els sectors econòmics per separat. En aquest capítol s'ha fet un estudi al·lomètric per a cada sector, i els resultats de fer-ho mostren que el comportament pot ser diferent segons el sector analitzat. Els sectors residencial i administratiu escalen quasi linealment ($\beta=1,06$ i $\beta=0,98$ respectivament), mentre que els sectors serveis i industrial escalen clarament superlinealment ($\beta=1,25$ i $\beta=1,30$ respectivament) i el sector agricultura ho fa sublinealment ($\beta=0,95$). Els coeficients de determinació R^2 obtinguts, mostren que en el cas dels sectors industrial i agricultura hi ha una baixa qualitat del model. En el punt 2.4 es fa una exploració dels possibles motius dels valors dels coeficients al·lomètrics de cada sector i del baix valor d'alguns coeficients de determinació.
- Un estudi detallat de l'evolució temporal de l'exponent al·lomètric pot aportar informació rellevant sobre els sectors econòmics, les províncies, o les poblacions. Els resultats obtinguts suggereixen que les lleis de potència que escalen amb la grandària de la població, depenen d'altres factors exògens com poden ser, la localització geogràfica i el consum segons sigui el sector econòmic, en comptes de factors endògens, com poden ser, una xarxa de transport i/o distribució no òptima.
- La formulació dels models gravitacionals s'ha utilitzat en nombrosos estudis que pretenen descriure determinats tipus d'interaccions entre regions, com per exemple el transport de viatgers o mercaderies, les xarxes de carreteres o les xarxes de comunicació de telefonia. En aquesta tesi es proposa l'aplicació dels models gravitacionals a diferents zones geogràfiques que es relacionen entre si, i posteriorment utilitzar un anàlisi al·lomètric per esbrinar com pot afectar al consum elèctric d'una població el moviment diari de les persones entre diferents poblacions. El resultat de les regressions presentades en el cas d'estudi mostren diferències importants de comportaments al·lomètrics amb i sense l'ús dels models gravitacionals. Entre d'altres causes, s'apunta com a rellevant el fet que a mesura que les ciutats s'allunyen entre sí, disminueix el desplaçament de

persones entre aquestes. Aquesta disminució es tradueix òbviament en un nombre menor de persones que consumeixen energia a altres municipis diferents del municipi on resideixen i conseqüentment repercuteix en un decreixement del consum total de l'energia dels municipis "destí". Cal tenir en compte que els models gravitacionals tenen limitacions importants que s'exposen i analitzen en l'apartat 2.5.5.

2.7 Bibliografia

Arcaute, E., et al. City boundaries and the universality of scaling laws. 2013, vol. eprint arXiv:1301.1674.

Ball, P. *Critical Mass, How One Thing Leads to Another*. London: Arrow Books, 2005. ISBN 0099457865.

Batty, M.; and Kim, K. S. Form follows function reformulating urban population density functions. *Urban Studies* . 1992, vol. 29(7), p. 1043-1070 .

Batty, M.; and March, L. The method of residues in urban modelling. *Environment and Planning* . 1976, vol. 8(2), p. 189-214 .

Bettencourt, L. M. A., et al. Urban Scaling and Its Deviations: Revealing the Structure of Wealth, Innovation and Crime across Cities. *Pols One* . 2010-a, no. 5(11).

Bettencourt, L. M. A.; and West, G. B. Bigger cities do more with less. *Scientific American* . 2011,.

Bettencourt, L. M. A.; and West, G. B. A unified theory of urban living. *Nature* . 2010-b, vol. 467, p. 912-913 .

Bettencourt, Luis M. A., et al. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *P. Natl. Acad. Sci. USA* . 2007, vol. 104, no. 17, p. 7301-7306 .

Clauset, A.; Rohilla, C. and Newman, M. E. J. Power law distributions in empirical data. *Siam Review* . 2009, vol. 51, no. 4, p. 661-703 .

Corning, Peter A. The re-emergence of "emergence": A venerable concept in search of a theory. *Complexity* . 2002, vol. 7, no. 6, p. 18-30 .

Davies, W. Urban connectivity in montana. *The Annals of Regional Science* . 1979, vol. 13, no. 2, p. 29-46 .

Devolder, D., Gil, F. and Forte, P. Estimación del grado de error en el registro de la población extranjera en España. Un enfoque comparativo [en línia]. 2006. [Consulta: 24 gener 2013]. Disponible a: <http://www.ced.uab.es/publicacions/PapersPDF/Text309.pdf>.

Dodman, D. Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories. *Environment and Urbanization* . 2009, vol. 21, no. 1, p. 185-201 .

Gabaix, X. Zipf's Law and the Growth of Cities. *The American Economic Review* . 1999, vol. 89, no. 2, Papers and Proc. of the One Hundred Eleventh Annual Meeting of the American Economic Association, p. 129-132 .

Gallagher, R.; and Appenzeller, T. Beyond Reductionism. *Science* . 1999, vol. 284, no. 5411, p. 79-79 .

- Godenau, D. and Arteaga, S. Fiabilidad de las Cifras Censales y Padronales en Canarias [en línia]. 2004. [Consulta: 15 juliol 2013]. Disponible a: <<http://dgodenau.webs.ull.es/pdf/Godenau030704.pdf>>.
- Goldstein, J. Emergence as a Construct: History and Issues. *Emergence* . 1999, vol. 1, no. 1, p. 49-72 .
- Gribbin, J. *Deep Simplicity. Chaos, Complexity and the Emergence of Life*. England: Penguin Books, 2005. ISBN 978-0-141-00722-9.
- Horta, R.; Rosas, M. and Valverde, S. Discerning electricity consumption patterns from urban allometric scaling. *Complexity in Engineering Conference* . 2010,.
- INE, Instituto Nacional de Estadística. Padrón Municipal. Metodología [en línia]. [Consulta: 20 gener 2013] Disponible a: <<http://www.ine.es/metodologia/t20/t203024566.htm#pad>>.
- Isalgue, A.; Coch, H. and Serra, R. Scaling laws and the modern city. *Physica A* . 2007, vol. 382, no. 2, p. 643-649 .
- Jung, W.; Wang, F. and Stanley, H. Gravity model in the Korean highway. *EPL-Europhysics Letters* . 2008, vol. 81, no. 4, p. 48005 .
- Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo. Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía (SIMA) [en línia]. [Consulta: 20 gener 2012] Disponible a: <<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/index2.htm>>.
- Jurado, A. Diferencias entre censo de población y padrón municipal. *Índice. Revista De Estadística y Sociedad* . 2004, no. 3, p. 12.
- Kaluza, P., et al. The complex network of global cargo ship movements. *Journal of the Royal Society Interface* . 2010, vol. 7, no. 48, p. 1093-1103 .
- Kleiber, M. Body size and metabolic rate. *Physiol. Rev* . 1947, vol. 27, p. 511-541 .
- Kleiber, M. Body size and metabolism. *Hilgardia* . 1932, vol. 6, p. 315-351 .
- Krings, G., et al. Urban Gravity: a Model for Intercity Telecommunication Flows. *Journal of Statistical Mechanics* . 2009,.
- Kühnert, C.; Helbing, D. and West, G. B. Scaling laws in urban supply networks. *Physica A* . 2006, vol. 363, no. 1, p. 96-103 .
- La caixa. *Anuario Económico De España*. La Caixa ed. Barcenola: , 2012.
- Lämmer, S.; Gehlsen, B. and Helbing, D. Scaling laws in the spatial structure of urban road networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* . 2006, vol. 363, no. 1, p. 89-95 .
- Lewin, R. *Complexity. Life at the Edge of Chaos*. New York: Collier Books, 1993. ISBN 0020147953.
- Marrewijk, V. Zipf's Law [en línia]. [Consulta: Desembre 2012] Disponible a: <<http://www.oup.com/uk/orc/bin/9780199280988/01student/zipf/>>.
- Marshall, J. D. Urban land area and population growth: a new scaling relationship for metropolitan expansion. *Urban Studies* . 2007, vol. 44, no. 10, p. 1889-1904 .

- Pisarenko, V. F.; and Sornette, D. Robust statistical tests of Dragon-Kings beyond power law distributions. *The European Physical Journal Special Topics* . 2012, vol. 205, p. 95-115 .
- Rico, Ó. A. Análisis gravitacional de la movilidad de pasajeros en la red de transporte aéreo doméstico en México [en línia]. México, 2008.
- Savage, V. M.; Deeds, E. J. and Fontana, W. Sizing Up Allometric Scaling Theory. *Plos. Comput. Biol.* . 2008, vol. 4, no. 9, p. e1000171 .
- Simini, F., et al. A universal model for mobility and migration patterns. *Nature* . 2012, vol. 484, no. 7392, p. 96-100 .
- Solé, R. *Xarxes Complexes*. Barcelona: Biblioteca Universal Empúries, 2009. ISBN 8497874013.
- Sornette, D.; and Ouillon, G. Dragon-Kinds: mechanisms, statistical methods and empirical evidence. *The European Physical Journal Special Topics* . 2012, vol. 205, p. 53-64 .
- UN, United Nations. Word Urbanization Prospects: The 2012 Revision [en línia]. 2012.
- West, G. B. The origin of universal scaling laws in biology. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* . 1999, vol. 263, no. 1-4, p. 104-113 .
- West, G. B.; and Brown, J. H. The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization. *The Journal of Experimental Biology* . 2005, vol. 208, no. 9, p. 1575-1592 .
- West, G. B.; Brown, J. H. and Enquist, B. J. A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology. *Science* . 1997, vol. 276, no. 5309, p. 122-126 .
- West, G. B.; Woodruff, W. H. and Brown, J. H. Allometric scaling of metabolic rate from molecules and mitochondria to cells and mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* . 2002, vol. 99, no. Suppl 1, p. 2473-2478 .
- Wiesenfeld, K. Resource Letter: ScL-1: Scaling laws. *American Journal of Physics* . 2001, vol. 69, no. 9, p. 938-942 .
- Wikipedia. Padrón municipal de habitantes [en línia]. [Consulta: 11 gener 2013] Disponible a: http://es.wikipedia.org/wiki/Padr%C3%B3n_municipal_de_habitantes.
- Wikipedia. Self Organization [en línia]. [Consulta: 18 desembre 2012] Disponible a: <http://en.wikipedia.org/wiki/Self-organization>.
- Xiaowu Zhu, et al. Scaling Law between Urban Electrical Consumption and Population in China. *Complex Science* . 2009, vol. Springer Berlin Heidelberg, p. 853-864 .
- Yorke, E. D. Energy Cost and Animal Size. *American Journal of Physics* . 1973, vol. 41, no. 11, p. 1286-1287 .
- Young, A. A. Increasing Returns and Economic Progress. *The Economic Journal* . 1928, vol. 38, p. 527 .
- Zipf, G. K. *Human Behavior and the Principle of Least Effort: An Introduction to Human Ecology*. Oxford: Addison-Wesley Press, 1949.

3 Complexitat estructural

3.1 Estat de la qüestió

Des d'un punt de vista essencialment estructural, la vida que ens envolta és una mostra permanent de múltiples i diferents tipus de sistemes que prenen una organització en forma de xarxa per desenvolupar-se i funcionar. Exemples en serien *Internet*, la *World Wide Web*, xarxes socials entre coneguts, xarxes de relacions comercials entre corporacions, xarxes neurals, metabòliques, alimentàries, de distribució de matèria i/o energia, com els conductes sanguinis, les rutes d'enviament de correu postal, aèries, per carretera o les de transport de l'energia elèctrica. El món que coneixem es desenvolupa a partir de xarxes humanes, socials, culturals i econòmiques cada cop més i més complexes que permeten posar en contacte la infinitat d'aspectes que el caracteritzen (Solé 2009).

Una xarxa es forma a partir de les interrelacions i els patrons de connexió entre els diferents elements que la formen, i sembla clar, almenys intuïtivament, que l'estructura d'aquestes xarxes ha d'afectar la dinàmica de les transaccions existents entre els seus elements. Per tant, qualsevol teoria que intenti explicar com es desenvolupen aquestes relacions i que ignori l'estructura que les recolza serà del tot incompleta i pot, segurament, ignorar aspectes realment decisius. És per això, que al llarg dels últims deu anys, una quantitat cada cop més elevada de científics ha centrat el seu treball en la investigació de xarxes de tot tipus, en un esforç per entendre i explicar els efectes del seu funcionament.

3.1.1 Xarxes complexes

L'estudi de les xarxes contempla, en general, tres fases essencials (Newman 2003). La primera és la de l'obtenció de les dades empíriques necessàries per a la seva caracterització. En aquesta fase s'utilitzen tècniques que van des dels qüestionaris i les entrevistes (xarxes socials) a l'observació directa dels elements o la cerca en bases de dades, mapes, arxius, etc. de la informació necessària. L'objectiu d'aquesta fase és el de la formació d'una imatge de les connexions entre els elements com la que es mostra a la Figura 3.1.

Un cop hom ha aconseguit definir aquesta imatge, la segona fase ha de permetre respondre a preguntes relacionades amb la comunitat que la xarxa representa utilitzant anàlisis matemàtica o estadística. En aquest moment es poden respondre preguntes com quins són els elements més centrals i quins els més perifèrics (donada, si és que pot existir, una definició de centralitat en una xarxa, és clar) o quines de les connexions existents són les més crucials alhora de mantenir la connectivitat del conjunt. A la llum de les dades empíriques i de l'anàlisi quantitativa d'aquestes, la tercera i última fase ha de permetre

l'establiment de models dels processos que esdevenen a la xarxa en estudi. Aquest treball de modelització ens permetrà fer prediccions del comportament dels elements de la xarxa com a funció dels paràmetres que els poden afectar.

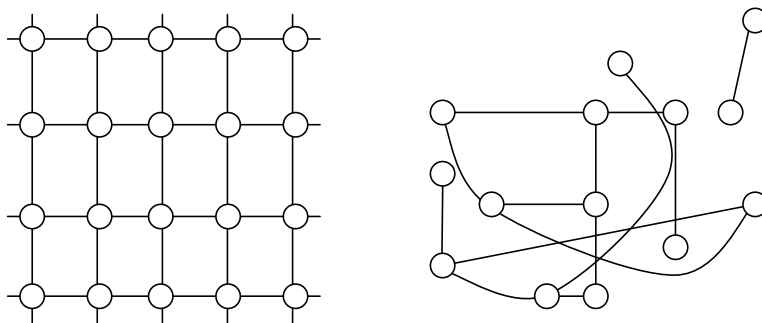


Figura 3.1 Extrems estructurals: xarxa regular connexa (o malla), esquerra; xarxa aleatòria no connexa, dreta

L'estudi de les xarxes en forma de teoria de grafs és un dels blocs de coneixement fonamentals de la matemàtica discreta. La solució al problema dels "Ponts de Königsberg" proposada per Euler el 1735 se'n considera l'inici, però no és fins a finals dels anys 1990, i afavorit en part per l'augment en la potència de càlcul dels ordinadors i la possibilitat d'accedir i gestionar bases de dades de major capacitat i extensió, que la recerca sobre els efectes que l'estructura té sobre la funció (i a l'inrevés), per qualsevol tipus de xarxa, ha interessat una fracció cada cop més i més elevada de científics i investigadors. Aquesta capacitat de càlcul, juntament amb les eines teòriques que proporcionen la física i la mecànica estadística, *haurien* de permetre, en primer lloc, la caracterització de l'estructura, les propietats i el comportament d'aquestes xarxes; en segon lloc, la generació de models que ens ajudin a entendre el significat d'aquestes propietats¹; i en tercer lloc, la predicció del comportament d'aquestes basant-se en la mesura de les propietats estructurals i les regles locals que governen el funcionament dels vèrtexs individuals. I s'ha dit, *haurien*, perquè, si bé certament sembla que així s'estigui assolint en un nombre i tipus de xarxes cada cop més elevat, quan hom s'esforça per intentar comprendre la seva estructura, la seva funció i la relació que pogués existir entre ambdues, es topa, irremeiablement, amb les complexitats inherents d'aquests objectes². La primera de les propietats és la complexitat estructural entesa com la dificultat que existeix alhora d'esbrinar el sistema de connexions d'una xarxa, tant per la diversitat d'enllaços existents (els enllaços entre els diferents nodes poden tenir diferents pesos, direccions, sentits i signes) com per la *diversitat nodal*, en l'haver-hi molts tipus diferents de nodes, amb funcions específiques molt diferents dins d'una mateixa xarxa. La segona és la complexitat dinàmica entesa com la descripció del comportament de la xarxa al llarg del temps. Tant nodes com arestes es poden descriure com sistemes

¹ En aquest camp de la ciència, encara no estan clares les respostes a obtenir ni tan sols les preguntes a realitzar.

² La definició del substantiu *complexitat* és encara elusiva. Una bona definició és la que fa Ricard V. Solé quan parla de qualitat dels sistemes que s'autoorganitzen en estats a mig camí entre l'ordre i el desordre, que evolucionen entre aquests límits de forma necessària i que mostren propietats *emergents*, això és, no deduïbles de l'estudi dels elements individuals (Solé 2009).

dinàmics, en alguns casos de comportament no lineal, mitjançant complicades funcions temporals i afectades, a més, per l'evolució intrínseca que pugui patir l'estructura de la xarxa i que fa que les relacions, connexions i individus no tinguin una presència constant al llarg del temps³. A més a més, les diferents complexitats descrites s'influencien mútuament, generant meta-complexitats que dificulten encara més el seu estudi. Per exemple, l'actual estructura de la xarxa elèctrica depèn del seu creixement al llarg dels anys i, per tant, és un cas en què l'evolució de la xarxa (complexitat dinàmica) afecta la topologia (complexitat estructural). N'és un segon exemple la base de la memòria i l'aprenentatge, que es recolza, en part, en el reforçament de la interconnexió d'un grup de neurones quan treballen conjuntament per "llençar" un determinat senyal nerviós de forma repetida. En aquest cas, la dinàmica nodal afecta el pes de les connexions (Strogatz 2001).

Amb l'objectiu d'evitar aquesta doble complexitat estructural i dinàmica (simultània i relacionada), el camí seguit pels científics en l'estudi d'aquests sistemes ha estat el d'obviar-ne una per centrar-se en l'altra. En un extrem, l'estudi del comportament dinàmic s'ha contemplat reduint la complexitat estructural a mínims i definint una estructura espacial el més regular possible (Figura 3.1 esquerra), reduint la connectivitat de la xarxa i establint un patró regular de vèrtex i arestes que permetés la simulació dinàmica de la mateixa mitjançant equacions diferencials més complertes. En l'extrem oposat, l'estudi de la complexitat estructural (Figura 3.1 dreta), ha forçat a deixar de banda la complexitat dinàmica, assumint simplificacions com suposar la xarxa en estat no transitori o explicar les connexions amb funcions lineals simples, reduint els problemes inherents a la dinàmica global de la xarxa.

Des de l'òptica de l'estudi de la dinàmica, els models de sistemes dinàmics s'han utilitzat per modelar gairebé tot: des de terratrèmols a ecosistemes i des de neurones a neutrons. Les passes a seguir han estat, gairebé sempre, dues: considerar en primer lloc la dinàmica que caracteritza cada node, suposant-lo aïllat del sistema i assumir que en aquest estat representa un sistema dinàmic genèric, suposant que el seu comportament a llarg termini vingui donat per punts estables fixes, cicles límit o bé atractors caòtics⁴; en segon lloc, connectar-hi alguns d'aquests sistemes entre ells i estudiar-ne el seu comportament col·lectiu. Les xarxes neurals, l'optimització de problemes de combinatòria o els autòmats cel·lulars són tres petits exemples de línies d'investigació en aquest camp que, s'encaminen cap a l'exploració de fenòmens de caos espai-temporal, sincronització, criticalitat auto-organitzada i formació de patrons des d'un punt de vista purament matemàtic, més que no pas cap a l'estudi de models de sistemes físics reals. I en aquest sentit, l'estructura mai no ha passat de ser un substrat poc atractiu i fins i tot molest alhora de definir aquests sistemes.

³ A la WWW, les pàgines (nodes) i els seus enllaços (arestes) es creen i es destrueixen cada fracció de temps.

⁴ Les paraules *cicle límit*, *atractors* o *criticalitat*, entre moltes d'altres, formen part del nou vocabulari sorgit de l'estudi de la caracterització del comportament de sistemes dinàmics poc coneguts però sorprenentment comuns a la vida real: els *sistemes complexos*. El *caos determinista* és potser la peça més ben compresa d'aquest conjunt de nous conceptes però n'existeixen moltes d'altres encara en fase d'estudi.

La nova ciència de les xarxes complexes intenta casar aquestes dues òptiques per definir un àmbit comú en el qual els aspectes dinàmics i els aspectes estructurals es trobin, es relacionin i proporcionin una imatge de la realitat més propera a la veritable.

3.1.1.1 Definicions

Formalment, una xarxa es pot representar per un graf (Figura 3.2). Un graf G és una entitat matemàtica formada per un conjunt no buit V d'elements que anomenem vèrtexs o nodes i una col·lecció E de parelles desordenades d'unions que anomenem arestes o enllaços i que simbòlicament es representa com $G = (V, E)$ (Balakrishnan 2012). Per exemple, en l'estudi de xarxes socials, els nodes acostumen a ser els éssers humans i les arestes simbolitzen algun tipus de relació entre aquests; en xarxes metabòliques, els nodes poden ser productes o reactius metabòlics i les arestes les reaccions que esdevenen entre ells; en xarxes de transport, els nodes són els punts on conflueixen els diferents camins (que són les arestes) utilitzats per a la distribució d'informació o energia.

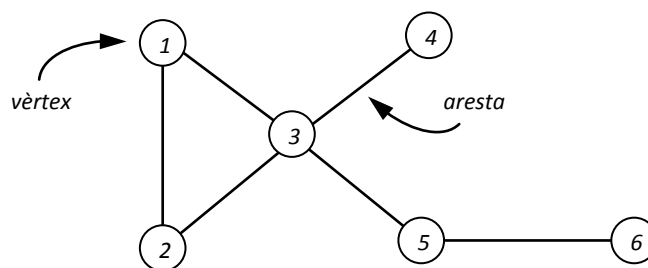


Figura 3.2 Exemple de graf amb sis vèrtexs i sis arestes.

En general ens referim a un vèrtex particular pel seu ordre i en el conjunt V i dos vèrtexs, i i j , rebran el nom d'adjacents (o connectats) si existeix l'aresta (i, j) que els uneix.

Un graf es pot representar per la seva corresponent matriu d'adjacència $A = \{a_{ij}\}$ que, en el cas més simple, serà una matriu simètrica de $V \times V$ elements. L'element a_{ij} de la matriu A prendrà un valor 1 si l'aresta (i, j) pertany a E , i 0 en qualsevol altre cas. La matriu és simètrica, ja que si existeix una aresta que uneix i amb j , també existirà l'aresta que connecti j amb i . Llavors $a_{ij} = a_{ji}$.

Les arestes d'una xarxa poden ser també dirigides (quan apunten una direcció determinada de l'enllaç entre els dos vèrtexs), múltiples (quant més d'una aresta connecta els mateixos nodes), autoarestes (quan surten i arriben a un mateix node) i molts altres tipus diferents que es poden introduir a mesura que la correcta definició d'una xarxa així ho requereixi.

3.1.1.2 Estructura

Per tal d'entendre la complexa dinàmica dels sistemes que es poden descriure com a xarxes cal, en primer lloc, definir i caracteritzar la seva estructura. De les mesures que permeten caracteritzar l'estructura d'una xarxa, les més fonamentals i freqüentment utilitzades són les de centralitat, les mesures locals i les mesures globals. Les mesures de centralitat permeten determinar quina és la importància d'un determinat node i què implicaria la seva desaparició per a la xarxa (sempre que s'hagi establert una definició adequada del concepte importància d'un node). Les mesures locals permeten entendre la interacció del node amb els seus veïns més immediats. Les mesures globals proporcionen característiques genèriques de la xarxa.

3.1.1.2.1 Centralitat i distribució de grau

Potser la mesura de centralitat més simple és la centralitat de grau (an. *degree centrality*), mesura que es basa en la idea que els nodes importants són aquells que tenen més enllaços. La centralitat de grau deriva de la idea de grau d'un node, que es defineix pel nombre d'arestes que s'hi connecten i que enllacen a la vegada amb els nodes primers veïns. De forma matemàtica, el grau k_i d'un node i val

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij} \quad 3.1$$

La centralitat de grau del node i es defineix com:

$$C_i^D = \frac{k_i}{N-1} \quad 3.2$$

La normalització que adopta aquesta mesura fa que C^D prengui valors entre 0 i 1, essent igual a 1 en el cas que el node i estigui connectat a la resta de nodes de V .

També s'ha demostrat molt important el coneixement de la distribució estadística del grau en una xarxa, això és la distribució de grau. Si definim p_k com la fracció de nodes d'una xarxa G que tenen grau k , p_k serà, al mateix temps, la probabilitat que un node escollit aleatòriament tingui un grau k . Per facilitar la interpretació de les distribucions de grau, una alternativa pot ser presentar-les mitjançant la funció de distribució acumulada com

$$P(k) = \sum_{k'=k}^{\infty} p_{k'} \quad 3.3$$

que és la probabilitat que el grau d'un node sigui major o igual que k . Una representació d'aquest tipus té l'avantatge de presentar totes les dades originals i no perdre-les en la construcció de l'histograma convencional, en el qual en funció de la grandària de l'interval de classe es poden perdre valors significatius del conjunt.

La importància del coneixement de la distribució de grau d'una xarxa es comença a posar de relleu a partir de 1999 amb el treball de Barabási i Albert sobre la definició topològica de la *world-wide web* (Barabási et al. 2000). Aquesta investigació destaca un aspecte molt característic de nombroses xarxes: la presència d'una distribució de grau en forma de funció potencial, molt lluny de qualsevol funció de variable aleatòria com seria d'esperar a priori (Barabási 2002). La funció potencial, que caracteritza $P(k)$ com

$$P(k) \approx k^{-\gamma} \quad 3.4$$

implica, per una banda, que els vèrtex molt connectats (k elevat) tinguin més probabilitat d'aparèixer que en el cas de xarxa aleatòria, dominant la connectivitat global de la xarxa i, per una altra, que la distribució de grau sigui monòtonament decreixent, caracteritzant-se per un únic exponent γ i no tenint, en conseqüència, una escala definida.

Després de comprovar com la distribució de grau decau com a llei potencial per l'estructura d'Internet, les xarxes de reaccions metabòliques, els grafs creats per les trucades telefòniques i la *World-Wide Web* entre d'altres (sorprenentment, amb un mateix exponent γ per a totes elles entre 2 i 3), s'ha batejat aquest tipus de xarxes amb el nom de xarxes lliures d'escala (an. *scale-free networks*) pel fet que no hi existeix un node característic que en permeti definir una escala de connectivitat⁵ (Barabási et al. 1999). Val a dir que la propietat lliure d'escala es força comú però no universal. Per a la xarxa de coautors de l'àmbit científic, $P(k)$ s'aproxima millor per una llei potencial, però amb un tall final de tipus exponencial mentre que per la xarxa elèctrica del sud-oest dels EE.UU., $P(k)$ és una distribució exponencial.

De les xarxes mostrades a la figura 3.3, tres d'aquestes, (c), (d) i (f), tenen distribució de grau potencial com indica la recta que en resulta de pintar els valors en eixos doble logarítmics, i una (b) mostra una cua potencial però es desvia significativament del comportament lliure d'escala per graus petits. La xarxa (e) té una distribució de grau exponencial (representat per una recta en eixos lineal i logarítmic) i la xarxa (a) sembla tenir una llei potencial truncada o com a mínim dues zones de règims o exponents diferenciats. Potser el més sorprenent és el fet que, malgrat la gran diversitat de xarxes reals existents, totes es poden classificar a partir d'unes poques distribucions de grau característiques (Amaral et al. 2000): les xarxes lliures d'escala, caracteritzades per una distribució de la seva connectivitat que decau segons una llei potencial, les xarxes lliures d'escala truncades, caracteritzades per una distribució de la seva connectivitat que decau inicialment segons una llei potencial i posteriorment seguida per una llei exponencial, i les xarxes amb escala definida, caracteritzades per una distribució de la seva connectivitat que decau segons una llei exclusivament exponencial.

⁵ El terme "lliure d'escala" es refereix a qualsevol funció $f(x)$ que es manté constant en un factor multiplicatiu sota el reescalatge de la variable independent x . Efectivament, això implica formes de llei potencial doncs aquestes són les úniques solucions a $f(ax) = bf(x)$, i, conseqüentment, llei potencial i lliure d'escala són, aquí sinònims.

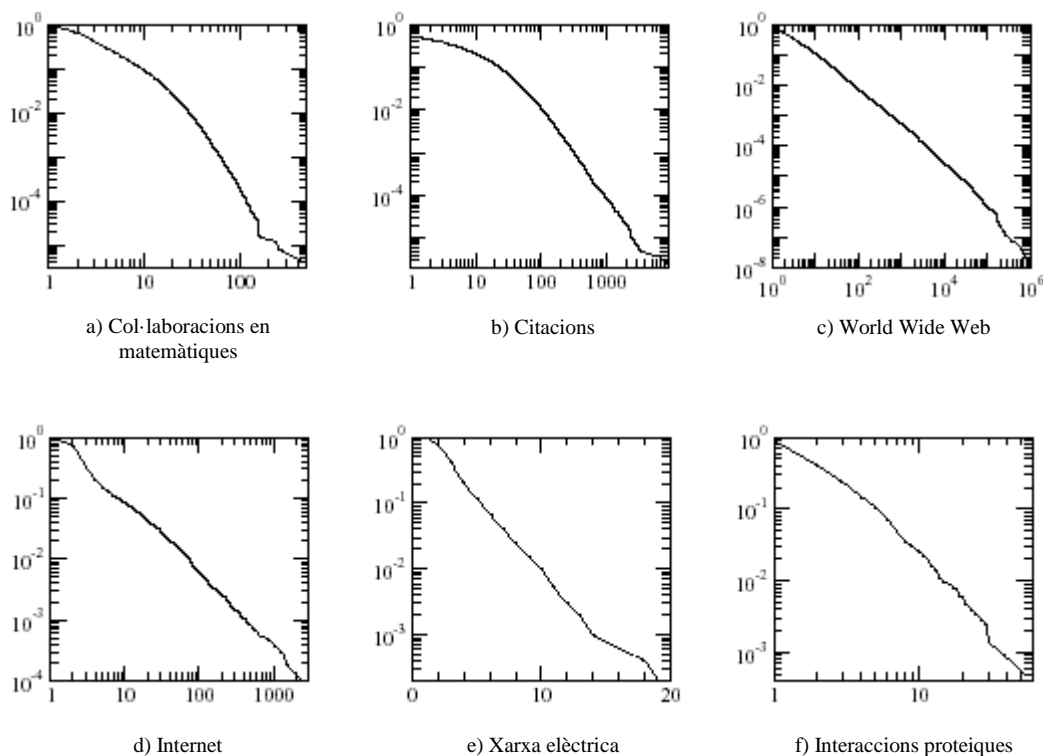


Figura 3.3 Distributions de grau acumulada de sis xarxes reals. Per a cada gràfica, l'eix horitzontal correspon al grau del vèrtex k i l'eix vertical a la probabilitat acumulada de graus, és a dir, la fracció de vèrtexs que tenen grau igual o major que k . Les xarxes que es mostren són: a) col·laboració de matemàtics ; b) citacions entre 1981 i 1997 de tots els articles catalogats per l'ISI (Institute for Scientific Information); c) una petita part de la WWW formada per uns 300 milions de vèrtexs, a l'any 1999; d) Internet al nivell de sistemes autònoms, al 1999; e) la xarxa elèctrica de l'Oest dels Estats Units; f) la xarxa d'interacció proteica en el metabolisme del llevat *S. cerevisiae*. (Newman 2003)

3.1.1.2.2 Longitud de camí característica, centralitat de proximitat i eficiència global

Una altra mesura de l'estructura d'una xarxa la proporciona el concepte de longitud de camí característica (Watts et al. 1998). Aquest concepte deriva del de camí d'una xarxa, que es defineix com la seqüència de nodes que, units per arestes, porten del node i al node j . La longitud de camí característica (an. *characteristic path length*) es defineix com la mitjana dels camins més curts calculada per totes les parelles de nodes de la xarxa:

$$L(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in N} l_{ij} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i > j} l_{ij} \quad 3.5$$

on el camí més curt l_{ij} , en termes d'arestes utilitzades per anar del node i al node j , rep també el nom de camí geodèsic. El valor invers a la longitud de camí característica i normalitzat per un node i particular rep el nom de centralitat de proximitat (an. *closeness centrality*) i s'escriu com:

$$C_i^C = L_i^{-1} = \frac{N-1}{\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} l_{ij}} \quad 3.6$$

De forma intuïtiva, aquest índex de centralitat permet associar valors elevats de C^C a vèrtexs que estiguin propers a la resta, és a dir, vèrtexs des dels quals es pot arribar a la resta amb menys salts o recorrent una menor distància.

Per a grafs que tenen més d'un component (xarxes no connexes) la definició de L i de C^C que proporcionen les equacions anteriors és problemàtica perquè ens podem trobar amb parelles de nodes desconnectats pels quals l hagi de prendre un valor infinit. Per evitar aquest resultat, l es pot calcular tan sols pels vèrtexs que tenen connexió definida, excloent de la mesura d' $L(G)$ les parelles que tinguin els nodes en dos components diferents. També podem associar a l un valor constant definit prèviament. Una solució alternativa i més satisfactòria és la que proposa el càlcul de la mitjana harmònica (això és, el recíproc de la mitjana dels recíprocs) en la qual els valors infinits de l_{ij} no contribueixen a la suma (Latora et al. 2003). En la bibliografia, aquesta mesura rep el nom d'eficiència global i es defineix com:

$$E_{glob}(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{l_{ij}} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i > j} \frac{1}{l_{ij}} \quad 3.7$$

Notem com l'eficiència global es correlaciona amb $1/L$, doncs una longitud de camí característica elevada correspondrà a una baixa eficiència.

3.1.1.2.3 Centralitat d'informació

La centralitat d'informació (an. *information centrality*), també relacionada amb la mesura de l'eficiència global de la xarxa, està basada en la idea que la importància d'un node es relaciona amb la capacitat de resposta de la xarxa G davant de l'eliminació del node en qüestió. En particular, es mesura la capacitat de propagació d'informació entre els vèrtexs d'una xarxa abans i després que el vèrtex i s'elimini. La centralitat d'informació d'un node i es defineix com la caiguda d'eficiència relativa de la xarxa en eliminar de G les arestes incidents en i :

$$C_i^I = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E(G) - E(G')}{E(G)} \quad 3.8$$

on G' és el graf amb V nodes i $E - k_i$ arestes, obtingut en eliminar de G les k_i arestes incidents en el node i .

3.1.1.2.4 Centralitat de mitjanja

La relació existent entre dos nodes no adjacents pot dependre d'un tercer, especialment si aquest es troba en el camí d'unió dels dos primers. En conseqüència, els nodes existents en els camins d'unió entre d'altres, poden exercir una influència notable i un control estratègic sobre la resta. La centralitat de

mitjana (an. *betweenness centrality*) assumeix, per una banda, que un element és important si es troba enmig de la resta d'elements i, per una altra, que la informació (o qualsevol altre producte) viatja tan sols a través de camins geodèsics. Així, si n_{jk} és el nombre de camins geodèsics que uneixen els dos vèrtexs j i k , i $n_{jk}(i)$ és el nombre de camins geodèsics que uneixen els vèrtexs j i k i que contenen el vèrtex i , la centralitat de mitjana del vèrtex i es pot definir com:

$$C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{\substack{j,k \in N \\ j \neq k; j,k \neq i}} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad 3.9$$

Com en els altres casos, C^B pren valors entre 0 i 1, essent igual a 1 en el cas que el vèrtex i estigui present en tots els camins geodèsics entre j i k . Val a dir que assumir que la informació viatja al llarg de camins geodèsics és una suposició agosarada i que en alguns casos s'han definit altres mesures de centralitat més ajustades a la realitat particular de les xarxes en estudi (Porta et al. 2006).

3.1.1.2.5 Agrupament, transitivitat i eficiència local

Introduït al mateix temps que la longitud de camí característica a la Ref. (Watts et al. 1998) el coeficient d'agrupament C (an. *clustering coefficient*) ha estat una eina freqüentment utilitzada en l'anàlisi de xarxes. Per un node i , el coeficient d'agrupament es defineix com la possibilitat que dos veïns d' i siguin veïns entre sí al mateix temps. A nivell pràctic, això s'acostuma a traduir en el nombre de triangles existents en una xarxa, entenent triangle com el conjunt de tres vèrtexs en el que cada un d'ells està connectat a cada un dels altres. Conseqüentment, el coeficient d'agrupament es pot quantificar com:

$$C_i = \frac{\text{nombre de triangles connectats al vèrtex } i}{\text{nombre de triples centrats en el vèrtex } i} \quad 3.10$$

Aquí, "triple" defineix la unió de tres nodes sense formar triangle. Per vèrtex amb grau 0 o 1, pels quals el numerador i el denominador de l'equació anterior són zero, es considera $C_i = 0$. El coeficient d'agrupament de tota la xarxa és la mitjana dels coeficients d'agrupament individuals:

$$C(G) = \frac{1}{N} \sum_i C_i \quad 3.11$$

Posteriorment el concepte d'agrupament s'ha definit d'una forma notablement diferent rebent el nom de transitivitat (Newman et al. 2002) i escrivint-se com:

$$C(G) = \frac{3 \cdot \text{nombre de triangles a la xarxa}}{\text{nombre de triples connectats a la xarxa}} \quad 3.12$$

on un "triple connectat" significa un únic vèrtex amb arestes dirigides a altres parelles desordenades de vèrtexs. El factor de tres al numerador compta pel fet que cada triangle contribueix en tres triples al conjunt. Cal tenir sempre clar alhora d'escriure o llegir publicacions en aquest àmbit quina de les dues

definicions (3.10 o 3.12) s'utilitza, doncs els resultats obtinguts poden ser lleugerament diferents (veure Taula 3.1)

A més d'aquestes dues definicions, recentment també s'ha utilitzat el concepte d'eficiència, vist anteriorment, per caracteritzar aquesta propietat local de les xarxes (Latora et al. 2001). En particular, es poden caracteritzar les propietats locals de G avaluant per a cada vèrtex i l'eficiència del subgraf dels veïns de i , G_i . Es defineix així l'eficiència local E_{loc} com la mitjana d'eficiències dels subgrafs locals:

$$E_{loc}(G) = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} E(G_i) \tag{3.13}$$

Aquesta quantitat juga un paper semblant al del coeficient d'agrupament però com que $i \notin G_i$, l'eficiència local revela fins a quin punt el sistema pot resistir les fallides d'algun dels seus components. És a dir, E_{loc} mostra com d'eficient és la comunicació entre els primers veïns de i quan i desapareix.

3.1.1.2.6 Estructura d'algunes xarxes reals

Fins aquesta data, algunes de les mesures anteriorment presentades han permès sintetitzar part del coneixement relacionat amb les xarxes. La Taula 3.1 mostra els resultats per a un conjunt de xarxes estudiades. Són aquestes les mesures més significatives tot i que no vol dir que puguin ser les úniques ni tan sols que siguin, ara per ara, les més adequades. Sí que han servit per començar a comprendre'n alguns aspectes importants.

	Xarxa	Tipus	N	m	$\langle k \rangle$	L	γ	$C^{(1)}$	$C^{(2)}$
Social	actors de cinema	no dirigida	449.913	25.516.482	113,43	3,48	2,3	0,20	0,78
	directors d'empresa	no dirigida	7.673	55.392	14,44	4,60	-	0,59	0,88
	missatges d'e-correu	dirigida	59.912	86.300	1,44	4,95	1,5/2,0		0,16
	agendes d'e-correu	dirigida	16.881	57.029	3,38	5,22	-	0,17	0,13
	contactes sexuals	no dirigida	2.810				3,2		
Informació	WWW nd.edu	dirigida	269.504	1.497.135	5,55	11,27	2,1/2,4	0,11	0,29
	WWW Altavista	dirigida	203.549.046	2.130·10 ⁶	10,46	16,18	2,1/2,7		
	citation network	dirigida	783.339	6.716.198	8,57		3,0/-		
	co-ocurrència lèxica	no dirigida	460.902	17.000.000	70,13		2,7		0,44
Tecnològica	Internet	no dirigida	10.697	31.992	5,98	3,31	2,5	0,035	0,39
	xarxa elèctrica	no dirigida	4.941	6.594	2,67	18,99	-	0,10	0,080
	rutes de ferrocarril	no dirigida	587	19.603	66,79	2,16	-		0,69
	classes en software	dirigida	1.377	2.213	1,61	1,51	-	0,033	0,012
	circuits electrònics	no dirigida	24.097	53.248	4,34	11,05	3,0	0,010	0,030
Biològica	xarxes metabòliques	no dirigida	765	3.686	9,64	2,56	2,2	0,090	0,67
	interaccions	no dirigida	2.115	2.240	2,12	6,80	2,4	0,072	0,071
	proteiques	dirigida	135	598	4,43	2,05	-	0,16	0,23
	ecosistemes marins	dirigida	307	2.359	7,68	3,97	-	0,18	0,28
	xarxes neurals								

Taula 3.1 Propietats bàsiques mesurades i publicades d'algunes xarxes: nombre de nodes (N), nombre d'arestes (m), grau mig ($\langle k \rangle$), longitud de camí característica (L), exponent de la distribució de grau si és potencial (γ) amb els exponents d'entrada/sortida si es tracta de xarxes dirigides o “-“ si no és potencial, coeficient d'agrupament segons equació 3.10 ($C^{(1)}$), i coeficient d'agrupament segons equació 3.12 ($C^{(2)}$). Les entrades en blanc indiquen dades inexistentes. (Newman 2003)

3.1.1.2.7 Móns petits

Les mesures anteriors es presenten com a eines útils alhora de definir l'estructura d'una xarxa. Per tant, hem d'esperar que la seva utilització permeti, per exemple, i com a mínim, diferenciar dues estructures tan diferents com la d'una xarxa regular i una d'aleatòria (Figura 3.1). Amb aquest objectiu, les mesures que històricament es van començar a utilitzar varen ser la longitud de camí característica (L) i el coeficient d'agrupament (C). (Strogatz 2001)

En el cas de la xarxa regular connexa de la Figura 3.4, la longitud de camí característica l_{ij} , definida anteriorment com la distància més curta existent entre dos nodes i i j (i entenent distància com el nombre d'arestes que separa ambdós nodes) és únic i definit: $l_{ij} = 7$ sigui quin sigui el camí més curt escollit per arribar del node i al node j o a l'inrevés. També ho és el coeficient d'agrupament C_i , que pren un valor definit de 0,5 igual per a cada node (si i només si la xarxa és infinita). En canvi, per una xarxa aleatòria, l_{ij} prendrà, en general, un únic valor depenent del camí escollit per arribar d'un node a un altre però, en general, força més baix que la seva contrincant regular. Similarment, no podrem parlar mai d'un coeficient d'agrupament elevat, doncs la presència de triangles a la xarxa es pot veure altament limitada per la irregularitat dels enllaços presents.

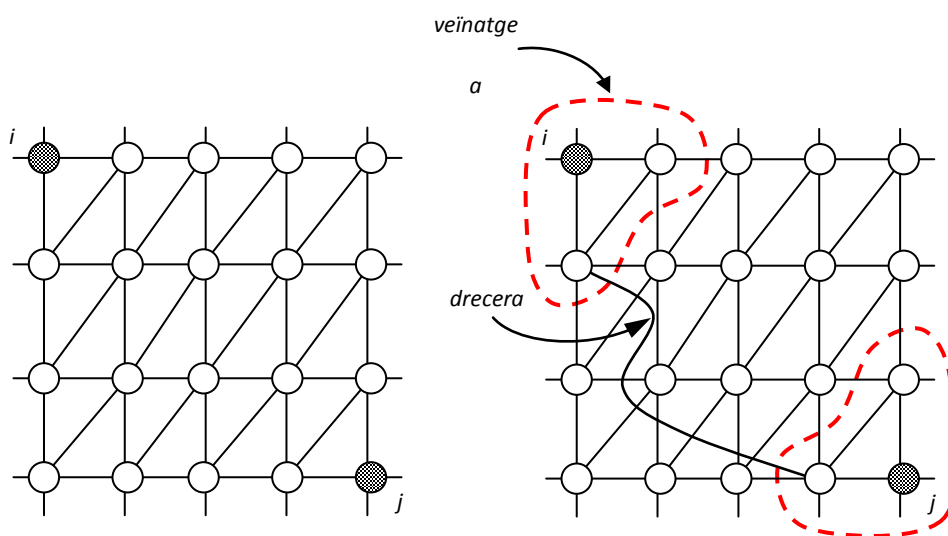


Figura 3.4 El fenomen 'small world' explicat mitjançant una drecera per una xarxa regular connexa (o malla)

La veritat és que la utilització de L i C com a eines de comparació de xarxes reals ha portat, però, a un descobriment sorprenent i poc evident a primera vista. I és que en la seva gran majoria, les xarxes reals no es poden caracteritzar ni com a xarxes regulars ni com a xarxes aleatòries sinó en un entremig. En particular, moltes xarxes reals es caracteritzen per tenir valors de L petits, com els que es presenten en grafs aleatoris de la mateixa grandària, però valors de C elevats, com el que presenten les xarxes de distribució espacial regular de la mateixa grandària (això és, amb el mateix nombre de nodes). És el que

s'ha donat en anomenar fenomen 'món petit' (an. *small world*) i l'explicació del qual ve donada per dos conceptes: la presència de drecceres i una connectivitat local elevada⁶.

Una dreccera (an. *shortcut*) és una connexió de llarga distància que permet reduir la longitud de camí característica entre nodes de forma dràstica. En el cas de la Figura 3.4 (dreta), l'aparició d'una dreccera entre dos nodes primers veïns (veïnatge a $l = 1$) de i i j hi permet reduir el camí de 7 a 3 arestes, acostant aquest comportament al d'un graf aleatori. Des d'aquest punt de vista, aquesta és una primera característica dels móns petits: sistemes amb longitud geodèsica molt més curta que la dels seus equivalents (en nombre de nodes) regulars (estructura en malla) i en els quals, utilitzant poques arestes s'hi pot viatjar fàcilment d'un punt a un altre. En l'estructura social dels éssers humans, per exemple, aquestes 'drecceres' les estableixen les persones que, ja sigui per afeccions personals, qüestions de treball, etc., connecten àmbits diferents de la societat.

Hom podria pensar que si la immensa majoria de xarxes reals estudiades presenten drecceres en la seva estructura i tenen valors de L semblants al de les seves 'contraparts' aleatòries de grandària semblant, haurien de mostrar una baixa connectivitat local (això és, petit coeficient d'agrupament) com també presenten les xarxes aleatòries. Sorprenentment, aquesta immensa majoria de xarxes que presenten valors de L petits mantenen, a la vegada, una gran connectivitat local. Dit d'una altra forma: malgrat algun dels meus veïns pugui estar connectat a un node llunyà, si aquest node A, veí meu, està connectat a B, existeix una elevada probabilitat de que jo també estigui connectat a B i que, per tant, B sigui, a la vegada, el meu veí.

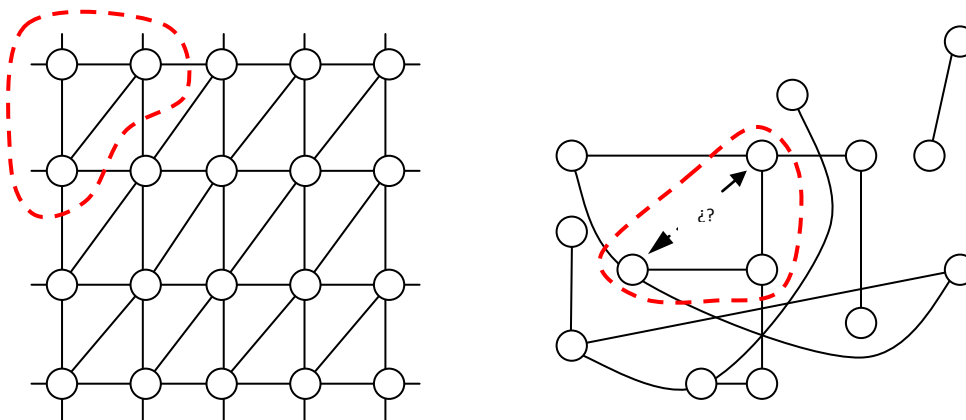


Figura 3.5 El fenomen *small world* explicat mitjançant la transitivitat o agrupament per una malla i per una xarxa aleatòria

Com hem vist, aquesta segona característica és justament molt notable en les xarxes regulars, on la possibilitat de trobar triangles a la xarxa és elevada (Figura 3.5, esquerra), però del tot inexistent en grafs

⁶ El terme '*small-world*' (popularment conegut com '*sis graus de separació*') sembla que fou introduït al 1929 en un obscur conte anomenat '*Láncszemek*' ('*Cadenes*') escrit pel poeta hongarès Frigyes Karinthy. Al 1967 fou adaptat pel sociòleg Stanley Milgram en els seus estudis de sociologia.

aleatoris, en els quals els triangles són escassos (Figura 3.5, dreta). Aquesta propietat, que hem presentat amb el nom de transitivitat o agrupament, és una propietat local (a diferència de la longitud geodèsica vista anteriorment, que és global) i caracteritza la probabilitat que els nodes connectats a un vèrtex determinat ho estiguin a la vegada entre ells.

Una xarxa món petit es pot generar a partir d'una xarxa regular en la qual els enllaços originals es comencen a substituir per enllaços aleatoris entre nodes qualsevol amb una probabilitat de substitució determinada. A la Figura 3.6 es parteix d'una xarxa amb distribució regular de nodes en forma circular on cada node resta connectat al seu veí més immediat i al veí immediatament més proper (Figura 3.6, esquerra). L'evolució cap a un xarxa aleatòria esdevé al reconnectar, de forma aleatòria i amb una probabilitat de reconexió p , alguns dels nodes amb d'altres nodes que ja no són ni els seus veïns directes ni els immediatament més propers. El model mostra com afegint tan sols uns pocs d'aquests enllaços de llarga distància es redueix dràsticament la distància de separació mitjana de tots els nodes que formen part de la xarxa però sense disminuir de forma sensible el seu agrupament i sorgeix, en definitiva, el fenomen de món petit (Watts et al. 1998): $L \geq L_{aleatori}$ però $C \gg C_{aleatori}$.

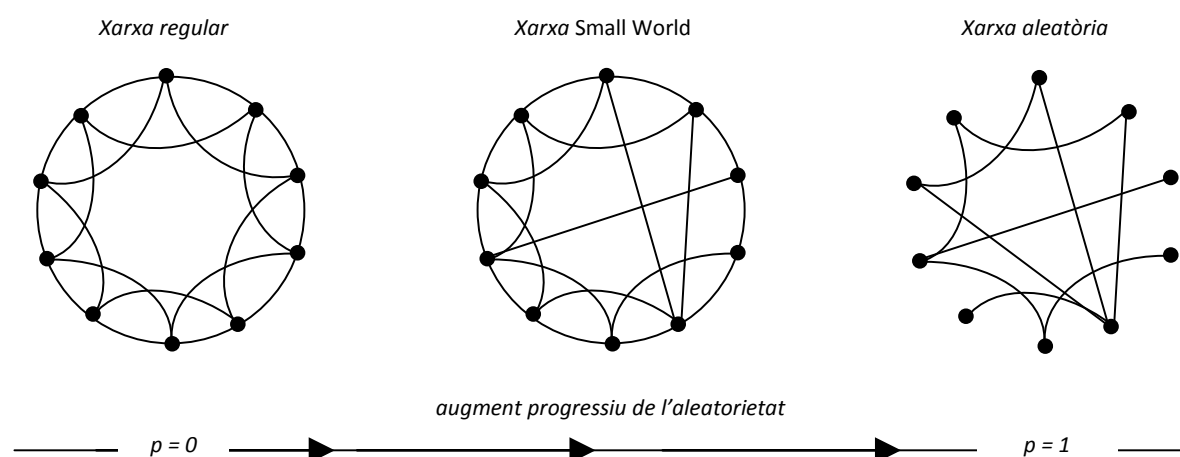


Figura 3.6 El pas de xarxa regular a xarxa aleatòria es realitza passant, abans, per una xarxa de tipus món petit.

Els estudis que els últims anys s'han realitzat d'una nombrosa selecció de xarxes reals de molts tipus han posat al descobert un fet. En contra d'allò que podríem intuïtivament arribar a pensar, aquest elevat nivell d'agrupament no és exclusiu de xarxes de caràcter social, en les que l'establiment de relacions entre els diferents membres ofereix familiaritat, seguretat i intimitat. També és present en xarxes de característiques tan diferents com la *World Wide Web* o la de la connexió neuronal del cuc *Caenorhabditis elegans*. (Watts 2003)

I més enllà, el reconeixement del fenomen *small-world* en xarxes dels camps de la computació, l'epidemiologia, la biologia cel·lular i, fins i tot, en el de l'economia i els negocis, ha demostrat que

aquestes propietats esmentades (camins de connexió curts entre nodes qualsevol, com en grafs aleatoris, i elevada connectivitat global, com en xarxes de distribució espacial regular), proporcionen una major velocitat de propagació de la informació entre nodes facilitant qualsevol tipus de procés dinàmic (com la sincronització o la computació), en relació a malles regulars i aleatòries de la mateixa grandària. (Strogatz 2001)

3.1.1.3 Xarxes amb pes i xarxes espacials

Les definicions que hem vist fins aquest moment es basen en xarxes *sense pes* (an. *unweighted*). Això és, xarxes que es caracteritzen per una naturalesa binària i en les quals les arestes entre nodes són presents ($a_{ij} = 1$) o no ($a_{ij} = 0$). Malgrat això, a més d'una complexitat topològica notable, moltes xarxes reals presenten una elevada heterogeneïtat en la capacitat i la intensitat de les seves connexions. En xarxes socials, els lligams entre individus poden ser més o menys forts; les reaccions d'una xarxa metabòlica poden tenir velocitats de reacció diferents; el tràfic a Internet dependrà, en gran manera, del *router* que a hom li toqui; etc. Aquests sistemes es poden definir millor com a xarxes amb pes (an. *weighted networks*), això és, xarxes en les quals cada aresta porta associat un valor numèric (diferent de 0 i 1) que mesura la fortalesa de la connexió. (Boccaletti et al. 2006)

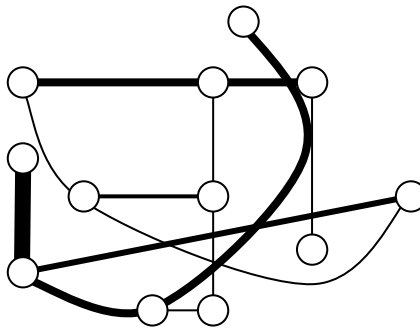


Figura 3.7 Representació gràfica d'una xarxa amb pes.

Un graf amb pes (o valor) $G = (V, E, \Omega)$ afegeix al graf G vist anteriorment, un conjunt Ω d' E elements que representen els valors numèrics (pesos) associats a les arestes i que mesuren la característica de l'enllaç. A diferència dels grafs topològics (definitos tan sols per V i E), aquest tipus de grafs es representa per dues matrius: la matriu A d'adjacència anteriorment citada i la matriu W , contenidora dels pesos w_{ij} de les arestes que uneixen els vèrtex i i j . En aquests casos sorgeix, quasi necessàriament, el concepte de cost de connexió, doncs si bé sembla que una alta eficiència local i global implica un millor funcionament de la xarxa, també ha de portar associada una major despesa en quantitat i longitud d'arestes existents. Latora et al. (Latora et al. 2003) defineixen el cost normalitzat d'un graf G com:

$$Cost(G) = \frac{\sum_{i \neq j \in G} a_{ij} \gamma(w_{ij})}{\sum_{i \neq j \in G} \gamma(w_{ij})} \quad 3.14$$

on γ és l'anomenada funció d'avaluació de cost i calcula el cost que implica l'establiment d'una connexió de pes w . Si fem que γ sigui la funció identitat, assumim el cas més genèric en què la funció de cost és proporcional al pes de l'aresta, sigui quin sigui. En aquest cas, la definició anterior queda reduïda a

$$Cost(G) = \frac{\sum_{i \neq j \in G} a_{ij} w_{ij}}{\sum_{i \neq j \in G} w_{ij}} \quad 3.15$$

Un altre cas particular de xarxes són les que es desenvolupen en un espai real, en les quals els nodes ocupen una posició determinada en un espai euclidià de dues o de tres dimensions i en les que les arestes són connexions físiques reals. Les xarxes neurals en serien l'exemple típic, però també incloem en aquest grup la majoria de xarxes d'informació i comunicació (Pastor et al. 2004), la xarxa de transport de l'energia elèctrica (Albert et al. 2004), la majoria de sistemes de transport terrestre (Latora et al. 2003, Porta et al. 2006), aeri (Guimerà et al. 2005) i fins i tot les xarxes de galeries d'insectes socials com les formigues (Buhl et al. 2004). En aquest cas, les arestes tenen pes i la posició dels nodes és fixa.

Val a dir que la immensa majoria del treball realitzat en aquest tipus de xarxes s'ha centrat en l'estudi de les propietats topològiques de les mateixes, més que no pas en l'estudi del paper que juga l'espai en la formació d'aquesta topologia. Tot i així es pot definir una llista de les constriccions espacials i geogràfiques que actuen en aquests tipus de xarxes (Boccaletti et al. 2006):

- Distribució espacial dels nodes de la xarxa: les xarxes amb fortes constriccions geogràfiques són exemple de xarxes amb distribució espacial fractal dels seus nodes que, en molts casos, segueixen la distribució, també fractal, de la població sobre la geografia. (Batty et al. 1994)
- Grau i distribució de grau: el nombre d'arestes que poden confluïr en un node donat vindrà determinat i limitat per l'espai físic que en permeti la connexió. Aquesta limitació del grau del node és particularment clar en xarxes planes (an. *planar graphs*) com la dels carrers d'una ciutat, en les que les arestes formen forçosament vèrtexs sempre que es creuen. Al mateix temps, aquesta limitació fa que sigui molt difícil observar jerarquia en el grau dels nodes. És a dir, el coeficient d'agrupament $C(k)$ és independent del grau k . Aquest fet no passa en moltes altres xarxes reals en les quals $C(k)$ s'aproxima força bé per $C(k) \approx k^{-1}$. (Ravasz et al. 2003)
- Cost de les connexions a llarga distància: per motiu del cost associat a la realització física de la connexió, dos nodes allunyats tindran molta menys probabilitat de connexió que dos que estiguin

pròxims. La constricció que la distància euclidiana imposa a aquestes connexions es posa de manifest, per exemple, alhora de l'aparició de l'efecte de món petit.

Cal tenir en compte que, així com en el cas d'un graf topològic (sense pesos associats a les arestes), E prenia valors entre 0 i 1 i era igual a 1 per un graf complet (això és, un graf amb totes les arestes possibles, $N^2 - N/2$), en grafos espacials (o geomètrics) la definició del camí més curt a partir dels salts existents entre nodes no resulta apropiada degut a l'existència de la distància física real associada al recorregut a través de l'aresta. El camí més curt l_{ij} definit anteriorment com el nombre mínim d'arestes existents entre dos nodes no té per què coincidir amb el camí més curt d_{ij} definit a partir de la distància mínima físicament recorreguda al llarg de l'aresta (Figura 3.8). Anomenant d_{ij} al camí geomètric més curt existent entre els nodes i i j , podem normalitzar el concepte d'eficiència global (apartat 3.1.1.2.2) dividint $E_{glob}(G)$ per l'eficiència $E_{glob}(G^{ideal})$ d'un graf ideal complet en el que l'aresta que connecta i amb j és sempre present i té una longitud igual a la distància euclidiana entre els nodes citats (Latora et al. 2001):

$$E_{glob}(G^{ideal}) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{ij}^{Eucl}} \tag{3.16}$$

on d_{ij}^{Eucl} és la distància euclidiana entre els nodes i i j al llarg d'una línia recta, això és, la longitud d'una connexió virtual entre i i j . Utilitzant aquesta normalització, modificada recentment per grafos geomètrics (Vragovic et al. 2005), l'expressió de l'eficiència global quedarà com:

$$E_{glob,2}(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{d_{ij}^{Eucl}}{d_{ij}} \tag{3.17}$$

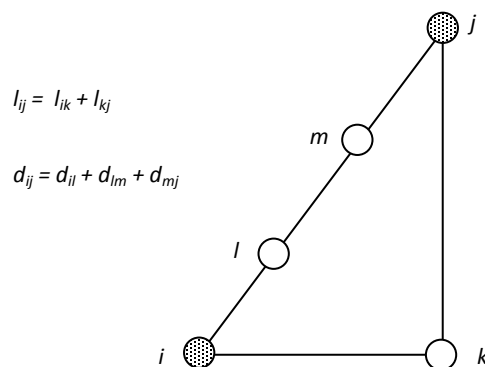


Figura 3.8 Definició topològica (l_{ij}) i geomètrica (d_{ij}) de la longitud de camí característica: el camí topològic més curt entre i i j és el que passa per k ($l_{ij} = 2$), mentre que el camí geomètric més curt és el que passa per l i m (però amb $l_{ij} = 3$)

Per un node i en particular, l'eficiència anterior es pot rescriure de nou com una mesura de centralitat que proporioni una idea de fins a quin punt el camí d'unió entre dos nodes es desvia d'una virtual línia recta. En aquest cas rep el nom de centralitat de dretura (an. *straightness centrality*) i es defineix com:

$$C_i^S = \frac{\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} d_{ij}^{Eucl}}{N-1} \quad 3.18$$

3.1.2 Transport vs. distribució

En el capítol 1 d'aquesta tesi s'ha descrit breument el funcionament dels sistemes elèctrics de potència, els encarregats de subministrar a tots els consumidors l'energia generada a les centrals elèctriques. Tal i com s'ha exposat, cal "apropar" l'electricitat des de les centrals productores fins els punts de consum mitjançant xarxes de transport en alta tensió (AT), i posteriorment adaptar la tensió a valors d'us⁷ mitjançant subestacions transformadores i repartir pel territori el fluid elèctric mitjançant xarxes de distribució en mitja tensió (MT) i baixa tensió (BT) (Taula 3.2).

Tensió nominal de la xarxa en kV
3
10
15
20*
25
30
45
66*
110
132*
150
220*
400*

Taula 3.2 Tensions nominals segons el reglament de línies elèctriques d'AT⁸. Els valors amb un asterisc corresponen a tensions d'us preferent per les companyies a Espanya. A Catalunya, per qüestions històriques s'usa la tensió de 25 kV com a normalitzada a diferència de la resta de la península.

A la Figura 3.10 es mostra un esquema unifilar⁹ d'una xarxa de transport. Es pot veure que aquestes xarxes solen ser d'estructura mallada, on l'energia té camins alternatius per arribar a un mateix punt i així garantir una alta fiabilitat (Figura 3.9).

⁷ Valors de *tensió nominal* (tensió assignada a la placa de característiques) dels aparells que s'abasteixen amb energia elèctrica

⁸ Real Decreto 223/08/ de 15 de febrero.

⁹ Esquema on les línies trifàsiques (amb tres conductors) es representen amb un traça únic, amb l'objectiu de simplificar el gràfic i afegir claredat.

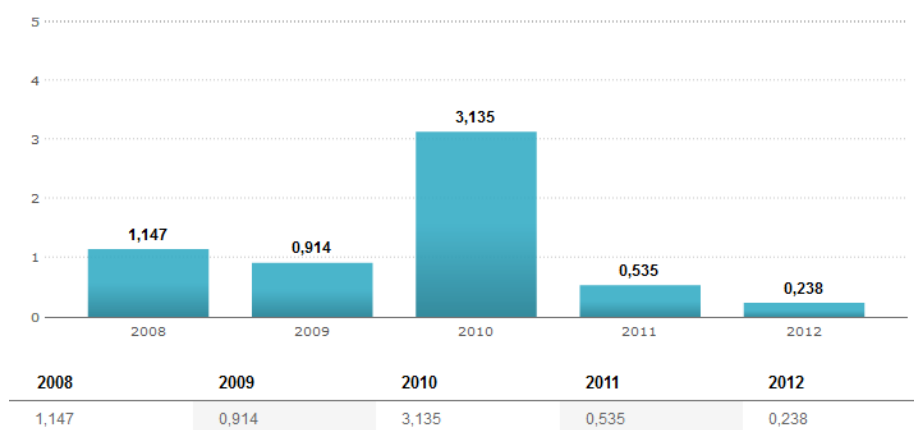


Figura 3.9 Temps d'interrupció mig (TIM) expressat en minuts, per incidències en la xarxa de transport. Es calcula dividint l'energia no subministrada (ENS) entre la potència mitjana del sistema (Font: REE)

Per exemple, el *node* de connexió 6 (400 kV) de la Figura 3.10, es pot alimentar amb la central de generació *G1* seguint el camí dels *nodes* 1-2-3-6, o el camí 1-2-3-4-6, i també es pot alimentar amb la central *G2* seguint els camins 5-4-6 i 5-4-3-6. De la mateixa manera el *node* 10 que alimenta una subestació (*S5*) que dona energia a una xarxa de mitja tensió (25 kV) es pot alimentar des de dues línies diferents, la que prové del *node* 7 i la qual prové del *node* 8. Les xarxes de transport subministren energia normalment a subestacions de mitja tensió com la *S5* que alimenten xarxes de distribució (*node* 11) a les quals es connecten un cert nombre de centres de transformació on es redueix la tensió a BT¹⁰. Però també poden abastir directament a centres industrials com el del *node* 9, si aquests consumeixen grans quantitats d'energia i tenen contractes amb la companyia subministradora per rebre un nivell de tensió superior als 25 kV. En aquest cas el centre industrial es beneficia d'una tarifa reduïda per l'energia consumida.

El *node* 11 de la Figura 3.10 podria connectar amb una xarxa com la de la Figura 3.11. En aquesta figura es representen un esquema d'una xarxa de distribució amb 7 centres de transformació (*CT*) en els quals es redueix la tensió de 25 kV a 400 V (BT). Els *CT-1*, *CT-2* i *CT-3* formen part d'una xarxa radial típica de sistemes de distribució rurals. En aquests tipus de xarxa, una falta de subministrament per avaria o manteniment en els conductors que les alimenten, implica deixar sense energia elèctrica al sistema de BT.

¹⁰ A Catalunya normalment de 25 kV a 400 V, i a la resta de l'estat Espanyol de 30 kV a 400 V

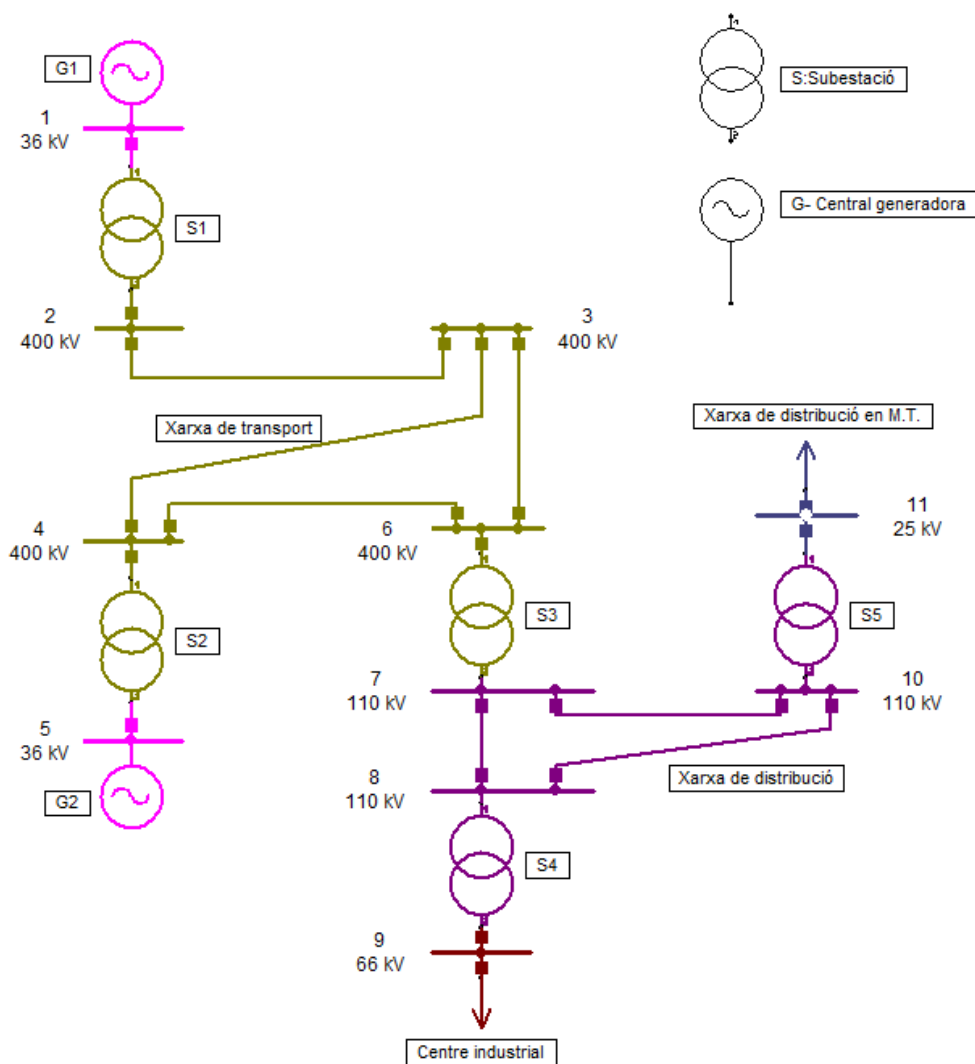


Figura 3.10 Esquema de xarxes de transport i subtransport. [Font pròpia, NEPLAN 5.19]

Els CT-4 al CT-7 formen part d'una xarxa mallada en forma d'anell. En aquests tipus de xarxes, qualsevol punt es pot alimentar des de qualsevol dels dos extrems. Amb els interruptors A i B de cada CT es dona pas al flux d'energia elèctrica des de l'extrem esquerra o dret respectivament. En aquest tipus de xarxes la fiabilitat és més elevada ja que es poden efectuar reparacions o accions de manteniment sense interrompre el subministrament elèctric al costat de BT. Normalment s'utilitzen línies aèries que no solen sobrepassar els 25 km per alimentar consums industrials aïllats o zones rurals, i línies soterrades de longituds inferiors (degut a l'elevat cost que tenen) per alimentar polígons industrials i nuclis urbans.

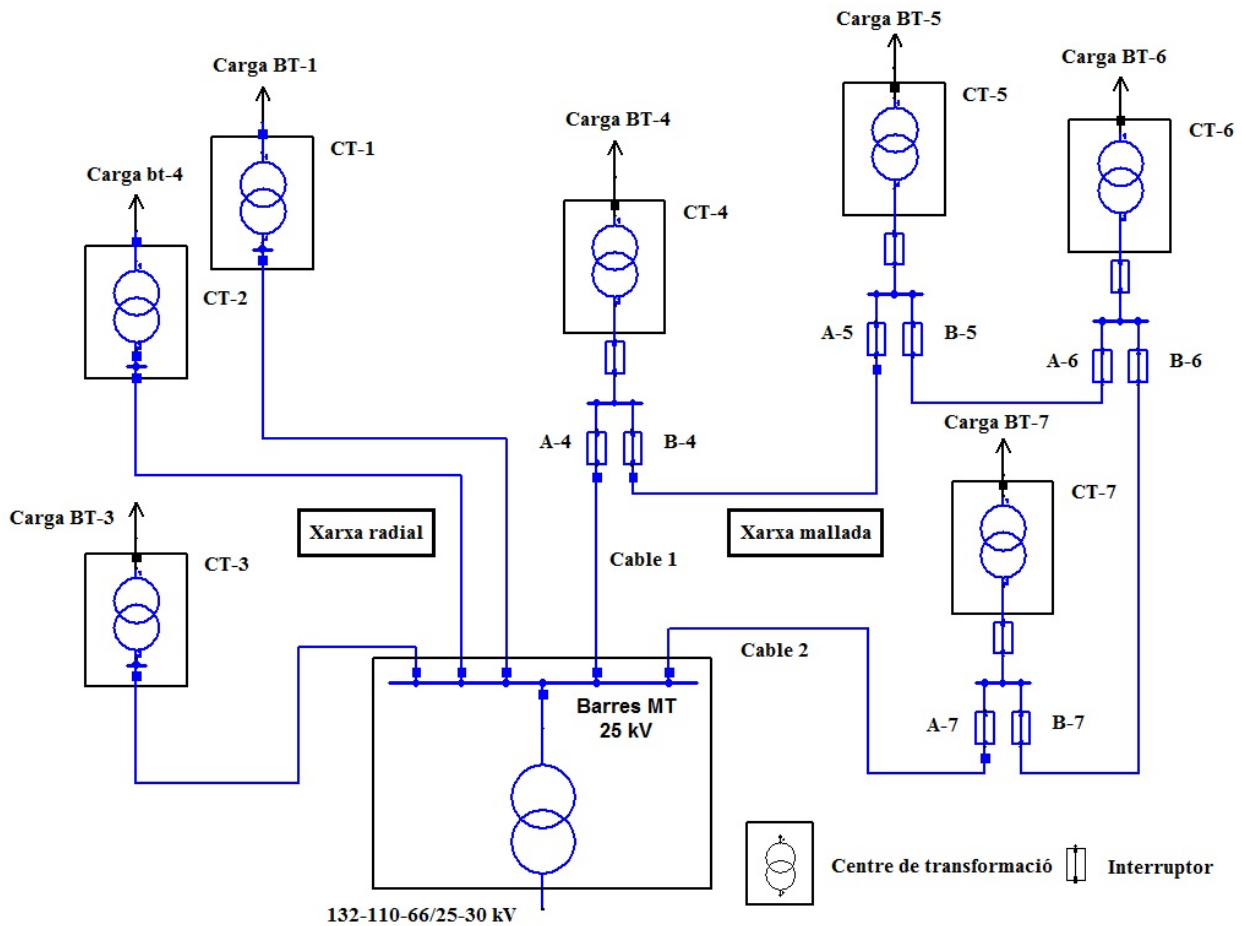


Figura 3.11 Esquema d'una xarxa de distribució MT a BT. [Font pròpia, NEPLAN 5.19]

3.2 Objectius

Darrerament les xarxes d'alta tensió s'han considerat com a xarxes complexes per alguns autors, i com a tals se'ls ha aplicat les tècniques d'anàlisi d'aquestes (Newman 2010). Amb aquest visió s'han estudiat les seves característiques topològiques bàsiques, les propietats gràfiques i la seva vulnerabilitat o fortalesa en xarxes arreu del món (Pagani et al. 2013). Potser el focus de més interès en les publicacions relacionades és la influència de la topologia en la vulnerabilitat enfront a accidents naturals i atacs (Albert et al. 2004, Crucitti et al. 2005, Solé et al. 2008, Bompard et al. 2012). Amb el desenvolupament de les xarxes intel·ligents (*smart grids*), el paper principal que tenia la xarxa de transmissió pot canviar, mentre que la distribució amb tensions més baixes por guanyar importància i necessitat de ser considerat de nou (Pagani et al. 2011). Per altra banda, la major part de les investigacions se centren en el modelat de la xarxa d'energia com un gràfic simple, amb les úniques diferències de ser dirigit o no dirigit i ser ponderat o no ponderat. En canvi les xarxes elèctriques tenen importants característiques espacials com la coordinació de la generació a temps real, les subestacions, la longitud dels conductors entre d'altres. En aquest capítol s'apliquen els conceptes de la teoria de les xarxes complexes a les xarxes de transmissió i

distribució per modelar-les com una xarxa espacial. Per fer-ho s'han utilitzat les dades reals obtingudes de 3 xarxes d'alta tensió.

L'optimització de les xarxes, en el sentit ampli del terme, és de gran importància en molts problemes pràctics d'enginyeria (Barthélémy 2011, Jungnickel 1999, Ahuja et al. 1993). En el cas concret de les xarxes elèctriques, el despatx econòmic de generació d'energia (Huneault 1991) o el mètode de reconfiguració òptim d'una xarxa elèctrica (Baran et al. 1989) en són dos exemples. En l'optimització d'una xarxa elèctrica cal prendre en consideració dues variables fonamentals: el rendiment i el cost. Es busca un alt rendiment per un mínim cost. Des del punt de vista de l'enginyeria elèctrica, les dades de rendiment es poden caracteritzar pel temps d'interrupció equivalent de la potència instal·lada (TIEPI) i pel nombre d'interrupcions equivalents de la potència instal·lada (NIEPI), ambdós definits en apartats posteriors. Pel que fa al cost, es pot obtenir a partir del cost del cablejat (Ahn et al. 2006). En les xarxes elèctriques, la longitud euclidiana dels conductors pot ser un mètode aproximat per calcular-lo. En la proposta que es fa en aquesta tesi es busca trobar un equilibri entre el rendiment i el cost des d'un punt de vista espacial. En els següents punts es proposa una metodologia que s'aplica a tres casos reals de línies elèctriques de les quals es disposen dades.

3.3 Metodologia i cas d'estudi (II): Les xarxes de l'UCTE, i les xarxes de distribució XD1 i XD2.

3.3.1 Anàlisi purament topològic

S'analitzaran a continuació una xarxa de transport i dues xarxes de distribució. Com a xarxa de transport s'ha escollit la xarxa europea (UCTE¹¹) i que és utilitzada essencialment a efectes comparatius. Com a xarxes de distribució s'han escollit dues xarxes reals que anomenarem a partir d'ara xarxa de distribució 1 i 2 (XD1 i XD2). Aquestes xarxes són reals i les dades han estat subministrades per les empreses propietàries i els organismes oficials. No es disposa dels permisos corresponents per fer-les públiques i per tant, no se'n cita en aquest document la ubicació geogràfica de les mateixes.

Com a mètode general totes les centrals generadores i subestacions es consideren iguals des d'un punt de vista topològic i es representen com a vèrtexs en els grafs. Les línies es representen com les arestes dels grafs. Es mostra a la Taula 3.3 la informació bàsica de les xarxes objecte d'estudi considerant-les des d'un punt de vista topològic. A la Figura 3.12 es mostren les topologies de les tres xarxes, mostrant-les com a grafs planars (Barthélémy 2011).

Tipus de xarxa	Nombre de nodes	Nombre de línies	Localització
Transmissió	2777	3762	UCTE
Distribució	519	557	XD1
Distribució	240	263	XD2

Taula 3.3 Cas d'estudi II: Informació bàsica de les xarxes objecte d'estudi

¹¹ UCTE: Union for the Coordination of Transmission Electricity (<http://www.centrel.org/ucte.html>)

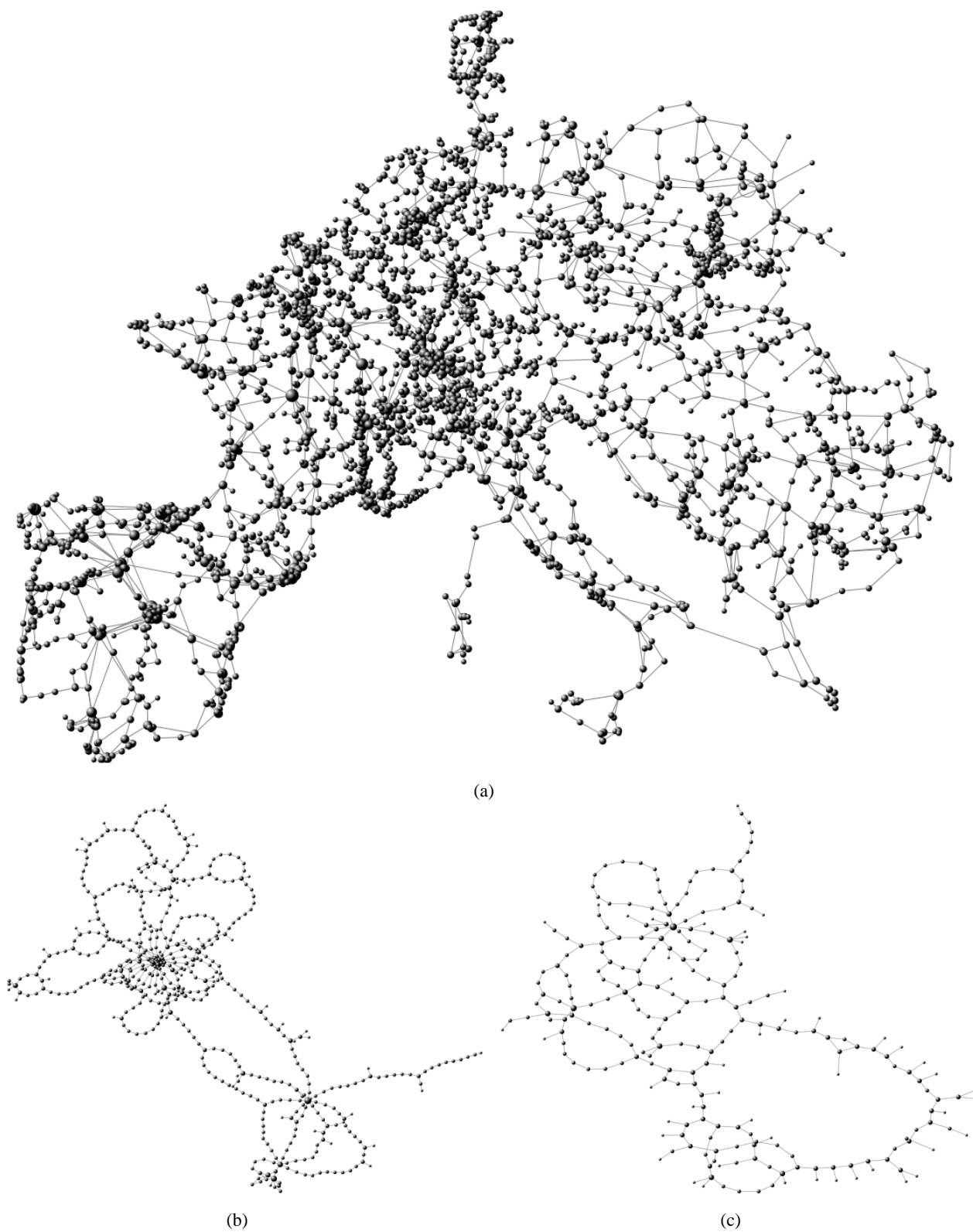


Figura 3.12 Cas d'estudi II: Xarxa de transport de l'UCTE (a) i xarxes de distribució XD1(b) i XD2 (c)¹². El diàmetre de les esferes que representen els nodes és proporcional al seu grau.

¹² Per la representació s'ha utilitzat el complement *NodeXL* de Microsoft Excel

Seguint la metodologia de les xarxes complexes, a la Taula 3.4 s'inclouen una sèrie d'indicadors que permeten quantificar les propietats de les xarxes analitzades, tant des d'un punt de vista local com global.

Xarxa	Grau mig	Mitjana (an., betweenness) mitjana	Distància geodèsica mitjana	Coefficient d'agrupament mig	Densitat del graf
UCTE	2,709	30147,632	22,712	0,07067	0,00098
XD1	2,146	6142,634	24,669	0,01279	0,00414
XD2	2,192	1785,888	15,878	0,00903	0,00917

Taula 3.4 Cas d'estudi II: Indicadors purament topològics de les 3 xarxes objecte d'estudi

Un dels passos més importants en l'anàlisi de xarxes complexes és identificar el model més adequat de xarxa. Hi ha tres models generals que han estat força estudiats i desenvolupats fins ara: atzar (*random*), món petit (*small-world*) i lliure d'escala (*scale free*). La distribució de probabilitat de grau dóna una idea de les característiques generals per escollir el tipus de xarxa. La Figura 3.13 (a) mostra la distribució de probabilitat acumulada en escales log-lineal de cada una de les tres xarxes. Cal fer palès que la distribució de grau de la xarxa de l'UCTE segueix una distribució exponencial, coincidint amb les conclusions de les principals publicacions sobre altres xarxes elèctriques (Pagani et al. 2013). Tanmateix, en el cas de les xarxes d'XD1 i XD2 no hi ha un ajust exponencial evident en la seva distribució de grau. En canvi, si per aquestes dues xarxes es prenen eixos log-log, (Figura 3.13 (b)), es poden observar funcions de tipus potencials en algun dels seus trams. La majoria dels nusos són de grau 1 o 2, i només un nombre reduït de nusos tenen un grau més elevat. Per exemple, en la xarxa d'XD1 només un node té el grau màxim de 21. Donada la variabilitat observada i el fet que no existeixi un model espacial de xarxa de distribució elèctrica validat a partir del grau dels nodes de la xarxa, es fa difícil extreure conclusions sobre el tipus de comportament que pot oferir la mateixa.

A banda d'identificar la distribució de grau, és interessant determinar el grau de centralitat dels seus nusos, és a dir la seva importància en la transmissió dins la xarxa, i la mesura de la seva mitjana ens pot facilitar aquesta informació (Albert et al. 2000, Moreno et al. 2003). La Figura 3.13 (c) mostra la distribució acumulada de la mitjana normalitzada de les tres xarxes en escales log-lineal. En termes generals hi ha una distribució exponencial amb un augment del pendent en les seves cues. Val la pena assenyalar que aquest augment del pendent és molt més acusat en el cas d'XD1, el que pot significar que els nusos amb valors alts de mitjana són poc freqüents. La interpretació des del punt de vista de l'enginyeria pot ser que les xarxes elèctriques de distribució són més radials i esglaonades (en quant a transformacions de tensió), constituint una topologia simple amb camins amb pocs nusos (Pagani et al. 2011).

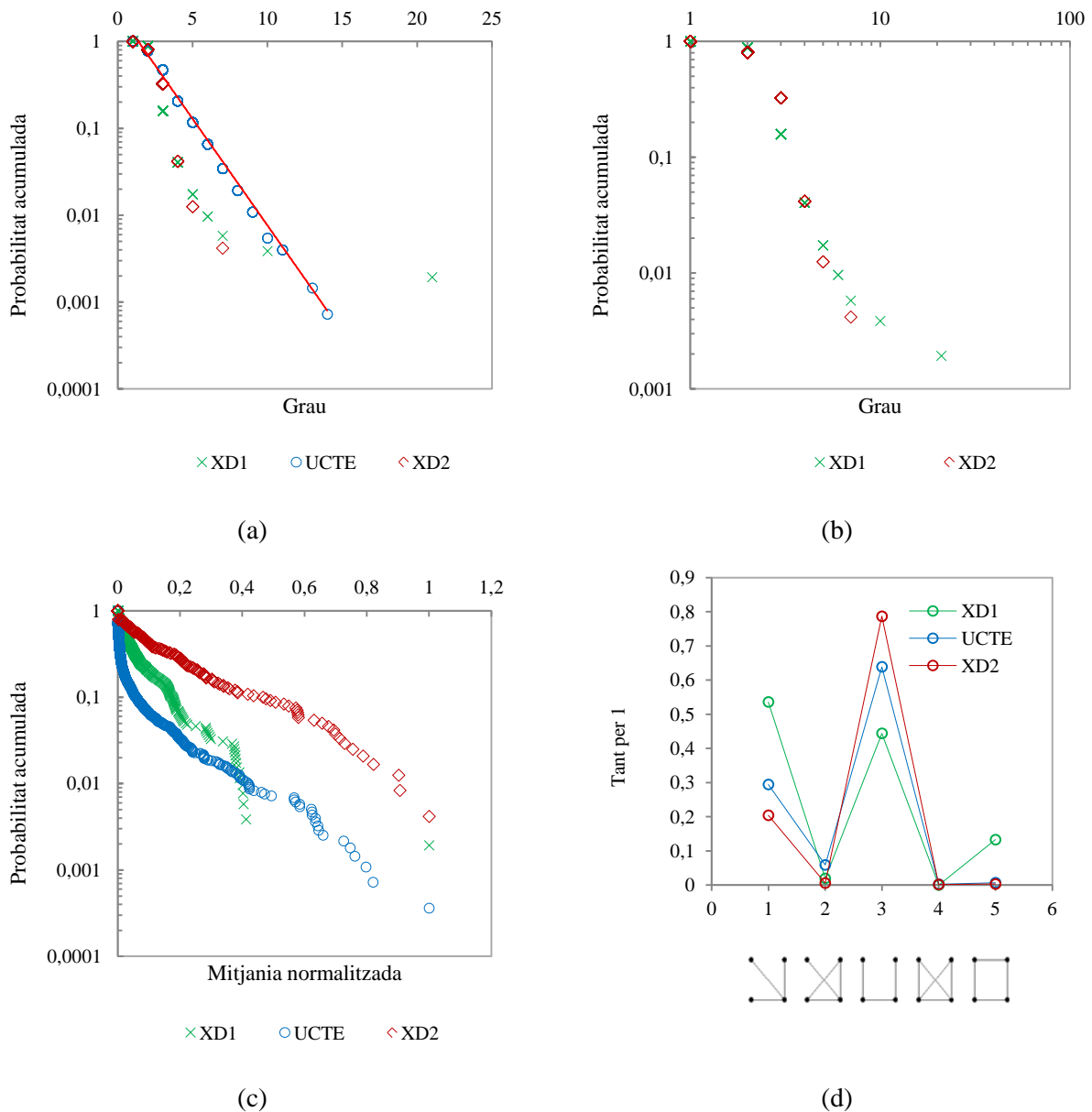


Figura 3.13 Cas d'estudi II: Distribució de probabilitat acumulada del grau de les xarxes estudiades amb eixos semi logarítmics (a) i log-log (b); Distribució de probabilitat acumulada de la mitjania normalitzada (c); Percentatge de sub-grafs en cada xarxa.

La localització de sub-grafs dins de la xarxa objecte d'estudi és una eina que és utilitzada amb freqüència en l'anàlisi de xarxes complexes (Milo et al. 2002). Cada un d'aquest sub-grafs definits per un patró particular de les interaccions entre els vèrtex, pot reflectir els principis de disseny estructural de la xarxa complexa. Les comparacions del grau i de la mitjania de la Figura 3.13 (a), (b) i (c) fan evident les diferències entre les tres xarxes analitzades. Per aprofundir en aquestes diferències s'ha inclòs el gràfic de la Figura 3.13 (d) on es recullen els percentatges de sub-grafs dins de cada xarxa. En aquesta figura es pot observar que el percentatge de sub-grafs "1" és més gran en XD1 que en el cas de la XD2. Això implicaria una major estructura radial de la xarxa d'XD1, motiu per el qual s'observa l'augment del pendent en la gràfica de la probabilitat acumulada de la mitjania Figura 3.13 (c).

3.3.2 Anàlisi espacial i optimització

Si les xarxes elèctriques es consideren com un model espacial, una de les dades característiques fonamentals d'aquestes són les longituds dels conductors que uneixen el vèrtexs, és a dir les distàncies entre vèrtexs. La Figura 3.14 mostra la distribució acumulada d'aquestes distàncies (la longitud de branca, en termes de xarxes complexes) després d'haver-les normalitzat per les tres xarxes objecte d'estudi.

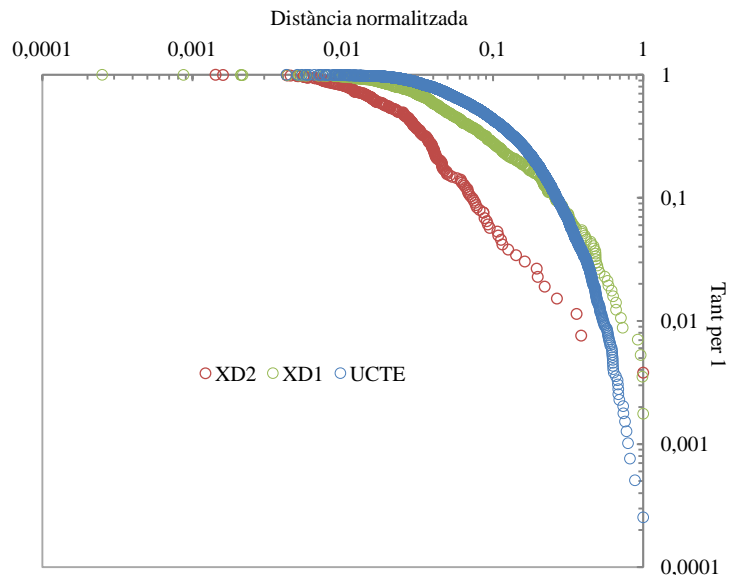


Figura 3.14 Cas d'estudi II: Distribució de probabilitat acumulada de la longitud de branca (distància) normalitzada de les xarxes de l'UCTE, XD1 i XD2

Segons l'anàlisi purament topològic fet en el punt anterior, la xarxa UCTE té un comportament exponencial de la distribució acumulada del grau, mentre que les altres dues xarxes tenen un comportament de distribució de llei que es podria aproximar a potencial en trams (Figura 3.13). Però en canvi en un anàlisi espacial les dues xarxes tenen diferents distribucions acumulades de longitud. La diferència apareix en la distribució de probabilitat acumulada de la mitjana normalitzada Figura 3.13 (c). Evidentment, les característiques de cada branca influiran de manera important en el comportament o/i rendiment de tota la xarxa. Per investigar més a fons el paper que juguen les longituds de les línies en el cost de connexió global de la xarxa, s'utilitzaran els mètodes proposats en (Ahn et al. 2006), anomenats *shuffling*. Un dels mètodes s'anomena canvi d'aresta, en anglès *edge exchange* (EE), que consisteix a seleccionar aleatòriament vèrtexs de la xarxa i intercanviar les seves arestes associades. Un altre mètode anomenat intercanvi de vèrtexs, en anglès *vertex swapping* (VS), consisteix a seleccionar dos vèrtexs a l'atzar i intercanviar les seves posicions conservant totes les connexions. De la mateixa manera que en (Ahn et al. 2006), s'ha utilitzat el mètode Monte-Carlo (MC) utilitzant el cost de connexió global (definit com la suma de les longituds euclidianes de totes les línies existents) com a Hamiltonià, i realitzant la simulació MC a una temperatura T donada, utilitzant l'algorisme de Metropolis estàndard. Els resultats

obtinguts per les tres xarxes aplicant els mètodes EE i VS simulant segons MC es mostren a la Figura 3.15, amb els subíndexs “inf” i “0” per indicar el procés de variació aleatòria global de l'estructura de la xarxa utilitzant EE o VS, o de minimització del cost de connexió en el cas VS, respectivament. En aquest últim cas s'utilitza l'algoritme de "refredament simulat" (an., *simulated annealing*) començant de $T = inf$ i fent decreixer T en les simulacions MC fins que s'arriba a $T = 0$.

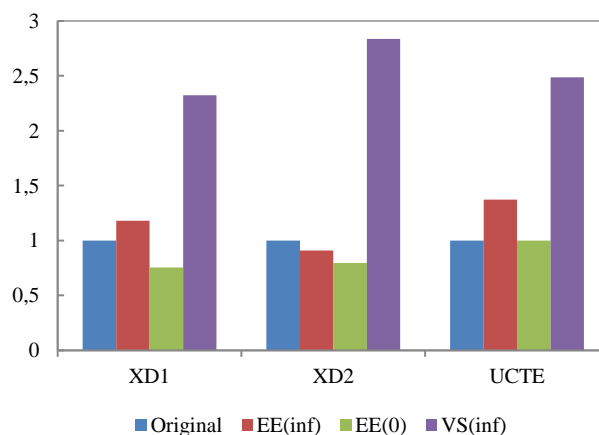


Figura 3.15 Cas d'estudi II: Resultats de les simulacions EE i VS amb valors normalitzats a les distàncies originals

Dels resultats mostrats a la Figura 3.15 es pot extreure la conclusió que la xarxa UCTE està prop del seu òptim, mentre que les altres dues xarxes n'estan allunyades. En particular, la xarxa XD2 no és òptima segons dos dels tres mètodes utilitzats, EE(0) i EE(inf), mentre que la xarxa XD1 no és òptima segons tan sols un dels mètodes utilitzats (EE(0)). De manera aproximada, això podria implicar que en la xarxa XD2 existeixen branques de llarga distància, cosa que també es posa de relleu en la distribució acumulada de la longitud de branca que mostra la Figura 3.14. En aquesta figura es pot veure que en el cas d'XD1 l'exponencial decau, cosa que significa un topall pel valor màxim de les longituds de les seves branques.

3.3.2.1 Constriccions espacials

Tal i com es pot veure a la Figura 3.16, la probabilitat acumulada de tenir una antena amb un % de nodes respecte del total, és més elevada per XD2. Això podria justificar una major feblesa. En el cas de la xarxa XD1 hi ha algunes antenes que tenen un nombre més elevat de nodes que la xarxa XD2. Això podria ser degut a la situació geogràfica de la xarxa XD1, encabida en una vall en forma de Y i amb la necessitat d'arribar a llocs allunyats.

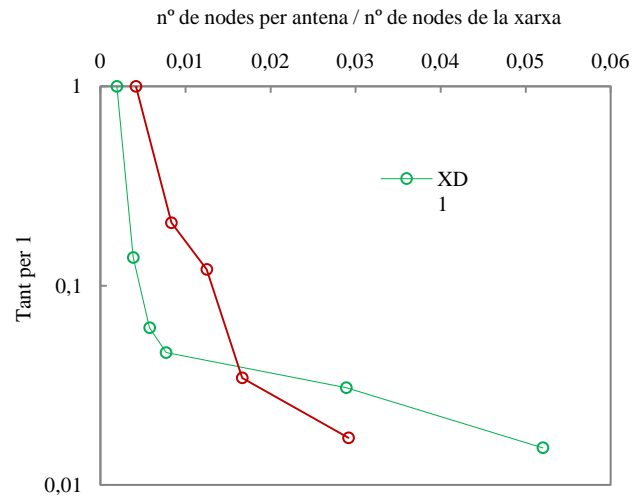


Figura 3.16 Cas d'estudi II: Gràfic en escala log-lineal de la distribució acumulada de nusos en les antenes amb valors normalitzats de les xarxes XD1 i XD2

A la Figura 3.17 es pot veure que la probabilitat acumulada de tenir un llaç amb un % de nodes respecte del total, és similar en ambdues xarxes. Això implica que a mesura que creix la xarxa, els nombre de nodes en els llaços creix proporcionalment. Les implicacions que això pot tenir en la fragilitat de la xarxa són poc concloents tal i com es discuteix a l'apartat següent.

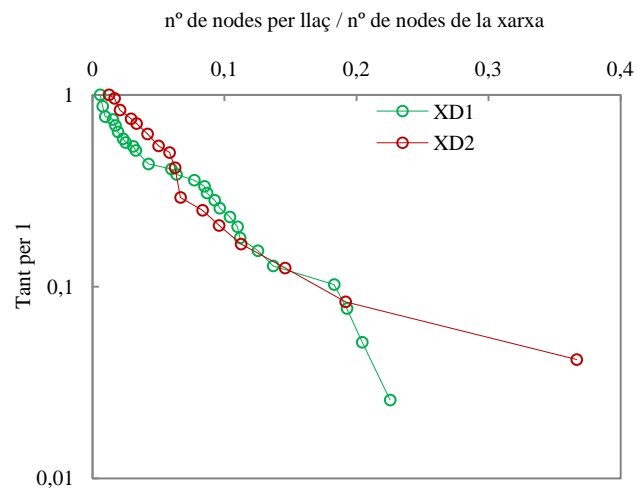


Figura 3.17 Cas d'estudi II: Gràfic en escala log-lineal de la distribució acumulada de nusos en els llaços amb valors normalitzats de les xarxes XD1 i XD2.

3.3.3 Continuitat del subministrament d'energia elèctrica

¿Podem relacionar les variacions estadístiques en la topologia (Figura 3.15 i Figura 3.16) amb valors reals de la continuïtat del subministrament de l'energia elèctrica? La resposta sembla ser que sí, però faltaria un model (hipòtesi) que ens permetés validar-ho.

La continuïtat del subministrament, també coneguda com fiabilitat (an. reliability), és l'aspecte de qualitat més immediat i evident, i fins fa poc temps era l'únic aspecte important de la qualitat del servei. Les lleis de cada país estableixen que les empreses subministradores hauran de disposar d'un procediment de mesura i control de la continuïtat del subministrament i la qualitat del producte que ofereixen (l'energia elèctrica). L'article 101 del RD 1955/2000 estableix que la continuïtat del subministrament està determinada pel nombre i durada de les interrupcions, enteses aquestes com a subministrament que no arriba al 10% del valor de la tensió declarada per la companyia subministradora. La continuïtat del subministrament es basa principalment en dos paràmetres: el $TIEPI^{13}$ i el $NIEPI$.

$$TIEPI = \frac{\sum_{i=1}^K (PI_i \times H_i)}{\sum PI} \quad 3.19$$

$$NIEPI = \frac{\sum_{i=1}^K PI_i}{\sum PI} \quad 3.20$$

on $TIEPI$ és el temps d'interrupció equivalent de la potència instal·lada en mitja tensió (1 kV a 36 kV); $NIEPI$ és el nombre d'interrupcions equivalent de la potència instal·lada en mitja tensió; PI_i és la potència instal·lada dels centres de transformació MT/BT del distribuïdor més la potència contractada en MT (en unitats de kVA); H_i és el temps d'interrupció en hores del subministrament que afecta a la potència PI_i ; k és el nombre total d'interrupcions durant el període considerat. Cal tenir en compte que les interrupcions que es consideren pels càlculs del $TIEPI$ i del $NIEPI$ són les de durada superior a tres minuts. A efectes del $NIEPI$ es compta una interrupció per a cada incidència. En aquesta tesi s'utilitzarà el $TIEPI$ (única dada disponible de les xarxes que s'estudien) com a mesura de la fiabilitat del subministrament.

La Figura 3.18 mostra l'evolució del $TIEPI$ per les xarxes XD1 i XD2. La xarxa XD2 considerada en el punt anterior com a menys òptima per dos dels tres mètodes d'optimització (EE(inf) i EE(0)), mostra també en aquest gràfic que té valors del $TIEPI$ superiors a la xarxa XD1. Així doncs sembla que hi ha una relació entre la topologia d'una xarxa i la seva "feblesa", entesa aquesta com a fiabilitat. Però tal i com s'ha dit a l'inici d'aquest punt, faltaria un model o hipòtesi per confirmar o validar aquesta conclusió.

¹³ BOE núm 89. ORDEN ECO/797/2002, de 22 de marzo, por la que se aprueba el procedimiento de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico.

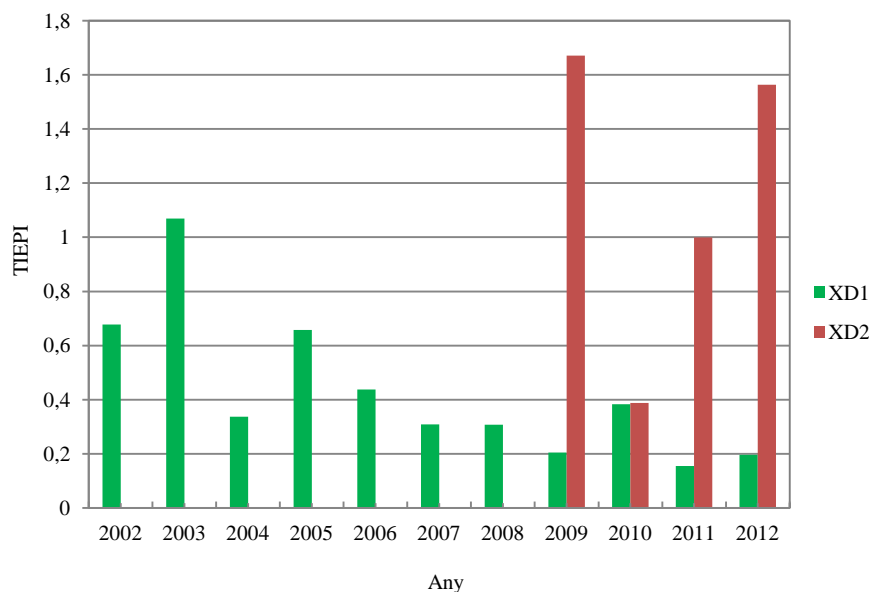


Figura 3.18 Evolució del valor del TIEPI per les xarxes XD1 i XD2

3.4 Resum

En aquest capítol s'ha utilitzat la teoria de xarxes complexes per estudiar les xarxes elèctriques, enfocant l'anàlisi en la seva estructura per un costat i en la seva dinàmica per un altre. És a dir, s'ha estudiat la seva topologia i distribució espacial així com el seu funcionament quant a fiabilitat.

S'ha aplicat la teoria desenvolupada en el Cas d'Estudi (II) amb les xarxes de l'UCTE i les xarxes de distribució XD1 i XD2. Un dels passos més importants en l'anàlisi de xarxes complexes és identificar el model més adequat de xarxa. Hi ha tres models generals: atzar (*random*), món petit (*small-world*) i lliure d'escala (*scale free*). S'ha comprovat que les xarxes de distribució XD1 i XD2 podrien ser xarxes lliures d'escala a trams, però els resultats no són conclouents per ser la mostra poc extensa. Després d'identificar el model de xarxa s'ha estudiat el grau de centralitat dels seus nusos i s'ha vist que les xarxes elèctriques de distribució són més radials i esglaonades, constituint una topologia simple amb camins amb pocs nusos. En un anàlisi espacial s'ha comprovat que les característiques de cada branca influeixen de manera important en el comportament i/o rendiment de tota la xarxa. S'han utilitzat els mètodes anomenats *shuffling*: el mètode canvi d'aresta, (an. *edge exchange*) i el mètode d'intercanvi de vèrtexs (an. *vertex swapping*). Dels resultats s'ha extret la conclusió que les xarxes de transmissió poden estar més a prop del seu òptim que les xarxes de distribució. També s'ha vist que en les xarxes on existeixen més branques de llarga distància i tenen antenes amb més nodes, podrien oferir una major feblesa en termes de fiabilitat. S'ha vist que la situació geogràfica i les constriccions espacials d'una xarxa poden jugar un paper important en la seva estructura. S'ha vist també que a mesura que creix la xarxa, el nombre de nodes en els llaços creix proporcionalment. Les implicacions que això pot tenir en la fragilitat de la xarxa són poc

concloents. En aquesta tesi únicament s'ha pogut constatar les diferències de fragilitat entesa com a fiabilitat, mitjançant l'anàlisi dels seus TIEPIs. S'ha vist que per relacionar les variacions estadístiques en la topologia d'una xarxa amb la seva feblesa cal desenvolupar un model o hipòtesi que permeti validar-ho.

3.5 Referències

- Ahn, Y.; Jeong, H. and Kim, B. J. Wiring cost in the organization of a biological neuronal network. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* . 2006, vol. 367, p. 531-537 .
- Ahuja, R. K.; Magnanti, T. L. and Orlin, J. B. *Network flows*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- Albert, R.; Albert, I. and Nakarado, G. L. Structural vulnerability of the north american power grid. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* . 2004, vol. 69, no. 2.
- Albert, R.; Jeong, H. and Barabási, A. L. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature* . 2000, vol. 406, no. 6794, p. 378-382 .
- Amaral, L. A. N.; Scala, A. and Barthélémy, M. Classes of small-world networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* . 2000, vol. 97, no. 21, p. 11149-11152 .
- Balakrishnan, V. K. *Graph theory*. 2nd ed. New York: Springer, 2012. ISBN 1461445280.
- Barabási, A. L. *Linked. The new science of networks*. Cambridge: Basic Books, 2002. ISBN 0786746963, 9780786746965.
- Barabási, A. L.; Albert, R. and Jeong, H. Scale free characteristics of random networks: the topology of the world wide web. *Physica A* . 2000, vol. 281, p. 69-77 .
- Barabási, A. L.; Albert, R. and Jeong, H. Mean field theory for scale free random networks. *Physica A* . 1999, vol. 272, p. 173-187 .
- Baran, M. E.; and Wu, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery* . 1989, vol. 4, no. 2, p. 1401-1407 .
- Barthélémy, M. Spatial networks. *Physics Reports* . 2011, vol. 499, p. 1-101 .
- Batty, M.; and Longley, P. *Fractal cities: a geometry of form and function*. San Diego: Academic Press, 1994. ISBN 0-12-455570-5.
- Boccaletti, S., et al. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports* . 2006, vol. 424, no. 4-5, p. 175-308 .
- Bompard, E.; Pons, E. and Wu, D. Analysis of the structural vulnerability of the interconnected power grid of continental Europe with Integrated Power System and Unified Power System based on extended topological approach. *Euro. Trans. Electr. Power* . 2012, vol. 23, p. 620-637 .
- Buhl, J., et al. Efficiency and robustness in ant network galleries. *European Physical Journal B* . 2004, vol. 42, p. 123-129 .

- Crucitti, P.; Latora, V. and Marchiori, M. Locating critical lines in high-voltage electrical power grids. *Fluctuation and Noise Letters* . 2005, vol. 5, p. 201-208 .
- Guimerà, R., et al. The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. *Proceedings of the National Academy of Sciences* . 2005, vol. 102, p. 7794-7799 .
- Huneault, M. A survey of the optimal power flow literature. *IEEE. Transactions on Power Systems* . 1991, vol. 6, no. 2, p. 762-770 .
- Jungnickel, D. Graphs, networks and algorithms. *Algorithm and Computation in Mathematics* . 1999, vol. 5.
- Latora, V.; and Marchiori, M. Efficient behavior of small-world networks. *Physics Review Letters* . 2001, vol. 87, no. 19.
- Latora, V.; and Marchiori, M. Economic of small-world behaviour in weighted networks. *European Physical Journal B* . 2003, vol. 32, no. 2, p. 249-263 .
- Milo, R., et al. Network motifs: simple building blocks of complex networks. *Science* . 2002, vol. 298, no. 5594, p. 824-827 .
- Moreno, Y.; Pastor, R. and Vazquez, A. Critical load and congestion instabilities in scale-free networks. *Europhysics Letters* . 2003, vol. 62, no. 2, p. 292 .
- Newman, M. E. J. *Networks: an introduction*. New York: Oxford University Press, 2010.
- Newman, M. E. J. The structure and function of complex networks. *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Review* . 2003, vol. 45, no. 2, p. 167-256 .
- Newman, M. E. J.; Strogatz, S. H. and Watts, D. J. Random graphs models of social networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* . 2002, vol. 99, no. 1, p. 2566-2572 .
- Pagani, G. A.; and Aiello, M. The power grid as a complex network: a survey. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* . 2013,.
- Pagani, G. A.; and Aiello, M. Towards decentralization: a topological investigation of the medium and low voltage grids. *Smart Grid, IEEE Transactions on* . 2011, vol. 2, p. 538-547 .
- Pastor, R.; and Vespignani, A. *Evolution and structure of the internet: A statistical physics approach*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. ISBN 978-0-521-82698-3.
- Porta, S.; Crucitti, P. and Latora, V. The network analysis of urban streets: a primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design* . 2006, vol. 33, no. 5, p. 705-725 .
- Ravasz, E.; and Barabási, A. L. Hierarchical organization in complex networks. *Physics Review E* . 2003, vol. 67(026112).
- Solé, R. *Xarxes Complexes*. Barcelona: Biblioteca Universal Empúries, 2009. ISBN 8497874013.
- Solé, R., et al. Robustness of the European power grids under intentional attacks. *Physics Review E* . 2008, vol. 77, p. 26102 .

Strogatz, S. H. Exploring complex networks. *Nature* . 2001, vol. 410, no. 6865, p. 268-276 .

Vragovic, I.; Louis, E. and Diaz, A. Efficiency of information transfer in regular and complex networks. *Physics Review E* . 2005, vol. 71, no. 3, p. 036122 .

Watts, D. J. *Six degrees. The science of a connected age*. New York: W.W. Norton & Company, Inc, 2003. ISBN 0393325423.

Watts, D. J.; and Strogatz, S. H. Collective dynamics of small-world networks. *Nature* . 1998, vol. 393, no. 6684, p. 440-442 .

4 Disseny i optimització del transport i distribució de l'energia elèctrica: Integració de les lleis d'escala i models de predicció de demanda d'energia elèctrica en el diagrama Perrine-Baum.

4.1 Estat de la qüestió

Tal i com s'ha vist en apartats anteriors, les lleis d'escala poden explicar certes variacions en les tendències de consum d'energia elèctrica d'un país o d'una regió, i per tant, poden ser d'utilitat en la previsió de la demanda del sistema de transport d'energia elèctrica. Es proposa en aquest capítol la seva integració com una variable més en la construcció i utilització del diagrama de funcionament elèctric conegut com a diagrama de Perrine-Baum. Es proposen també modificacions a la construcció clàssica d'aquest diagrama per permetre una representació pràctica i es pugui utilitzar com a eina per visualitzar i avaluar la capacitat d'una línia elèctrica per satisfer, en el temps, les exigències de la demanda així com per valorar estratègies per perllongar-la.

4.1.1 Previsió de la demanda

La recerca de models per predir la demanda d'energia, és un camp fonamental en el sector elèctric de qualsevol país desenvolupat. Els models han d'incorporar entre d'altres, aspectes econòmics, socials, tecnològics i ambientals, així com tenir en compte les decisions polítiques que puguin influir en les pautes de consum. La importància de la previsió de la demanda d'energia elèctrica, és especialment important tenint en compte que aquesta energia tal i com s'utilitza¹ no es pot emmagatzemar. Això implica que hi ha d'haver un equilibri constant a temps real entre producció i demanda. Per assegurar aquest objectiu s'han d'anticipar les necessitats que hi haurà en diferents horitzons temporals: a curt termini per proveir la demanda a temps real, a mig termini per planificar el manteniment de les infraestructures de generació i transmissió, i a llarg termini per planificar la construcció de noves plantes de generació i línies de transmissió.

Durant l'última dècada s'han utilitzat diferents models i algorismes matemàtics per tal de predir la demanda d'energia elèctrica. Els més utilitzades són: tècniques de cointegració amb modelat multivariant, tècniques de modelat univariant, mitjana mòbil autoregressiva (ARMA i ARIMA), models de xarxes neuronals i algorismes genètics (Geem et al. 2009, Kankal et al. 2011, Nasr et al. 2001, Ozturk et al. 2004). Les variables que utilitzen aquests mètodes poden venir de diferents fonts: preu de l'energia, històrics de consums d'energia, intensitat energètica, Producte Interior Brut (*Gross Domestic Product* o

¹ En forma de corrent altern trifàsic

GDP), renda per càpita, temperatura mitjana anual, graus dia, ràtio d'urbanització, taxa d'atur, disponibilitat de recursos, interaccions entre les indústries i els límits de capacitat sectorial, l'entorn de negocis, alternatives d'inversió, decisions estratègiques, esperança de vida, acceptació social de les energies renovables, evolució tecnològica i vida útil de les diferents tecnologies productores i/o nombre de turistes (Jebaraj et al. 2006, Egelioglu et al. 2001, Dincer et al. 1996). Per tal que aquestes tècniques puguin predir amb una certa fiabilitat la demanda futura d'energia cal que també tinguin en compte les noves tendències en la producció i ús de l'energia com poden ser per exemple, la planificació descentralitzada, l'eficiència energètica, l'evolució tecnològica, el reciclatge, la planificació integrada o el paper de les energies renovables (Jebaraj et al. 2006, Valero 2010).

A nivell oficial, a Espanya la *Comisión Nacional de la Energía* elabora un informe (CONSEJO CONSULTIVO DE ELECTRICIDAD 2012) on es preveuen les necessitats futures del país d'energia elèctrica i gas. L'objectiu és realitzar un anàlisi per al curt i mig termini sobre la cobertura de la demanda d'aquests sistemes, i detectar la influència que la variació en els terminis de construcció de les infraestructures pot tenir sobre aquesta cobertura. En l'estimació de la demanda anual a llarg termini es tenen en compte els factors de creixement de l'activitat econòmica i laboral, factors bàsics per analitzar la potencial evolució de la demanda elèctrica. El primer d'aquests factors és el que es considera de major pes en l'evolució de la demanda elèctrica (Figura 4.1), i en aquest sentit destaquen la influència de la demografia i la seva tendència². El càlcul del efecte de l'activitat econòmica el basen fonamentalment en l'estimació d'increments anuals del PIB, i l'efecte laboral en el nombre de dies laborables anuals. Respecte l'impacte que pot tenir l'efecte de la temperatura, consideren que pot ser rellevant per previsions a curt termini, però que no té massa repercussió a llarg termini.

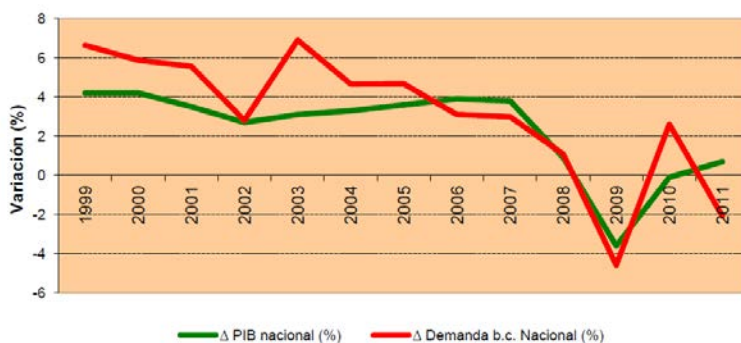


Figura 4.1 Evolució del PIB i de la demanda elèctrica. Font: (CONSEJO CONSULTIVO DE ELECTRICIDAD 2012)

Les previsions de la demanda se solen fer per diferents escenaris d'exigència del sistema i per períodes estacionals, ens els que es té en compte el factor climàtic. És d'especial interès preveure puntes de consum per tal de no deixar mai sense subministrament cap part de la xarxa elèctrica. Tal i com s'ha dit

² En aquest informe (CCE 2012) s'utilitzen dades del INE (Instituto Nacional de Estadística): <http://www.ine.es/>

més amunt, l'objectiu principal és preveure com es cobrirà la demanda, i per això es calculen valors indicatius de la capacitat de potència instal·lada necessària (Figura 4.2).

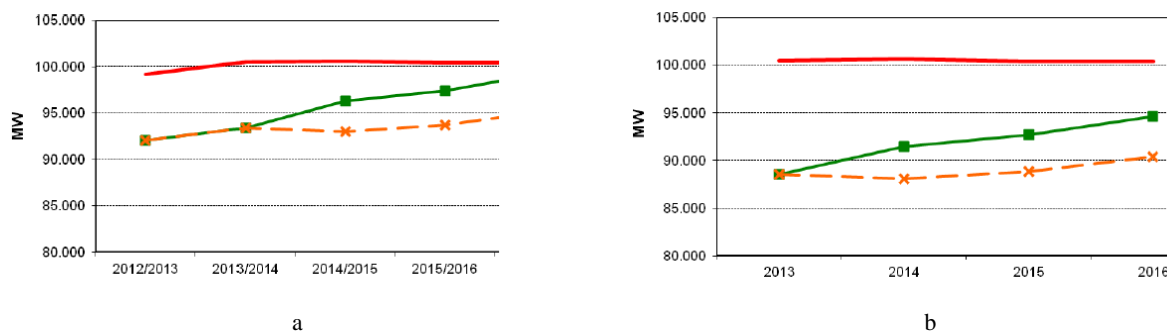


Figura 4.2 Comparació de la potència neta instal·lada prevista (escenari màxim amb línia verda i escenari central amb línia carbassa), respecte l'evolució de l'estimació de la potència neta instal·lada (línia vermella). El gràfic (a) és per la punta d'hivern i el (b) per la punta d'estiu. (CONSEJO CONSULTIVO DE ELECTRICIDAD 2012)

En les previsions es tenen en compte també els efectes que poden tenir les pautes de comportament de la població, nous consums i noves generacions. Un exemple de nou consum és el del vehicle elèctric que a poc a poc s'està incorporant en el sector del transport. Segons les previsions d'implantació actuals, podria tenir un pes específic elevat tant en el consum d'energia com en la demanda de potència elèctrica en les pròximes dècades. Com a exemple de nova generació actualment s'està considerant la generació distribuïda com l'energia solar fotovoltaica i l'energia eòlica. Existeixen grups de treball governamentals que estudien específicament aquests factors i així poder fer previsions que es puguin ajustar més a la realitat.

Fins ara en la previsió de demanda i planificació energètica no s'ha tingut en compte la grandària de les aglomeracions urbanes, la situació geogràfica d'aquestes o els consums desagregats en els sectors econòmics. Les lleis al·lomètriques vistes en els capítols anteriors, aplicades al consum total d'energia elèctrica en les aglomeracions urbanes, es poden utilitzar com una eina més i corregir les previsions de consum fetes pels algorismes anomenats més amunt (Kühnert et al. 2006, Bettencourt et al. 2007).

4.1.2 Topologia de la xarxa

La xarxa de transport connecta els centres de producció, que solen estar geogràficament dispersos, amb els centres de demanda, normalment prop de les ciutats o zones industrials. També connecta entre sí centres de producció i centres de demanda. Atès que aquesta xarxa és decisiva en l'equilibri dinàmic entre la producció i el consum, la seva topologia és típicament mallada. Això permet que les centrals puguin recolzar-s'hi en cas de fallades en la generació elèctrica i per tant, millorar substancialment la fiabilitat del conjunt. El control de la tensió dels nusos d'aquest sistema mallat, com poden ser els punts inicials o finals d'una línia elèctrica, es realitzen amb sofisticats sistemes, la majoria dels quals són automàtics. Poden haver-hi fins a tres sistemes de control: Primari, secundari i terciari. El control terciari determina

l'estat dels sistemes que poden aportar energia reactiva (bateries de condensadors, reactàncies, tomes dels transformadors de regulació) i les consignes de tensió dels nusos anomenats "pilot" (nusos que es consideren estratègics en el sistema mallat). Aquesta informació és enviada al sistema secundari. Aquest sistema és més local que el terciari i s'encarrega de mantenir la tensió als nusos pilot determinant les consignes de tensió dels generadors de diferents àrees. Aquestes consignes s'envien al sistema de control primari que s'encarrega de mantenir la tensió dels generadors concrets als nivells sol·licitats pel sistema secundari. Per augmentar o disminuir el valor de la tensió en un nus s'introdueix potència reactiva capacitiva o reactiva inductiva respectivament. Per altra banda, per raons econòmiques interessa que una línia sigui capaç de transportar la màxima potència possible. Aquest valor està condicionat per les característiques físiques de la pròpia línia, per les característiques de la carrega a la que alimenta i pels dispositius dels sistemes de control anomenats més amunt. Hi ha bàsicament dos mètodes de calcular la capacitat màxima de transport d'una línia, considerar la tensió de l'extrem emissor constant i la de l'extrem receptor lliure (més utilitzat en sistemes radials característics de les xarxes de distribució) o considerar ambdós extrems amb tensió constant (utilitzat més àmpliament en sistemes mallats com els de transport). La utilització del diagrama Perrine-Baum implica la utilització del primer mètode. Per tant, cal indicar que aquest diagrama és més indicat per sistemes radials i és limitat en sistemes mallats tot i que en aquests últims és d'utilitat per veure el comportament de la línia i la necessitat d'energia reactiva a injectar per tal de mantenir l'extrem receptor també amb tensió constant.

4.1.3 El consum

L'energia i la potència elèctriques són alguns dels conceptes que s'utilitzen per definir el consum d'electricitat en un sistema d'alta tensió. Tenint en compte que la potència és el valor instantani de l'energia consumida, a un determinat valor d'energia li poden correspondre diferents perfils de potència al llarg del temps. Per desenvolupar l'exemple del punt 4.4, s'ha considerat que les corbes de demanda diària, setmanal, mensual i anual d'Espanya no pateixen modificacions substancials al llarg dels períodes (anys) utilitzats per fer les previsions.

4.1.4 Al·lometria i capacitat màxima de transport d'una línia elèctrica

Normalment l'ampliació o reforç de la xarxa elèctrica d'alta tensió està supeditada a la construcció de noves centrals, l'ampliació de potència de les existents o al creixement dels centres de consum. Els motius són que els costos i els temps d'execució d'una línia de transport són significativament inferiors als d'una central elèctrica. La decisió de l'ampliació de la xarxa de transport sempre porta implícit un estudi dels costos d'inversió necessaris i el benefici que reporta al sistema, com poden ser, menors costos d'operació, menors pèrdues en el sistema o major fiabilitat en la cobertura de la demanda.

Evidentment qualsevol creixement del sistema de generació i de retruc del sistema elèctric de transport i distribució, estarà supeditat a l'augment del consum. Al llarg de les últimes dècades s'han desenvolupat diferents models i algorismes matemàtics per tal de predir la demanda d'energia elèctrica en una regió que

utilitzen multitud de variables com poden ser: el cost de les fonts d'energia, històrics de demanda, PIB, temperatures mitges anuals, etc (Horta et al. 2012). Darrerament també s'han considerat possibles tendències com la descentralització de la producció de l'energia, l'eficiència energètica, l'evolució tecnològica o la integració de les energies renovables.

Fins ara no s'ha tingut en compte la grandària de les poblacions quant a l'eficiència del consum per càpita de l'energia. Les tècniques d'anàlisi al·lomètric mostren que a mesura que creix el nombre d'habitants d'una població, pot créixer també el seu consum per càpita (Bettencourt et al. 2007), (Horta et al. 2010).

El diagrama de funcionament elèctric Perrine-Baum modificat d'una línia d'alta tensió que es proposa aquí, permet incorporar eixos graduats en unitats de potència activa per tal de predir la data aproximada en què la demanda de potència sobrepassarà la capacitat de transport de la línia (Bettencourt et al. 2007). Així doncs, els estudis al·lomètrics sobre el consum d'energia elèctrica poden ser una eina d'utilitat per predir la data en què la capacitat de transport d'una línia quedarà per sota de la demanda de la zona geogràfica que alimenta.

4.1.4.1 Influència de la regió escollida

Tal i com s'ha argumentat al punt 4.1.2, el transport en alta tensió sol presentar una topologia mallada. Per tant, la zona geogràfica abastada pel subministrament d'una línia elèctrica no es pot determinar amb fronteres nítides. En el cas de topologies radials no es presenta aquest problema ja que en l'extrem final de la línia comença una cadena de subestacions que redueixen la tensió progressivament fins a nivells aptes pel consum de l'energia elèctrica. La zona geogràfica associada a aquestes subestacions serà l'escollida per fer l'estudi al·lomètric. En el cas mallat s'imposa un estudi regional que tingui en compte un territori suficientment ampli com per assegurar que la variació de la seva demanda d'electricitat afecta directament a la línia que s'està dissenyant.

4.1.4.2 Importància dels sectors i subsectors econòmics

El consum total d'energia elèctrica de cada població, regió, país, o fins i tot de cada continent, es reparteix en els diferents sectors i subsectors econòmics que hi són presents. El percentatge de cada un d'aquests sobre el total del consum depèn del tipus d'activitat desenvolupada en la zona a estudiar. Com es pot veure a la Taula 4.1, poden diferir substancialment. En aquest cas les diferències entre les diferents províncies són importants. Els sectors residencial i serveis són presents sempre que hi hagi una població a la regió estudiada, però els sectors industrial i agricultura poden no ser presents o ser-ho amb percentatges sobre el consum total que poden variar molt. Pot ser d'utilitat calcular l'al·lometria de la regió a la qual subministra energia la línia elèctrica a estudiar segons els consums totals d'energia elèctrica, o desagregant per sectors econòmics (veure el punt 4.4)(Horta et al. 2010) .

Província\Sector	Indústria	Transport	Primari	Serveis	Residencial	Total
Almeria	41,8	0,2	25,9	86,7	92,2	246,8
Cadix	105,2	1,8	7,0	123,3	134,3	371,7
Còrdova	58,0	7,1	9,7	82,6	111,3	268,7
Granada	39,4	0,6	13,4	102,1	134,8	290,3
Huelva	105,3	0,3	10,3	62,5	63,9	242,2
Jaen	76,6	1,3	16,7	70,3	104,8	269,6
Màlaga	51,6	1,2	7,9	234,6	274,5	569,8
Sevilla	139,3	6,6	22,6	228,1	282,4	679,1
Andalusia	617,2	19,2	113,5	990,0	1.198,2	2.938,1

Taula 4.1 Dades del consum final d'electricitat en ktep per sectors a Andalusia a l'any 2009 (Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo)

4.1.4.3 Any de les dades utilitzades per l'estudi al·lomètric

Les dades de població i consums d'energia elèctrica que s'utilitzen per fer l'estudi al·lomètric corresponen a un any determinat. Aquest any no té per què coincidir amb l'any d'inici de la previsió que es vol fer de consums futurs. Per altra banda, durant els anys en què es vol fer la previsió, es considera que el coeficient al·lomètric es manté constant. ¿Com pot afectar un eventual canvi del coeficient al·lomètric en les previsions realitzades amb el diagrama Perrine-Baum modificat?

Segons l'equació al·lomètrica obtinguda, un augment del coeficient β sobre la població P , comportaria una estimació a l'alça del consum C (Equació 4.1). Contràriament, una disminució implicaria una estimació a la baixa. En l'equació, α és una constant característica del conjunt de poblacions a estudiar.

$$C = \alpha P^\beta \quad 4.1$$

Si es disposa de dades de consums i població per diferents anys, hi ha la possibilitat d'estudiar la variabilitat del coeficient al·lomètric β , i comprovar en el diagrama construït la influència que pot tenir aquesta variació en les previsions de demanda en la línia elèctrica. En funció del resultat, cal valorar en quina mesura pot variar el coeficient durant els anys en què es pretén fer la previsió.

4.1.4.4 Influència del nombre de municipis en l'estudi al·lomètric

Com en qualsevol estudi estadístic, el resultat d'estudiar l'al·lometria dependrà de la *mostra* que se'n reculli de la *població*. En el cas que ens ocupa, la *població* són tots els municipis de la regió que es vol estudiar, i la *mostra* és un conjunt de municipis escollit aleatòriament de la *població*. Com més gran sigui el número de municipis de la *mostra*, més encertades seran les estimacions i inferències que se'n facin. En tot cas en funció de les dades que es disposi, caldrà establir intervals de confiança per definir la grandària de la *mostra* i realitzar contrast d'hipòtesis.

4.1.5 El diagrama de funcionament Perrine-Baum d'una línia elèctrica.

El diagrama Perrine-Baum de funcionament d'una línia elèctrica d'alta tensió, (Checa 1988, Holladay 1922, Perrine et al. 1900) en algunes publicacions anomenat de Blondel i Thielemans (Ras 1973), permet representar gràficament les equacions de funcionament d'una línia elèctrica (4.2)

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{A} \cdot \bar{V}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{V}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2 \end{cases} \quad \begin{cases} \bar{V}_2 = \bar{A} \cdot \bar{V}_1 - \bar{B} \cdot \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 = -\bar{C} \cdot \bar{V}_1 + \bar{D} \cdot \bar{I}_1 \end{cases} \quad 4.2$$

on V i I corresponen a les tensions i les intensitats de línia en origen (subíndex 1) o final de línia (subíndex 2). Els coeficients A , B , C i D corresponen als paràmetres que defineixen a una línia com a quadripol. Per l'anàlisi que es porta a terme, només té interès representar gràficament les equacions V_1 i V_2 , ja que un dels objectius que es busca en aquest estudi és el d'avaluar diferents règims de càrrega (Horta et al. 2001) i un altre buscar el moment temporal en què la demanda d'energia elèctrica sobrepassa la capacitat de les línies que actualment estan en funcionament. La base del diagrama és la representació dels vectors dels sistemes d'equacions 4.2. Les dimensions relatives dels vectors dels gràfics que apareixen als diagrames presentats fins ara a les bibliografies (Checa 1988) no són reals ja que uns vectors són molt més grans que altres, cosa que impedeix dibuixar en un espai de paper de dimensions A4 a A2 tot el diagrama i obtenir lectures útils.

La Figura 4.3 representa la posició relativa dels vectors de les equacions 4.2 tenint en compte per un costat que s'ha pres com a referència el vector de la tensió d'arribada (V_2) a zero graus i per un altre costat que s'ha considerat un factor de potència unitat. Aquest diagrama publicat a les bibliografies tècniques (Checa 1988, Ras 1973) és teòric i presenta problemes de representació si es vol portar a terme amb un cas real. Les dimensions relatives dels vectors que apareixen al diagrama no són reals ja que uns vectors són molt més grans que altres. Si es representen amb dimensions relatives reals el triangle BI_2 és molt més petit que el triangle AV_2 (la distància OF és entre 10 i 15 vegades més gran que la distància FH) i si es vol representar en un paper de dimensions estàndards A4, A3 o A2 no es disposa de precisió per tal que el diagrama tingui un interès pràctic. Cal tenir en compte que el punt d'operació de la línia és dins de la zona ocupada pel triangle BI_2 .

4.2 Metodologia i hipòtesis: Proposta de modificació del sistema de traçat del diagrama Perrine-Baum

Es proposen en aquest capítol algunes modificacions a la teoria general del diagrama de funcionament elèctric de Perrine i Baum per tal de permetre el seu traçat pràctic, atès que presenta problemes de representació si es vol portar a terme amb un cas real.

El triangle OEF (Figura 4.3) és invariable ja que s'ha considerat la tensió V_2 fixada i els coeficients a' i a'' depenen de les característiques físiques de la instal·lació, i per tant, també estan fixats. En canvi, el triangle FGH no estarà fixat ja que precisament la utilitat del diagrama està en la possibilitat de poder llegir tensions d'inici de línia V_1 per diferents estats de càrrega.

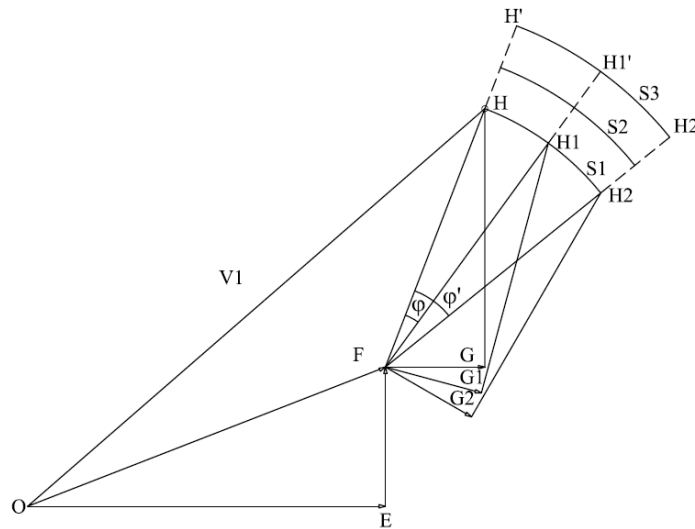


Figura 4.3 Posició relativa dels vectors del sistema d'equacions 4.2

Basant-se en el fet que el triangle OEF és invariant, la solució més còmoda és dibuixar únicament el triangle FGH i la prolongació de la recta OF dins del triangle FGH, que des d'ara anomenarem recta de caiguda de tensió. En efecte, aquesta recta s'utilitzarà per pal·liar l'absència del triangle OEF i permetre la lectura de la tensió V_1 sense necessitat de tenir dibuixat el punt O. Aquesta recta es determinarà, d'una banda, amb el càlcul de l'angle que forma amb el segment $b \cdot I_{2N} \cdot 3^{1/2} i$, de l'altra, amb la determinació del punt 0% de caiguda de tensió. L'angle que forma amb el segment $b \cdot I_{2N} \cdot 3^{1/2}$ és, de fet, l'angle α de situació del vector A. Aquest angle s'ha determinat amb el càlcul dels coeficients del sistema d'equacions de partida. La situació del zero de caiguda de tensió pot coincidir o no amb l'origen de coordenades del diagrama de funcionament elèctric. Per línies de longituds inferiors a 60-80 km es sol prendre A igual a 1 amb suficient aproximació, i en aquest cas el zero de caiguda de tensió coincidirà amb l'origen de coordenades. En cas que el mòdul d'A no sigui 1 (línies de longituds superiors a 80 km), el zero de caiguda de tensió se situarà sobre l'eix de caiguda de tensió a una distància de l'origen de coordenades calculada com:

$$\frac{V_2 - A \cdot V_2}{\text{escala de tensió}} \text{ [cm]} \tag{4.3}$$

Començant en aquest punt es dividirà l'eix de caiguda de tensió, segons els tant per cent de la caiguda de tensió sobre la tensió nominal. Es traçaran les rectes percentuals de caiguda de tensió perpendiculars a la recta de caiguda de tensió per les divisions. Aquestes rectes en realitat haurien de ser semicercles traçats amb centre a l'origen del vector V_1 . És evident que si no s'ha pogut dibuixar el vector V_1 per les raons ja comentades, tampoc no es podran dibuixar els semicercles. Per substituir-los es dibuixen les rectes percentuals. L'error comès és normalment molt petit, totalment assumible dins de l'exactitud que es

requereix. Això és perquè V_1 és de 10 a 15 vegades més gran que $B \cdot I_2$ (Figura 4.7) i l'arc que es mesura dins del triangle FGH (Figura 4.3) es pot assimilar a les rectes que es proposen.

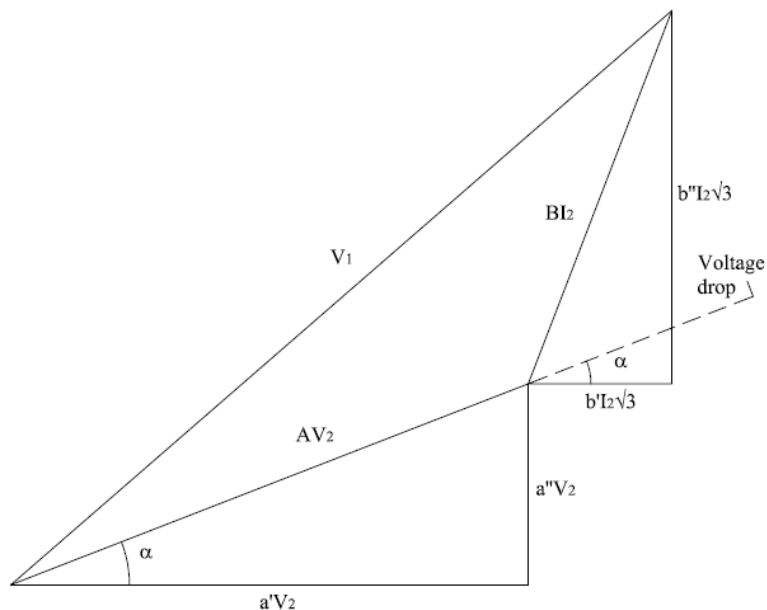


Figura 4.4 Posició de la recta de caiguda de tensió

És necessari comprovar l'error comès per aquesta aproximació i així quantificar el seu impacte en les lectures posteriors del diagrama. Segons la Figura 4.3 i la Figura 4.4 es poden escriure les relacions trigonomètriques següents:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{C}{A} \right); B = A \cdot \cos \alpha; A - B = A - A \cdot \cos \alpha \tag{4.4}$$

on la distància A és la longitud del vector V_1 i $A-B$ és l'error comès per considerar les perpendiculars en comptes dels arcs.

En una línia de 380.000 V i 455 A, és a dir una potència de transport de 300 MVA:

$$\alpha = 6,67^\circ; B = 152,47 \text{ cm}; A - B = 1,04 \text{ cm}$$

Això significa un error comès de 2.605 V sobre 380.000 V, és a dir un 0,685% d'error comès.

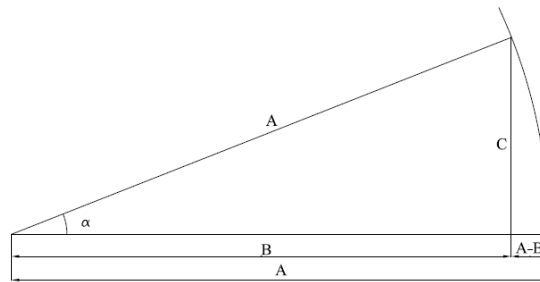


Figura 4.5 Càlcul de l'error comès en la construcció del diagrama

A la Figura 4.7 es presenta un exemple de traçat de diagrama de Perrine-Baum per una línia de característiques:

Freqüència	50 Hz
Tensió nominal	380 kV
Longitud	200 km
Potència	300 MVA
Alçada de la instal·lació	350 m
Temperatura mitjana	25°C
Clima	90 dies de pluja a l'any
Composició	Al-Ac (26+7)
Seccions	241,68 mm ² (Al), 39,42 mm ² (Ac), Total = 281,1
Secció equivalent de coure	152,01 mm ²
Diàmetre del conductor	21,793 mm ²
Radi del conductor	10,89 mm ²
Resistència elèctrica a 20°C	0,119 Ω/km
Configuració dels conductors	segons Figura 4.6

Taula 4.2 Característiques de la línia elèctrica escollida com a exemple

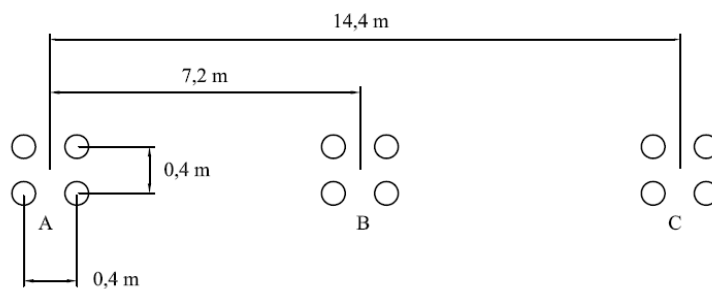


Figura 4.6 Disposició dels conductors de la línia exemple

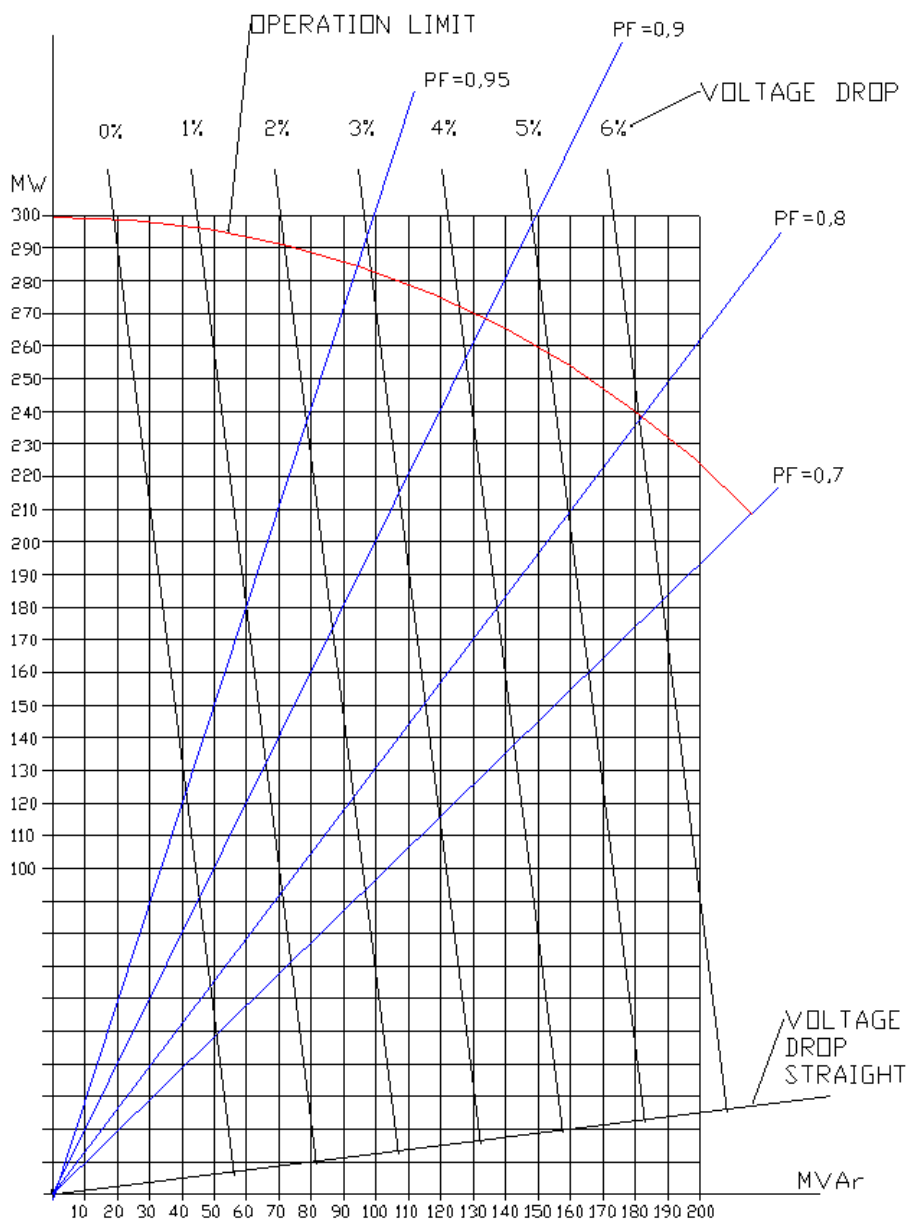


Figura 4.7 Exemple de representació d'un diagrama Perrine-Baum

4.2.1 Incorporació al diagrama de Perrine-Baum d'un eix per predir la obsolescència. La influència de les lleis d'escala en la predicció del consum

El diagrama presentat a la Figura 4.7 mostra totes les possibilitats teòriques de funcionament entre els factors de potència unitat i 0,7 inductius. En condicions reals el punt de funcionament de la línia es troba en una zona concreta del diagrama. Aquesta zona queda delimitada fonamentalment per dos llocs geomètrics. El primer és relatiu al factor de potència (F.P.) de treball. A la pràctica una línia d'alta tensió es dissenya per tal que treballi amb un F.P. inferior a 0,9, entre d'altres motius per reduir les pèrdues. El segon és relatiu a la potència aparent màxima de transport. El semicercle que parteix de la potència activa nominal delimita el funcionament real de la línia. A l'exemple de la Figura 4.7 la potència nominal és de

300 MW. El funcionament de la línia per sobre d'aquest semicercle suposaria superar la densitat de corrent admissible marcat pels reglaments (Moreno et al. 2009). La Figura 4.8 mostra la zona real de treball per una potència activa superior a 210 MW (el 70% de plena càrrega).

Les dades referents a demandes d'energia elèctrica es donen en GWh (REE 2011). Una de les utilitats del diagrama és poder llegir la capacitat de transport de potència activa per diferents factors de potència. Com es pot veure a l'exemple, la línia té una capacitat de transport de 268 MW si el F.P. és de 0,9 i de 285 MW si és de 0,95. Es proposa en aquest punt la incorporació d'un o més eixos paral·lels a l'eix de potència activa graduats en dates anuals on es poden llegir les dates en què es preveu que s'assolirà la potència activa corresponent. En la graduació d'aquests eixos es poden tenir en compte qualsevol dels criteris exposats més amunt (apartat 4.1.1). En la Figura 4.8 es mostren dos exemples de graduació dels eixos temporals basats en dos escenaris aplicats a la ciutat espanyola de Màlaga. Aquesta ciutat que pertany a la comunitat autònoma espanyola d'Andalusia tenia 568,305 habitants i un consum d'energia elèctrica de 3,013,733 MWh a l'any 2009.

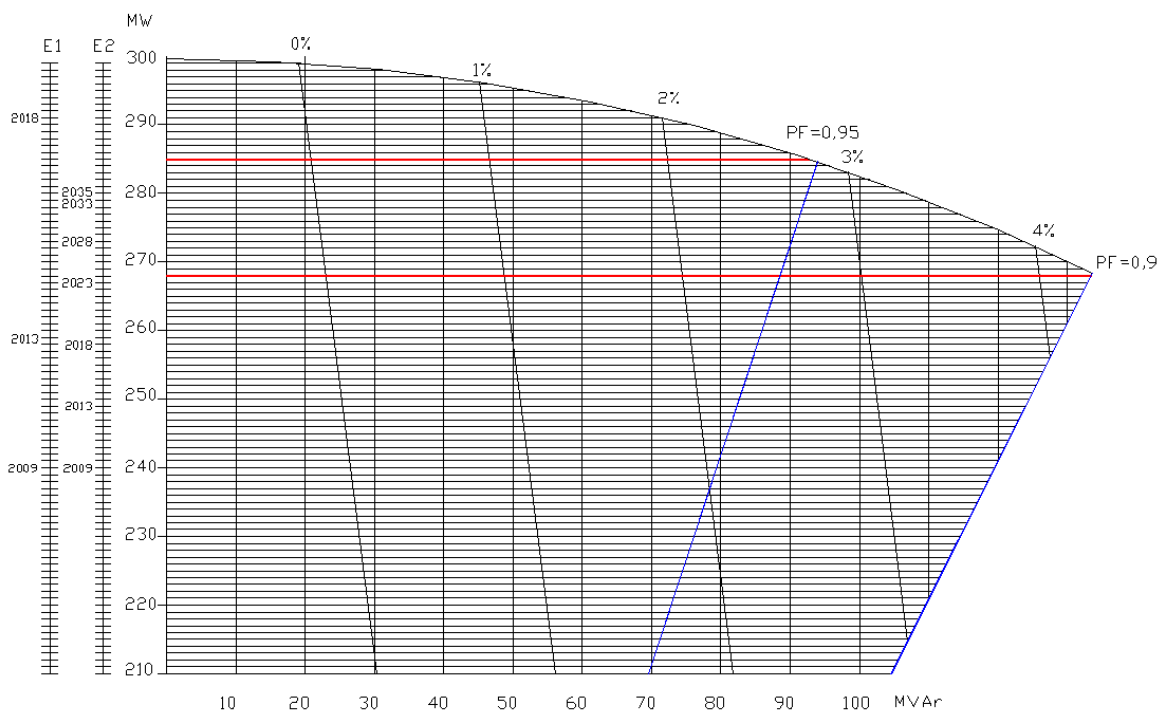


Figura 4.8 Aspecte del diagrama final

En un primer escenari s'ha tingut en compte únicament un creixement de la demanda d'energia elèctrica per criteris al·lomètrics utilitzant les dades de 649 municipis de la comunitat d'Andalusia. En un segon escenari (escenari E2) s'ha tingut en compte un estudi de prediccions fins el 2035 de consum d'energia a Espanya (Valero 2010). Aquest estudi presenta diferents escenaris dels quals s'ha escollit el M2E1 per fer aquest exemple de graduació de l'eix. En aquest escenari s'utilitzen les variables PIB per càpita, nombre

d'habitatges, preus de l'electricitat, grau d'utilització de la capacitat productiva de la indústria, temperatures mínimes, temperatures màximes, i eficiència energètica.

4.3 Impacte mediambiental associat al creixement al·lomètric de la demanda

Els sistemes de transport i distribució d'energia elèctrica es dissenyen per garantir un lliurament de l'energia des de les centrals als usuaris d'una manera fiable, segura i econòmica. Aquests sistemes han de satisfer la transmissió de l'energia demandada pels consumidors finals, amb les limitacions inherents al dimensionat dels propis sistemes. Segons el grau d'assoliment de fiabilitat, seguretat i minimització de costos, es poden distingir tres nivells de servei (Santacana, E., Zucco, T. and Feng, X.). En un primer nivell es pretén cobrir la demanda d'energia suposant unes condicions normals d'operació. En un segon nivell els sistemes de transport i distribució es sobredimensionen per poder garantir més fiabilitat i seguretat quant hi ha avaries. Això implica mallar més la xarxa, i crear per tant, circuits redundants. En un tercer nivell es busca poder escollir la font d'energia més adequada. És a dir, poder escollir entre les centrals productores disponibles, aquelles que es considerin més avantatjoses segons criteris prèviament definits, com per exemple, criteris mediambientals o econòmics. Aquest tercer nivell implica una xarxa més extensa i interconnectada.

L'eficiència d'un sistema de subministrament d'energia elèctrica es pot augmentar millorant l'ús dels recursos de generació o be disminuint les pèrdues en els sistemes de transport i distribució.

4.3.1 Millora de l'ús dels recursos de generació

El tercer nivell de servei descrit més amunt té com a objectiu últim triar la font d'energia més adequada segons criteris normalment econòmics i mediambientals. En l'àmbit mediambiental, una xarxa prou extensa i amb prou capacitat de transmissió, permet escollir de les centrals disponibles, les més respectuoses amb el medi ambient per tal de satisfer la demanda en cada moment. Cal tenir en compte que l'impacte sobre el medi ambient de les diferents tecnologies existents pot variar substancialment (Ministerio de Industria, Turismo y comercio). Per augmentar la capacitat de transmissió es poden construir noves línies, ampliar la capacitat de les existents o utilitzar les existents prop dels seus límits tèrmics. El diagrama Perrine-Baum pot ser d'utilitat en les tres solucions. Tal i com s'ha vist amb anterioritat, permet predir l'any aproximat en què se superarà la capacitat de transport d'una línia en fase de projecte. Ampliar la capacitat de transport d'una línia implica redissenyar-la. Les opcions més habituals són, ampliar el nombre de conductors de cada fase, incrementar la secció d'aquests, augmentar la tensió de la línia, utilitzar materials a alta temperatura. Per qualsevol d'aquestes opcions la utilitat del diagrama és la mateixa que si consideréssim la línia en fase de projecte. En la darrera solució, treballar més a prop dels límits de la capacitat de transport, el diagrama té una utilitat directa si es defineixen zones de treball pels diferents graus de càrrega a considerar. Normalment les línies treballen molt per sota de la seva capacitat tèrmica degut a limitacions de caigudes de tensió. Hi ha diferents tecnologies que es poden utilitzar en aquest cas per augmentar la capacitat de transport sense superar les restriccions de caiguda de

tensió, però totes aquestes necessiten d'un coneixement del factor de potència o de l'energia reactiva per a cada consum d'energia activa. El diagrama proposat permet una lectura directa d'aquesta dada, i per tant, facilita una primera aproximació de dimensionat d'aquestes tecnologies.

4.3.2 Reducció de les pèrdues en els sistemes de transport i distribució

Les pèrdues d'energia en els sistemes de transport i distribució estan entre el 1,5 i el 6 % del total de l'energia produïda [Taula 4.3].

Tensió de subministra	% de pèrdues
MT (1>kV>36)	6,00
AT (36>kV>72,5)	4,00
AT (72,5>kV>145)	3,00
AT (145>kV)	1,62

Taula 4.3 Coeficients de pèrdues en % de l'energia consumida. Font (Boletín Oficial del Estado et al. 2011a)

Aquestes pèrdues es deuen principalment a pèrdues per efecte joule als conductors i efecte corona a la superfície dels conductors i aïlladors. Les primeres són més importants, augmentant linealment amb el valor de la resistència del conductor i quadràticament amb el valor del corrent elèctric transportat. Per tant, com més gran és l'energia a transportar més pèrdues es donaran als sistemes de transport i distribució. Algunes de les tècniques per reduir les pèrdues són les mateixes que s'utilitzen per augmentar la capacitat de transport exposades en el punt anterior: augmentar la secció dels conductors, augmentar el nombre de conductors per fase, augment de la tensió, compensar potència reactiva. La utilitat del diagrama és la descrita en el punt anterior. Hi ha altres maneres d'augmentar l'eficiència: augmentar el nombre de línies subterrànies de distribució, xarxes de corrent continu, microxarxes per reduir la distància de transmissió, xarxes intel·ligents automatitzades, sistemes online en temps real, gestió intel·ligent de la càrrega, dispositius d'emmagatzematge d'energia. En tots aquests sistemes la utilitat del diagrama és molt més limitada, tot i que continua podent oferir informació rellevant respecte la línia a millorar.

4.4 Cas d'estudi (Ic): La Comunitat Autònoma d'Andalusia

Per tal de posar un exemple de l'ús del diagrama PB com a eina per la previsió del final de la vida d'una línia elèctrica s'ha escollit una línia ubicada en la comunitat d'Andalusia (Figura 4.13).

4.4.1 Anàlisi al·lomètric del consum d'energia elèctrica tenint en compte la grandària de la regió escollida

Com es pot veure a la Figura 4.13, la línia escollida forma part del sistema mallat de transport en alta tensió de la península. Les subestacions associades a la línia fan necessari considerar la major part d'Andalusia en l'estudi. En aquest exemple s'ha considerat tota la Comunitat Autònoma. Tot i que es disposa d'una base de dades dels consums elèctrics dels municipis d'Andalusia fins l'any 2010, s'han pres les dades de l'any 2002 (Taula 4.4) per fer el present exemple atès que són molt més complertes (Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo).

Nombre de municipis	769
Població amb menys habitants	58 hab.
Població amb més habitants	704.114 hab.
Nombre de poblacions amb menys de 1000 hab	190
Nombre de poblacions entre 1.000 i 10.000 hab	445
Nombre de poblacions entre 10.000 i 100.000 hab	122
Nombre de poblacions entre 100.000 i 1.000.000 hab	12
Consum total mínim anual	59 MW·h
Consum total màxim anual	2.298.994 MW·h
Mitja consum total per càpita anual	1,52 MW·h

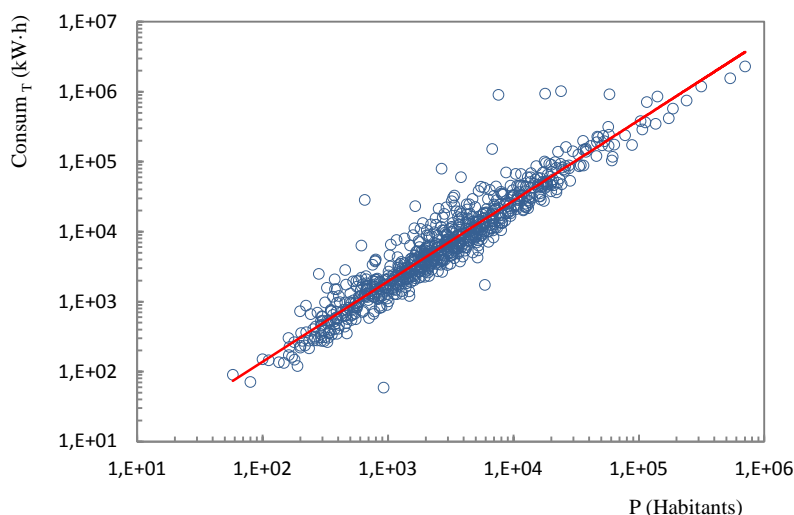
Taula 4.4 Cas d'estudi Ic: Dades de la comunitat d'Andalusia de l'any 2002

4.4.2 Anàlisi al·lomètric del consum d'energia elèctrica tenint en compte els sectors econòmics

La Figura 4.9 mostra l'escalat al·lomètric entre el consum total d'energia elèctrica de les 769 poblacions d'Andalusia i el nombre dels seus habitants (Bettencourt et al. 2007, Horta et al. 2010). La regressió potencial de les dades mostrades en eixos logarítmics ens permet obtenir l'equació 4.5

$$C_{Ti} = 0,6844 \cdot P_i^{1,15} \quad 4.5$$

on C_{Ti} és el consum total d'energia elèctrica en MW·h i P_i el nombre d'habitants. L'exponent característic de l'escalat igual a 1,15 ens indica un comportament superlinial, per ser major a la unitat, i per tant, es pot deduir que el consum agregat augmenta a mesura que augmenta el nombre d'habitants d'una població. Tal i com s'ha exposat en punts anteriors, aquest fet és justament el que fa que una línia elèctrica projectada sense tenir en compte el comportament al·lomètric de les poblacions que alimenta, pugui arribar abans de la data prevista a la càrrega màxima que pot suportar.



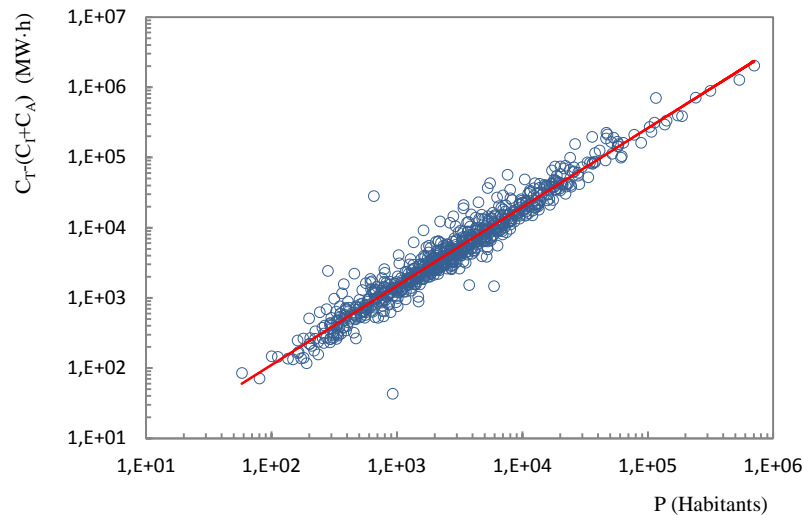
$$\text{Log } C_T = f(\text{Log } P)$$

Figura 4.9 Cas d'estudi Ic: Escalat al·lomètric entre el consum total d'energia elèctrica i el nombre d'habitants de les poblacions d'Andalusia

La Figura 4.10 mostra l'escalat al·lomètric entre el consum d'energia elèctrica total menys els consums Industrial i d'Agricultura i el nombre d'habitants de les poblacions d'Andalusia. Ara l'equació de la regressió potencial que s'obté es l'Equació 4.6

$$[C_{Ti} - (C_{Ii} + C_{Ai})] = 0,6261 \cdot P_i^{1,13} \tag{4.6}$$

on C_{Ii} i C_{Ai} són els consums d'energia elèctrica en MW·h dels sectors industrial i d'agricultura. En aquest cas l'exponent característic és 1,13 sent molt similar al 1,15 de l'equació 4.5



$$\text{Log } C_T - (C_I + C_A) = f(\text{Log } P)$$

Figura 4.10 Cas d'estudi Ic: Escalat al·lomètric entre el consum d'energia elèctrica total menys els consums Industrial i d'Agricultura i el nombre d'habitants de les poblacions d'Andalusia

4.4.3 Avaluació del coeficient al·lomètric β

Tal i com s'ha dit més amunt, s'ha utilitzat l'any 2002 com a base per fer l'estudi, per ser aquest el que té més dades disponibles. S'ha fet un estudi al·lomètric pels anys 2002 al 2010 per tal de determinar la variació del coeficient β durant aquests anys. Es pot veure a la Taula 4.5 que aquest coeficient varia entre 1,10 i 1,15. En aquest exemple s'ha comprovat la implicació que té en la previsió considerar el valor 1,10 o el valor 1,15 i el resultat ha estat que s'assoleix la capacitat màxima de transport amb una diferència de menys d'un any. Atès que la repercussió per l'estudi és mínima, es considerarà constant i igual a 1,15 el coeficient β durant el període en què es fa la previsió.

Any	Coefficient β	R ²	Nº de Poblacions
2002	1,15	0,9052	769
2003	1,15	0,9112	654
2004	1,14	0,9133	656
2005	1,14	0,9118	655
2006	1,13	0,9190	655
2007	1,13	0,9203	655
2008	1,12	0,9236	655
2009	1,10	0,9173	655
2010	1,10	0,9101	655

Taula 4.5 Cas d'estudi Ic: Resultats d'estudis de l'al·lometria d'Andalusia per diferents anys

Per altra banda s'ha fet també un estudi per avaluar com varia β segons el nombre de poblacions de les que es té informació. Per fer-ho s'han extret aleatòriament grups de poblacions d'un total de 768 de l'any 2002 (veure la Taula 4.6). Es pot observar en els resultats que la variació del coeficient pot ser important en funció del nombre de poblacions utilitzades a l'estudi. En el cas del present exemple, es disposa de tots els consums de les poblacions amb més de 80 habitants, un total 768. Es pot veure a la mateixa taula que per una mostra de 250 habitants o menys, la variació de β és més accentuada.

Nº de poblacions	Coefficient β	Variació de β	R ²
768	1,151	0%	0,9052
700	1,150	+0,087%	0,9044
650	1,152	-0,087%	0,9017
600	1,150	+0,087%	0,9053
550	1,150	+0,087%	0,9108
500	1,143	+0,695%	0,9124
450	1,137	+1,216%	0,9104
400	1,145	+0,521%	0,9092
350	1,146	+0,434%	0,9046
300	1,153	-0,174%	0,9156
250	1,166	-1,333%	0,9251
200	1,196	-3,910%	0,9256
150	1,205	-4,692%	0,9320
100	1,210	-5,126%	0,9208
50	1,261	-9,557%	0,8786

Taula 4.6 Cas d'estudi Ic: Valors de β i R² per diferents nombres de poblacions de l'any 2002

4.4.4 Previsió de la demanda d'energia elèctrica

Aplicant els conceptes vistos en els apartats anteriors, s'incorpora en aquest exemple quatre eixos al diagrama PB (Figura 4.14) corresponents als escenaris no al·lomètric, al·lomètric baix, al·lomètric mig i al·lomètric alt. L'eix *No Al·lometric Setting* mostrat a la Figura 4.14 no té en compte els conceptes de l'al·lometria. Està graduat tenint en compte una previsió de la demanda d'electricitat en Espanya realitzada pel període 2009 al 2035 (Valero 2010). Les variables exògenes que es tenen en compte en aquesta previsió són: PIB per càpita, parc d'habitatges, preus relatius constants de l'electricitat i el petroli,

grau d'utilització i capacitat productiva en la indústria, temperatures mínimes anuals, temperatures màximes anuals. La previsió es fa del 2009 fins el 2035 per tres escenaris econòmics diferents. Per aquest exemple s'ha escollit l'escenari anomenat *EI* d'aquesta previsió, que preveu una evolució de l'economia espanyola en la qual la sortida de la crisi econòmica que el país està travessant actualment comença a partir del 2012. D'aquesta previsió se'n desprèn que la taxa mitjana de creixement anual de la demanda d'energia elèctrica en Espanya és del 1,46%. Aquesta dada ha estat utilitzada per calcular la previsió de la Comunitat Autònoma d'Andalusia ja que és la segona amb més consum d'energia elèctrica (REE 2011), la segona amb més extensió d'Espanya amb 87.268 km² i la primera amb més població amb 8.202.220 habitants al 2002 (Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo). Aquestes dades justifiquen amb un cert grau de fiabilitat la utilització d'aquesta previsió. En aquest exemple només es pretén il·lustrar d'una manera pràctica la construcció del diagrama PB. Queda a criteri de l'enginyer que l'utilitzi, considerar taxes de creixement de la demanda d'energia elèctrica que responguin als escenaris o estudis previs que cregui convenient. Pels escenaris al·lomètrics s'han considerat en aquest exemple tres escenaris, baix, mig i alt, per il·lustrar les possibilitats de graduació dels eixos de previsió de demanda d'energia elèctrica. Corresponen a tres previsions diferents de creixement de la població en la Comunitat Autònoma d'Andalusia (Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo) (Taula 4.7).

Escenaris	Projecció de la població (hab · 10 ⁶)		
	2009	2025	2050
Baix	8,456	8,858	8,895
Mig	8,456	9,100	9,732
Alt	8,456	9,372	10,661

Taula 4.7 Cas d'estudi Ic: Previsió de la població d'Andalusia

A partir d'aquests escenaris i amb les expressions 4.5 i 4.6, s'ha calculat l'energia elèctrica total demandada i l'energia elèctrica total sense els sectors Industrial i Agricultura. Els resultats es mostren en la Figura 4.11 i la Figura 4.12. Les previsions de creixement anual en % s'han obtingut de les equacions de regressió mostrades a les mateixes figures.

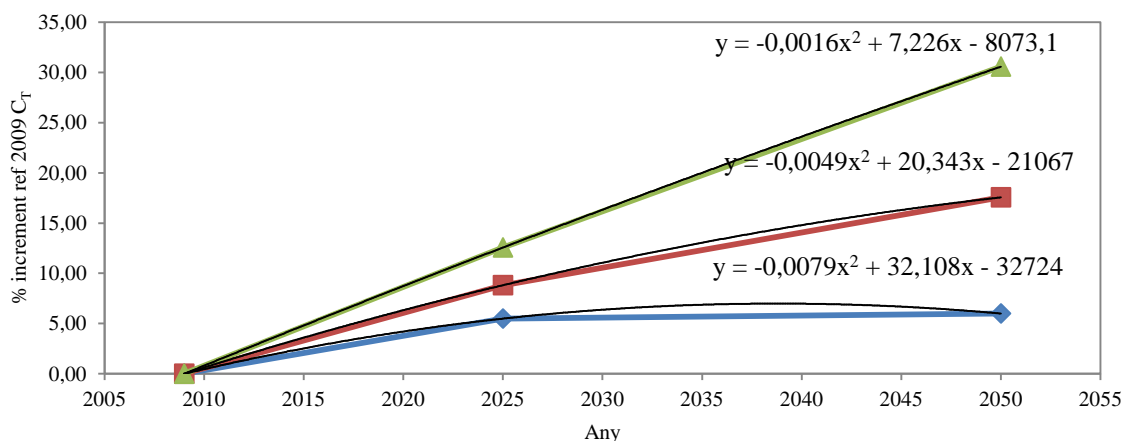


Figura 4.11 Cas d'estudi Ic: Increment del consum C_T respecte l'any 2009 (escenari baix amb rombes, escenari mig amb quadrats i escenari alt amb triangles)

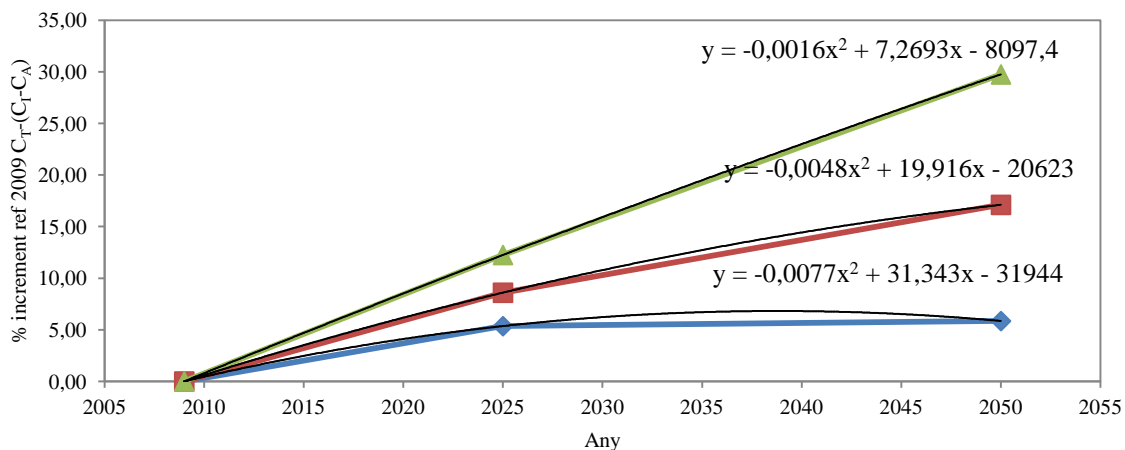


Figura 4.12 Cas d'estudi Ic: Increment del consum C_T - (C_T - C_A) respecte l'any 2009 (escenari baix amb rombes, escenari mig amb quadrats i escenari alt amb triangles)

4.4.5 Dades per la construcció del diagrama Perrine-Baum

Les dades necessàries de la línia elèctrica escollida dins de la comunitat d'Andalusia (Figura 4.13) per construir el diagrama PB es mostren en la Taula 4.8 (Boletín Oficial del Estado et al. 2011b). Amb aquestes dades s'ha construït el diagrama PB de la Figura 4.14 (Horta et al. 2012). El resultat de les operacions necessàries per la construcció del diagrama es mostren a la Taula 4.9



Figura 4.13 Cas d'estudi Ic: Situació de la línia utilitzada com a exemple en el sistema elèctric d'alta tensió

Denominació	Entrada i sortida en Córdoba de la Línia Cabra-Guadame
Freqüència	50 Hz
Tensió nominal	400 kV
Tensió nominal més elevada de la xarxa	420 kV
Temperatura màxima del conductor	85 °C
Capacitat tèrmica de transport per circuit	2441 MVA/circuit
Nre. de circuits	2
Nre. de conductors per fase	3
Tipus de conductor	Condor AW
Longitud total	47,25 km

Taula 4.8 Cas d'estudi Ic: Característiques de la línia elèctrica escollida com a exemple

La graduació dels eixos temporals s'ha realitzat a partir dels escenaris calculats a l'apartat 4.4.4, tenint en compte que la potència demandada a la línia a l'any 2010 és de 1700 MW per l'escenari no al·lomètric (Taula 4.10).

Model	Línia curta (47,25 km)
R_{fase}	0,014095 [Ω /km]
X_{fase}	0,34 [Ω /km]
Coefficients de transmissió	A = 1 [adim] B = 0,67+j16,07 [Ω] C = 0 D = 1 [adim]
Eix de potència	100 [MW/div] , 100 [MVA/div]
Eix de caiguda de tensió	1 [%/div]
Factor de potència mínim	0,85
Potència nominal	2441 MVA

Taula 4.9 Cas d'estudi Ic: Paràmetres utilitzats en la construcció del diagrama P-B

És important assenyalar que en aquest exemple els resultats obtinguts mostren que no hi ha diferències remarcables entre el model de previsió C_T i el model $C_T - (C_T + C_A)$. El model $C_T - (C_T + C_A)$ aconsegueix la capacitat de transport demandada pocs mesos després que el model de previsió C_T . Per tant, es considera que la influència del consum industrial i agricultura no és rellevant en la graduació dels eixos en aquest exemple. Per aquest motiu s'ha realitzat el diagrama PB de la Figura 4.14 considerant únicament el primer model. Tal i com s'ha exposat en punts anteriors, aquest resultat pot diferir en altres regions on els sectors industrial i agricultura poden influir notablement en els resultats de la previsió.

Any	Ref.	Baix		Mig		Alt	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW
2009 (ref.)	1700		1700		1700		1700
2010	1725	0.46	1733	0.63	1735	0.81	1739
2012	1776	1.35	1798	1.85	1807	2.42	1817
2016	1882	2.94	1932	4.21	1953	5.62	1977
2022	2052	4.92	2136	7.50	2180	10.36	2229
2026	2175	5.95	2276	9.54	2337	13.48	2404
2028	2239	6.39	2348	10.51	2418	15.03	2494
2030	2305	6.76	2420	11.45	2499	16.57	2587
2032	2373	7.09	2493	12.35	2583	18.10	2680
2033	2407	7.23	2530	12.79	2625	18.87	2728

Taula 4.10 Cas d'estudi Ic: Escenaris baix, mig i alt, per les projeccions de demanda de potència expressades en tant per cent d'increment i en valor absolut. S'han utilitzat les projeccions de la població (Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo), i la previsió d'augment de la demanda d'energia elèctrica (Valero 2010). L'any de referència és el 2009 i la potència demandada 1700 MW

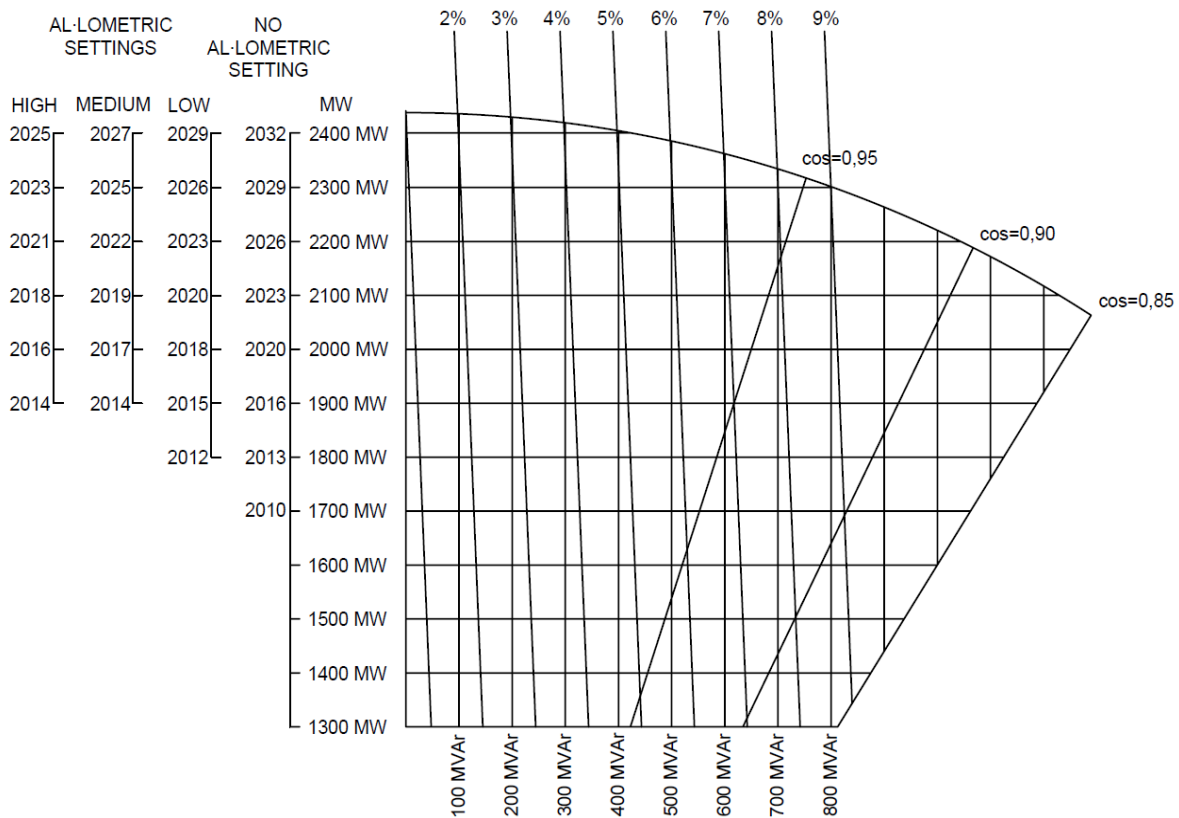


Figura 4.14 Cas d'estudi Ic: Diagrama Perrine-Baum de la línia de l'exemple

4.4.6 Interpretació del diagrama

Les lectures sobre el diagrama de PB poden aportar molta informació sobre la línia elèctrica que s'està projectant. En aquest apartat es donen alguns exemples (Figura 4.15):

- Si es considera un escenari no al·lomètric, i un factor de potència de 0,95 (habitual en els sistemes de transport d'alta tensió) la potència nominal de la línia s'assoleix a l'any 2029. La caiguda de tensió per aquest valor de potència és del 8,5 %.
- Considerant els escenaris al·lomètrics alt, mig i baix la potència nominal s'assoleix als anys 2023, 2025 i 2026 respectivament. És a dir, el període de temps en què la línia pot satisfer la demanda de potència s'escurça entre un 35% i un 20% respecte un escenari no al·lomètric.
- Si es vol continuar augmentant la potència de subministrament caldria augmentar el factor de potència. Si es disminueix fins a un 5% la cdt, es podrien transportar 2400 MW. Per aconseguir-ho caldria incorporar al sistema 350 MVA de potència reactiva (bateries de condensadors, compensadors síncrons, etc) que correspon a la diferència entre les lectures a l'eix de potència reactiva dels punts de funcionament indicats al diagrama de la Figura 4.15. En aquest cas s'aconseguiria prolongar la vida de la línia fins l'any 3032, o 2025/2029 segons es consideri o no escenaris al·lomètrics.

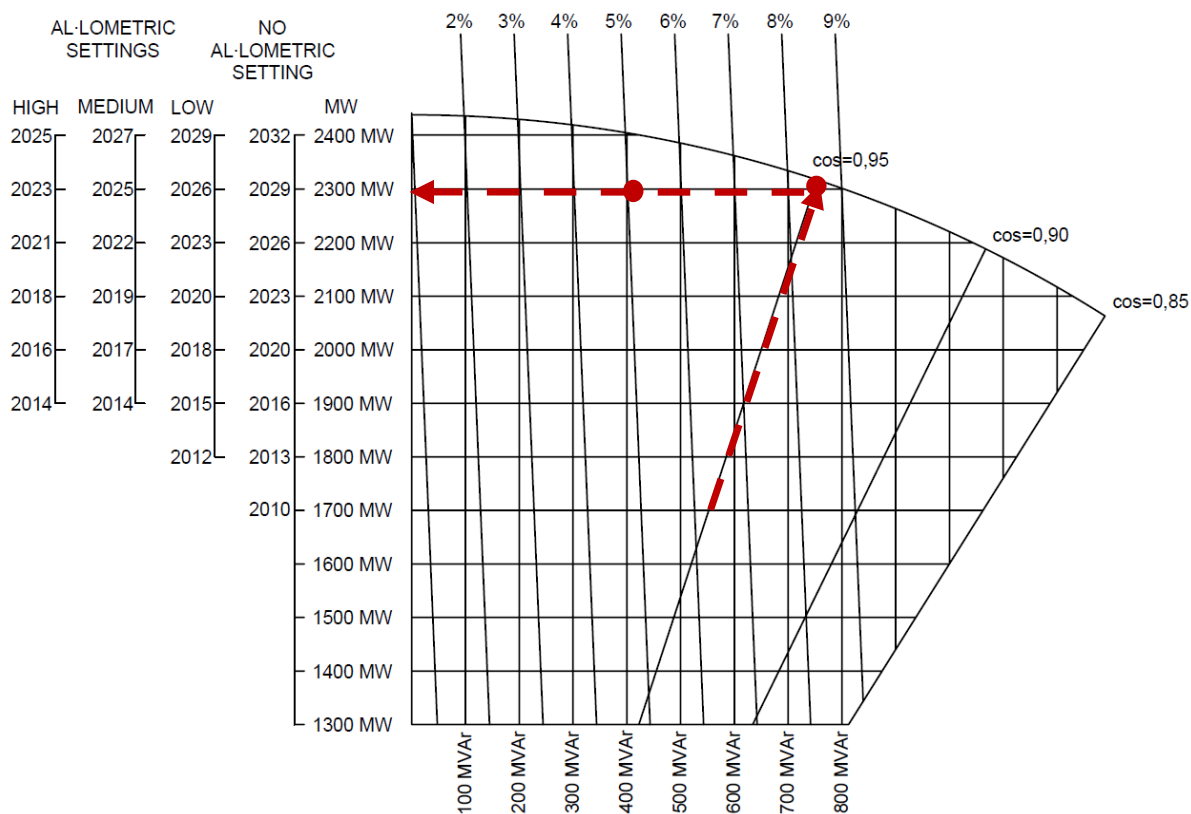


Figura 4.15 Cas d'estudi Ic: Lectures al diagrama PB

4.5 Resum

Es presenten a continuació a mode de síntesi, els nuclis conceptuals més importants tractats en aquest capítol, així com les conclusions més rellevants:

- Es proposen modificacions a la construcció clàssica del diagrama de funcionament elèctric Perrine-Baum per transformar-lo en una eina de representació gràfica, pràctica i útil, per ser usada en el projecte de línies elèctriques d'alta tensió i com a recurs docent per afavorir la comprensió d'aquestes infraestructures.
- Els estudis al·lomètrics sobre el consum d'energia elèctrica poden ser una eina d'utilitat per predir la data en què la capacitat de transport d'una línia quedarà per sota de la demanda de la zona geogràfica que alimenta. Es planteja en aquest capítol l'ús de l'al·lometria per incorporar eixos temporals al diagrama modificat de funcionament elèctric Perrine-Baum d'una línia d'alta tensió, per tal de predir la data aproximada en què la demanda de potència sobrepassarà la capacitat de transport de la línia.

- Hi ha aspectes exògens relacionats amb la línia (topologia de la xarxa, tipologia de consum), i limitacions de les dades utilitzades en l'estudi al·lomètric (any de les dades usades, regió geogràfica d'estudi, influència dels sectors econòmics, nombre de municipis usats) que poden minvar la fiabilitat de les lectures del diagrama.
- Les lectures del diagrama poden ser útils com a eina per avaluar el impacte ambiental de la línia com a conseqüència de pautes al·lomètriques de consum.
- El diagrama pot ser útil per augmentar l'eficiència en l'ús dels recursos de generació i per reduir les pèrdues en els sistemes de transport i distribució.
- S'ha implementat el diagrama modificat com a eina docent en l'assignatura *Càlcul i disseny de Línies Elèctriques d'Alta Tensió* de la titulació de *Grau en Enginyeria Elèctrica* en els anys 2010 i 2011. Els resultats acadèmics dels estudiants mostren al ser comparats amb els resultats obtinguts en anys anteriors una millora notable.
- El cas d'estudi presentat en aquest capítol mostra que la capacitat de transport d'una línia pot ser superada per la demanda set anys abans del previst sense utilitzar el diagrama modificat que incorpora eixos temporals.

4.6 Referències

Bettencourt, Luis M. A., et al. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *P. Natl. Acad. Sci. USA* . 2007, vol. 104, no. 17, p. 7301-7306 .

Boletín Oficial del Estado and Ministerio de Indústria, Energía y Turismo. *Orden IET/3586/2011, de 30 de diciembre, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2012 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial*. 20646. Madrid: 2011a.

Boletín Oficial del Estado and Ministerio de Política Territorial y Administración Pública. *Anuncio de información pública de la Dependencia del Área de Industria y Energía de la Subdelegación del Gobierno en Córdoba de solicitud de declaración de impacto ambiental y autorización administrativa de la línea aérea de transporte de energía eléctrica, a 400 kV, denominada "Entrada y salida en Córdoba de la línea Cabra- Guadame"*. 20269. Madrid: 2011b.

Checa, L. M. *Lineas de Transporte de Energía*. 3rd ed. Barcelona: Marcombo, 1988. ISBN 8426706843.

CONSEJO CONSULTIVO DE ELECTRICIDAD. Informe marco sobre la demanda de energía eléctrica y gas natural, y su cobertura. [en línia]. 2012. [Consulta: 7 gener 2013]. Disponible a: http://www.cne.es/cne/Publicaciones?accion=3&id=3050&id_nodo=32.

Dincer, I.; and Dost, S. Energy intensities for Canada. *Applied Energy* . 1996, vol. 53, no. 3, p. 283-298 .

Egelioglu, F.; Mohamad, A. A. and Guven, H. Economic variables and electricity consumption in Northern Cyprus. *Energy* . 2001, vol. 26, no. 4, p. 355-362 .

Geem, Z. W.; and Roper, W. E. Energy demand estimation of South Korea using artificial neural network. *Energy Policy* . 2009, vol. 37, no. 10, p. 4049-4054 .

Holladay, C. H. A Graphic Method for the Exact Solution of Transmission Lines. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the* . 1922, vol. XLI, p. 785-793 .

Horta, R.; and Candela, J. I. *Teoria, càlcul i disseny de línies elèctriques*. Primera ed. Barcelona: Edicions UPC, 2001. ISBN 84-8301-462-9.

Horta, R.; and Rosas, M. Modification of the Perrine-Baum Diagram to Improve the Calculation of High Voltage Transmission Lines. *IEEE. Transactions on Education* . 2012, vol. 99.

Horta, R.; Rosas, M. and Valverde, S. Discerning electricity consumption patterns from urban allometric scaling. *Complexity in Engineering Conference* . 2010,.

Jebaraj, S.; and Iniyar, S. A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2006, vol. 10, no. 4, p. 281-311 .

Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo. Estadísticas por temas. Proyección de la población activa de Andalucía 2009-20035 [en línia]. [Consulta: 20 gener 2013] Disponible a:
<<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/temas/subtema0201.html>>.

Junta de Andalucía, IEA and Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo. Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía (SIMA) [en línia]. [Consulta: 20 gener 2012] Disponible a:
<<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/index2.htm>>.

Kankal, M., et al. Modeling and forecasting of Turkey's energy consumption using socio-economic and demographic variables. *Applied Energy* . 2011, vol. 88, no. 5, p. 1927-1939 .

Kühnert, C.; Helbing, D. and West, G. B. Scaling laws in urban supply networks. *Physica A* . 2006, vol. 363, no. 1, p. 96-103 .

Ministerio de Industria, Turismo y comercio. Energía y desarrollo sostenible. Energías renovables 2005-2010 [en línia]. [Consulta: 23 gener 2013] Disponible a:
<<http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/energiarenovable/plan>>.

Moreno, J., et al. *Reglamento de líneas eléctricas de alta tensión y sus fundamentos técnicos*. Madrid: Paraninfo, 2009. ISBN 978-84-283-3034-3.

Nasr, G. E.; Badr, E. A. and Younes, M. R. Neural Networks in forecasting electrical energy consumption. *FLAIRS-01 Proceedings* . 2001, p. 489-492 .

Ozturk, H. K., et al. Residential-commercial energy input estimation based on genetic algorithm (GA) approaches: an application of Turkey. *Energy and Buildings* . 2004, vol. 36, no. 2, p. 175-183 .

Perrine, F. A. C.; and Baum, F. G. The Use of Aluminium Line Wire and Some Constants for Transmission Lines. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions* . 1900, vol. XVII, p. 345-384 .

Ras, E. *Teoría de líneas eléctricas*. 2nd ed. Barcelona: Marcombo, S.A., 1973. ISBN 9788460066828.

REE, Red Eléctrica Española. Demanda de energía eléctrica en el sistema peninsular. Boletín Mensual. Enero 2011 [en línea]. Madrid, 2011. [Consulta: 23 gener 2013]. Disponible a:
<http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/iap_indicadores-Mar2011.pdf>.

Santacana, E., Zucco, T. and Feng, X. Energía para la eficiencia [en línea]. [Consulta: 10 febrer 2013]
Disponible a:
<[http://www02.abb.com/global/boabb/boabb011.nsf/0/296d17557ed5bb7ac1257a7900604334/\\$file/Energ%C3%ADa+paras+la+eficiencia.pdf](http://www02.abb.com/global/boabb/boabb011.nsf/0/296d17557ed5bb7ac1257a7900604334/$file/Energ%C3%ADa+paras+la+eficiencia.pdf)>.

Valero, M. La demanda de electricidad en España. Previsión para el 2035. *Boletín Económico ICE* . 2010, no. 2987, p. 23 .

5 Conclusions

En aquesta tesi s'han fixat com a objectius genèrics principals, aplicar el concepte de *les lleis d'escala* i utilitzar els coneixements actuals sobre *complexitat estructural*, ambdós per millorar el disseny i optimitzar les xarxes de transport i distribució d'energia elèctrica. Sense perdre de vista aquests objectius, al llarg dels 4 capítols de la tesi s'han aplicat aquestes i altres eines no tingudes en compte en un inici (per exemple les formulacions dels Models Gravitacionals), per tal d'oferir una perspectiva d'aquestes infraestructures diferent a la convencional, i amb la intenció d'elaborar propostes específiques. Si bé s'ha aconseguit una visió nova i en certa manera transgressora¹ de les infraestructures elèctriques, no s'han aconseguit obtenir en el grau esperat “receptes” per millorar-ne el seu disseny. S'ha constatat durant el treball que hi ha una dificultat més gran de l'esperada per obtenir-les a partir de l'aplicació d'aquestes eines. D'altra banda han sorgit propostes en direccions no esperades com per exemple en l'àmbit de la docència.

En aquest capítol es procura donar una visió de conjunt de tot el treball, mentre es resumeixen les aportacions metodològiques, les conclusions principals i secundàries, tot i proposant noves línies d'investigació que poden sorgir d'aquesta tesi o de treballs que s'han publicat durant el període de realització de la tesi. S'identifiquen en el text en paràgrafs independents amb els símbols:

■ Aportacions metodològiques

► Conclusions principals

> Conclusions secundàries

→Noves línies d'investigació

5.1 Aportacions, conclusions i noves línies d'investigació

La humanitat s'enfronta actualment a alguns reptes i desafiaments a escala global, la solució dels quals condicionarà i configurarà les societats futures. Un d'aquest reptes és el que planteja les conseqüències de l'explotació dels recursos naturals de la terra que s'ha fet en els últims decennis a un ritme no comparable amb etapes anteriors, i que ha provocat una degradació dels ecosistemes per contaminació i pèrdua de biodiversitat a escala terrestre. En un altre baula de la cadena tecnològica apareix una altra problemàtica, la solució de la qual és cabdal per aconseguir desenvolupar-nos d'una manera sostenible: la reducció de

¹ Ja que actualment l'enginyeria elèctrica es pot considerar una disciplina “immobilista” pel fet d'utilitzar únicament eines estrictament basades en la tecnologia.

les emissions contaminants. Esdevé també un desafiament, un dels més urgents i possiblement un dels més complexos, trobar camins que disminueixin o eliminin els greus desequilibris socials, tant a escala local, com nacional o internacional. El transport i el consum de l'energia elèctrica estan lligats d'una manera o altre amb aquestes i altres problemàtiques.

> A Espanya no existeix relació geogràfica entre els centres de generació d'electricitat i els punts de consum, és a dir, no hi ha correlació entre el mapa de generació elèctric i la localització de la població. Les centrals més grans es troben en la franja nord o prop de la costa, amb majors recursos hidràulics i reserves de carbó més abundants. El sistema de transport i distribució d'electricitat d'Espanya està centralitzat, i les seves línies suposen unes pèrdues d'energia molt importants. Altrament, la UE postula per una energia distribuïda, és a dir, centres petits de generació i xarxes curtes pel consum local.

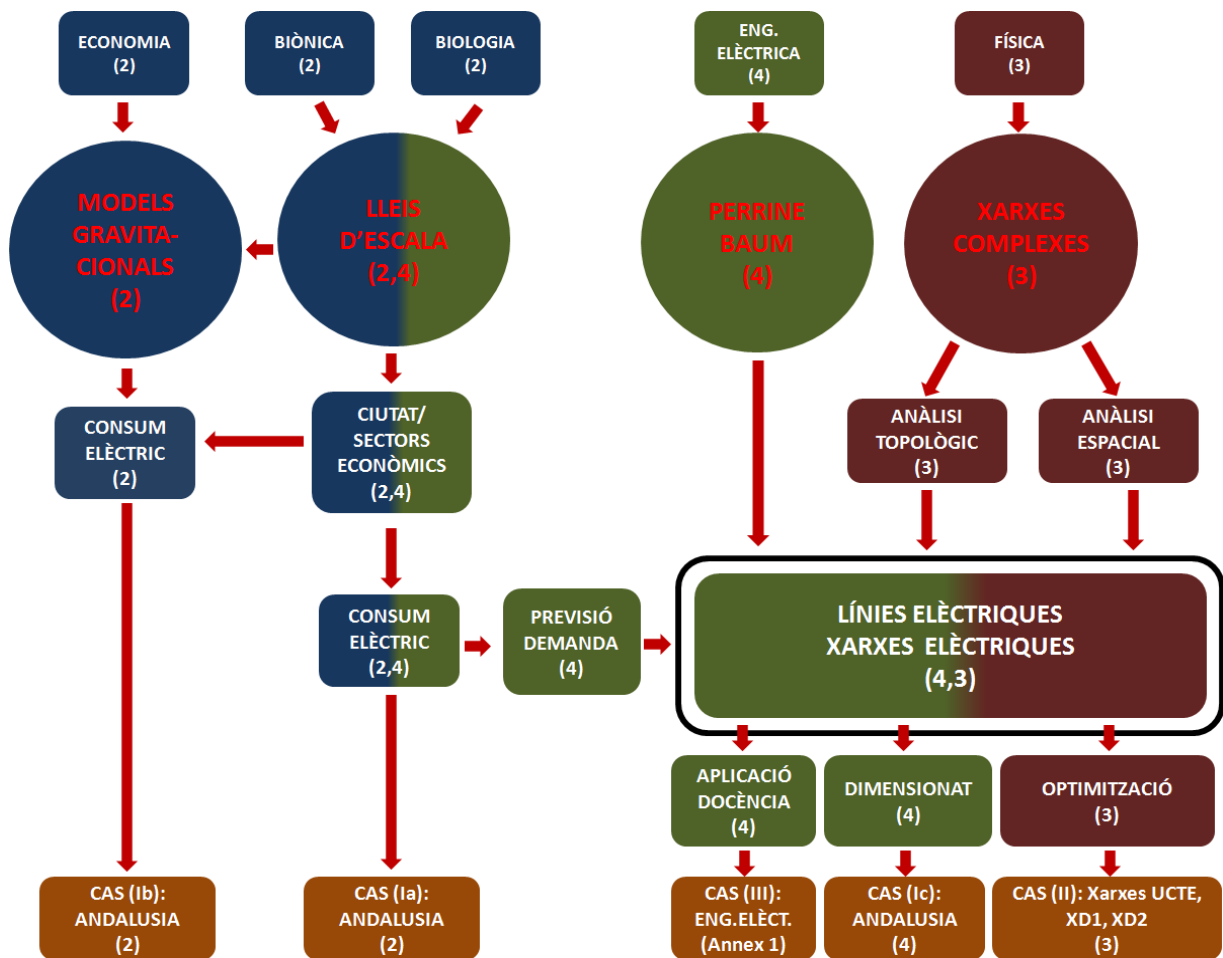
Al llarg dels capítols d'aquesta tesi, s'han emprat conceptes d'àrees de coneixement ben diferents com la biologia, l'estadística, l'economia o la física, per aportar altres punts de vista més transversals, amb la intensió que siguin complementaris als aportats per l'enginyeria convencional i amb l'objectiu de trobar finalment solucions per millorar el disseny i optimitzar les línies elèctriques d'alta tensió. Amb aquesta intensió de transversalitat s'han utilitzat conceptes com la biònica².

> La biònica, tot i que s'està aplicant en el món de l'enginyeria des de fa anys, no s'està emprant en totes les seves àrees amb la mateixa intensitat. En el cas de l'enginyeria elèctrica aquest concepte és quasi inexistent, al contrari del que passa per exemple en l'enginyeria mecànica.

Les cèl·lules, com les ciutats, necessiten energia, evacuar residus i regular les seves activitats internes. Es creu que la selecció natural ha resolt aquest problema mitjançant un conjunt de xarxes de topologia jeràrquica i característiques fractals, com per exemple el sistema circulatori dels animals, el sistema respiratori i neuronal o el sistema vascular de les plantes. De manera que el metabolisme i consegüentment la distribució d'energia i recursos, juguen un rol universal en l'estructura i organització de tota la vida en totes les seves escales. Tot i les diferències entre una producció natural i una producció artificial, ambdues estan subjectes a les mateixes lleis físiques. En aquesta tesi es reflexiona si les produccions humanes (les línies i les xarxes elèctriques) han d'imitar o no a les naturals (les xarxes biològiques) segons els objectius perseguits i la manera d'assolir-los.

En el capítol 2 i 4 d'aquesta tesi (Figura 5.1) la biònica s'ha emprat mitjançant els conceptes de l'al·lometria i les lleis d'escala per establir el paral·lelisme entre el consum energètic dels organismes vius i el consum d'energia elèctrica de les aglomeracions humanes, ja siguin poblacions, ciutats o regions. Una correcta caracterització del seu consum ha de permetre dimensionar millor les línies que constitueixen les xarxes que han de subministrar l'energia elèctrica necessària.

² En el capítol 1 s'aborda aquest concepte i altres relacionats amb ell.



Simbologia



Figura 5.1 Gràfic conceptual. Els nombres entre parèntesis fan referència als capítols de la tesi on es tracten els conceptes

En biologia, l'al·lometria s'expressa normalment en termes d'exponents d'escala basats en la massa. En el món animal i vegetal hi ha aproximadament uns 27 ordres de magnitud respecte la massa corporal dels diferents organismes que els constitueixen, des dels organismes unicel·lulars als grans mamífers. Tot i que presenten gran diversitat quant a formes, mides i característiques, sembla que tots aquests obeeixen unes simples lleis d'escala empíriques (Eq. 5.1) que expliquen com canvien les seves característiques en funció de la seva grandària en tot el rang d'ordres de magnitud que presenten:

$$Y = Y_0 M^\beta \tag{5.1}$$

on Y_0 és una constant pròpia del tipus d'organisme i β és l'exponent d'escala. Quan Y és l'energia necessària per viure (el metabolisme), l'exponent β és inferior a la unitat, conseqüentment l'energia per sustentar un gram de massa d'un organisme decreix amb les dimensions d'aquest. Per contra les màquines inventades per l'home tenen un coeficient d'escala aproximadament d'1 per l'energia consumida respecte la massa. En comparar aquest valor amb els dels animals, es podria dir que l'eficiència de les màquines inventades per l'home no depèn de les seves dimensions, i en canvi en els animals sí que hi ha una dependència: un increment de les dimensions suposa una major eficiència. Els exponents d'escala menors a la unitat (escalat sublineal), com els observats en els éssers vius, s'associen a comportaments òptims i eficients, en els quals a mesura que creix la grandària de l'organisme, apareixen economies d'escala. Exponents d'escala superlineals (superiors a la unitat) impliquen que a mesura que creix l'ens creix el consum per sobre del valor de creixement que tindria si aquest fos proporcional a l'augment de la població. No hi ha equivalent a la natura, sent el creixement d'aquests sistemes accelerat. Atès que els recursos són finits, aquest tipus de creixement conduiria en un període finit de temps a un col·lapse del sistema. La utilització dels indicadors *per càpita* (renda, PIB, productivitat, etc.) per caracteritzar una societat impliquen assumir que, de promig, certes característiques específiques de les zones urbanes augmenten linealment amb la grandària de la població. No obstant, aquesta aproximació pot no ser adequada per caracteritzar i comparar ciutats perquè ignora els fenòmens emergents de les aglomeracions humanes, resultat de les seves dinàmiques socials i interaccions no lineals. Si es considera una ciutat com a un ens, amb la finalitat de comparar-la amb altres ciutats establint paral·lelismes amb les lleis al·lomètriques dels éssers vius, s'obtenen exponents inferiors, superiors o aproximadament iguals a la unitat segons la variable mesurada, evidenciant en molts casos un comportament no lineal.

S'ha escollit la Comunitat Autònoma d'Andalusia pel cas d'estudi I (veure la metodologia seguida al capítol 2) amb un total de 770 municipis, per ser la més extensa d'una sola regió que s'ha pogut trobar i per l'accessibilitat de les dades. Es diu que estem més enllà de l'era de la informació, que l'hem sobrepassat i actualment estem en l'era del coneixement. Tant una com l'altra suposen uns mitjans i una accessibilitat a la informació com mai s'havia donat abans. Sorpren doncs, que una de les primeres conclusions que s'ha extret d'aquesta tesi és la manca precisament d'informació que hauria d'estar a l'abast del públic en general. Per realitzar el present estudi han estat necessàries les dades en un any determinat dels consums d'energia elèctrica dels municipis objecte d'estudi. Les companyies elèctriques que distribueixen i venen l'energia elèctrica, són les que tenen en primera instància aquesta informació. Desafortunadament, en els informes de les mateixes companyies només és publiquen resultats que agrupen consums de regions o províncies senceres, i no es publiquen consums de poblacions concretes. Teòricament les companyies o els ens locals de gestió i govern han de subministrar aquesta informació a les persones físiques, però

> en la pràctica molt poques ho fan, ho fan en terminis no assumibles per qualsevol estudi, i fins i tot en alguns casos la desconeixen o no saben on es troba. I en el cas de disposar d'aquestes

dades, aconseguir la metodologia seguida per obtenir-les és pràcticament impossible. S'ha constatat que aquesta limitació ha estat present en els treballs realitzats per altres investigadors d'arreu del món. En aquest sentit, qualsevol estudi futur que vulgui utilitzar les lleis d'escala aplicades als consums energètics, estarà limitat per l'existència o l'accés a aquesta informació.

► Els resultats obtinguts després d'aplicar la metodologia descrita en el capítol 2 confirmen³ que el consum elèctric total dels municipis té un coeficient al·lomètric lleugerament superior a la unitat ($\beta=1,08$), i per tant, podem dir que té un coeficient d'escala lleument superlineal.

Respecte a la metodologia seguida,

■ cap investigador fins ara ha analitzat el consum d'energia desagregant aquest en els sectors econòmics. L'elecció ha estat condicionada per les dades disponibles. Els sectors escollits per aquest treball són: el residencial, el industrial, el d'administració, el de serveis i l'agrícola.

Els resultats mostren que el comportament pot ser diferent segons el sector analitzat.

► Els coeficients de determinació R^2 obtinguts mostren que en el cas dels sectors industrial i agricultura hi ha una baixa qualitat del model, i no és així en la resta de sectors on aquest coeficient és alt o molt alt. S'han associat els dos casos de baixa qualitat del model a dos motius: a) els consums de les indústries i les zones agrícoles s'atribueixen als termes municipals on estan ubicades i per tant, als habitants del municipi, cosa que no és sempre certa ja que les empreses solen contractar personal del propi municipi, però també contracten persones procedents d'altres municipis que no comptabilitzen com a habitants en el municipi on consumeixen energia; b) segons el tipus d'indústria o explotació agrària, el consum energètic pot diferir molt

► El sector residencial escala quasi linealment ($\beta=1,06$). El coeficient β proper a la unitat d'aquest sector es pot explicar pel fet que el nombre d'habitants d'un municipi no té perquè influir massa en el consum energètic individual de les habitatges que el constitueixen.

► En el cas del sector serveis, el coeficient β superior a la unitat es pot explicar pel nombre i dimensions dels equipaments segons sigui el nombre d'habitants del municipi. El creixement dels equipaments de serveis és superlineal respecte al creixement del nombre d'habitants.

► El sector administratiu escala quasi linealment ($\beta=0,98$). Es considera que el motiu és que tots els municipis tenen aproximadament el mateix tipus d'equipaments, i que aquests estan dimensionats proporcionalment a la grandària de la població.

³ Resultats similars ja els hem observat en estudis al·lomètrics d'altres investigadors. Es citen i s'analitzen amb detall els seus treballs al capítol 2.

Segons alguns autors, l'ús de les lleis de potència té a vegades una component especulativa de vegades poc justificada. L'autor

→ Cosma Rohilla Shalizi en el seu article *Scaling and hierarchy in urban economies* del 2011 (Shalizi 2011), analitza les dades del producte interior brut i de la renda per capita d'algunes ciutats dels Estats Units, obtenint resultats que segons ell posen en dubte les tesis mantingudes per Bettencourt, West i altres col·laboradors (West et al.) (Bettencourt et al. 2011, Bettencourt et al. 2010-b, Bettencourt et al. 2010-a, Bettencourt et al. 2007), i en les quals es basa una bona part d'aquesta tesi (Capítols 2 i 4). Els seus anàlisis estadístics posen de manifest que es poden utilitzar altres funcions en comptes de les lleis de potència, no necessàriament obtenint els mateixos resultats. Per altra banda argumenta que variables com la productivitat per càpita en una ciutat, es poden predir millor tenint en compte la importància dels sectors industrials i la seva especialització en serveis de proveïment, que amb les lleis de potència, la qual cosa posa en dubte la dependència d'aquesta variable amb la grandària de la població de la ciutat. Opina que amb les lleis d'escala es realitzen extrapolacions especulatives (considera que les fluctuacions entorn les línies de tendència són massa grans per realitzar prediccions d'utilitat) i amb poca base científica. En altres paraules, argumenta que les eines tradicionals basades en les teories econòmiques poden funcionar millor. El cert és que fins a data d'avui hi ha hagut un reconeixement científic important de West et al., demostrat per la gran quantitat d'articles publicats d'altres autors d'arreu que els citen o fan referència a les teories suggerides per ells, i en canvi no hi ha hagut un recolzament a l'article de Shalizi. En tot cas, caldrà estar atents a possibles futures publicacions d'altres científics que l'avalin.

Una altra de les aportacions metodològiques que s'han fet en aquesta tesi ha estat realitzar

- un anàlisi al·lomètric del consum total per franges de població (interval·ls definits pel nombre d'habitants) per veure si aquest fet pot representar diferències en els resultats.

El resultat de fer-ho permet treure'n la següent conclusió:

- L'exponent β i el coeficient de determinació R^2 tenen resultats diferents si es treballa amb el total de la població o es treballa amb franges.

No es té una explicació que pugui ser raonable del perquè succeeix aquest fet.

→ Intentar explicar aquests resultats poden motivar línies de recerques futures. En una línia que replanteja la metodologia seguida per l'equip de West et al., l'article *City boundaries and the universality of scaling laws* (Arcaute et al. 2013) d'Elsa Arcaute i els seus col·laboradors, investiga la solidesa i la universalitat de les lleis d'escala en Anglaterra. Argumenten que les fronteres que defineixen una ciutat juguen un paper fonamental en els resultats que ofereixen les

lleis d'escala. Desenvolupen un mètode per produir múltiples definicions de ciutat, diferents al criteri estàndard de demarcació geogràfica oficial, basant-se en criteris morfològics i funcionals de la mateixa. Fan un ampli anàlisi amb multitud d'indicadors urbans, i obtenen com a resultat que els exponents d'escala deduïts són especialment sensibles a les fronteres del sistema, és a dir, a les fronteres de la ciutat i per tant, a la definició d'aquesta quan s'utilitzen indicadors que tenen una relació no lineal amb la grandària de la població. Els resultats obtinguts en aquest estudi per les variables no lineals difereixen dels de West et al., sobre tot en els indicadors que tenen relació amb dinàmiques socials i econòmiques com per exemple, els valors per capita de les patents registrades, els crims comesos o la renda. Per tant, una de les conclusions d'aquest estudi és que les lleis d'escala poden no tenir la característica d'universalitat que havia pretès l'equip d'en West et al. En tot cas, recomanen que no s'hauria d'aplicar la metodologia de les lleis d'escala per comparar ciutats fins que no es disposi d'una definició de les seves fronteres que sigui consistent. El mètode que plantegen Elsa Arcaute i els seus col·laboradors pot ajudar en el futur a trobar definicions de *frontera* de ciutat que ajudin a cercar relacions al·lomètriques més consistentes que les que s'han trobat fins ara. El seu equip està treballant actualment per aplicar aquestes eines a països d'Europa i els EUA amb la intenció d'obtenir resultats que donin més llum a les seves teories. També hi ha altres autors que sostenen que les grans ciutats de milions d'habitants es comporten de manera molt diferent a ciutats més modestes, cosa que explicaria el fet que algunes d'aquestes apareguin com "outliers" en els estudis citats.

Una tercera aportació respecte la metodologia seguida ha estat realitzar

- un estudi detallat de l'evolució temporal de l'exponent al·lomètric.

Els resultats reflecteixen que

- els valors de β es mantenen essencialment constants en el temps, encara que s'observa una petita tendència a decreïxer a partir d'un cert any. Els motius concrets d'aquest fet en el cas d'estudi s'argumenten amb detall en el capítol 2. Com ha succeït amb altres justificacions, també aquí és difícil escapar d'un cert grau d'especulació.

En tot cas, es podria considerar una nova línia de recerca per

- desenvolupar una base teòrica plausible que pugui explicar les oscil·lacions de l'exponent al llarg del temps i la seva repercussió en la interpretació dels resultats.

En els primers paràgrafs d'aquest punt, s'assenyala com a base metodològica d'aquesta tesi la intenció d'aplicar els coneixements d'altres disciplines i forçar una visió transversal de les infraestructures que

aquí s'estudien. La implementació de les lleis d'escala provinents de la biologia, que són el nervi principal d'aquesta tesi, n'és un exemple, així com també ho és

- l'aplicació dels Models Gravitacionals (MG en endavant) que deriven del món de l'economia.

En efecte, durant l'exploració de la metodologia per aplicar les lleis d'escala es va plantejar la possibilitat d'aplicar els MG. En la Figura 5.1 es vol reflectir amb la fletxa que uneix el globus de les lleis d'escala amb el dels models gravitacionals, i que fa possible un camí alternatiu per tractar les dades del consum elèctric de les poblacions objecte d'estudi. El motiu ha estat intentar superar una de les limitacions que tenen les lleis d'escala: avaluar el consum d'energia elèctrica en una àrea A provocat per una persona originària d'una àrea B . Els MG basats en el principi de la gravitació universal inicialment utilitzaven certes característiques de dues àrees geogràfiques i la distància que les separa, per descriure el flux observat de persones entre elles. Aquestes àrees poden ser des de petites poblacions a grans ciutats o fins i tot províncies. Cal dir que els models gravitacionals poden tenir certes restriccions que encara no han estat aclarides. En aquest sentit l'equip de László Barabási (Simini et al. 2012) en posa de manifest algunes⁴ en el seu article "A Universal Model for Mobility and Migration". La formulació dels models gravitacionals s'ha utilitzat fins ara en nombrosos estudis com per exemple, el transport de viatgers o mercaderies, les xarxes de carreteres o les xarxes de comunicació de telefonia. En el cas de l'energia elèctrica, la suma de l'energia facturada a tots els consumidors de la regió que es vol estudiar, s'imputa al nombre de persones que estan al cens segons les bases de dades disponibles pels organismes governamentals competents, i això

- > pot no ser correcte si es té en compte que els censos no reflecteixen exactament el nombre de persones que realment estan consumint energia.

Els motius poden ser diferents, però se'n detecten dos de principals: les persones no sempre habiten en el lloc en el qual estan censades i es donen desplaçaments dels llocs de residència a altres per motius laborals, oci, etc. Per aplicar els models gravitacionals s'ha considerat que les persones que es desplacen d'un lloc a un altre per consumir energia són un factor que provoca diferències de consum d'energia per càpita entre regions. L'equació general del MG que s'ha utilitzat en el cas d'estudi Ib és l'equació 5.2.

$$F_i = G \sum_{j=1}^{j=768} \frac{P_i P_j}{d_{ij}^\alpha} \quad 5.2$$

On F_i és el resultat de la funció gravitacional per la població i (adimensional) i que representa la *força d'atracció* de persones entre la població i i la resta de poblacions de la regió estudiada; d_{ij} és la distància euclidiana entre les poblacions i i j en [m]; G en [$\text{hab}^2/\text{m}^\alpha$] i α (adimensional) són constants que depenen del model utilitzat; P és el número d'habitants de les poblacions de l'estudi. Després d'haver estudiat

⁴ En el capítol 2 es fa un repàs de les principals.

diferents models amb variacions de G i α , se n'han escollit 3 pel seu comportament estadístic. Els resultats obtinguts d'aquestes equacions per a cada població, s'han utilitzat per obtenir les relacions al·lomètriques pels diferents consums d'energia elèctrica analitzats en apartats anteriors: total, industrial, residencial, comercial, agricultura, serveis i administració. En fer-ho s'ha buscat un possible comportament al·lomètric entre aquesta *força d'atracció* F_i i els consums enregistrats a cada població, que pugui explicar l'origen dels comportaments al·lomètrics observats en els apartats anteriors. De l'anàlisi estadístic se'n poden treure algunes conclusions:

- ▶ Un augment de l'exponent de la distància d entre les ciutats, comporta una disminució de l'exponent β del consum total d'energia elèctrica d'una població, presentant valors clarament sublineals. A mesura que les ciutats s'allunyen entre sí, disminueix el desplaçament de persones entre elles. Aquesta disminució es tradueix òbviament en un nombre menor de persones que consumeixen energia a altres municipis diferents del municipi on resideixen i conseqüentment repercuteix en un decreixement del consum global.
- ▶ L'exponent β del consum residencial disminueix a mesura que augmenta l'exponent de la distància d del MG. Es dona d'una manera similar al cas del consum total, ara bé, en el consum residencial els valors de la β són més alts, apropant-se de vegades a la unitat. Això indica que el comportament no és tan marcadament sublineal. Per una banda, el temps de permanència a les llars pot ser similar tant si es treballa al mateix municipi com si es fa en un altre. En tot cas les petites diferències es poden donar degut a un temps superior fora de la residència, que es dedica al desplaçament. Per una altra banda, el fet d'anar a un altre municipi per motius laborals o comercials (responsables de la major part dels desplaçaments) no implicarà un augment del consum residencial al municipi destí.

Dels anàlisis estadístics dels resultats cal destacar que alguns dels models obtinguts presenten una consistència estadística limitada, i en alguns casos tan baixa que desaconsellen qualsevol interpretació dels gràfics obtinguts, com en el cas dels consums industrial, comercial i administratiu. Els motius pels quals les persones es traslladen d'una població a una altra, poden afectar de diferent manera al consum d'energia elèctrica que aquestes fan en les poblacions "destí". Així, per exemple, els moviments per motius laborals tenen un gran impacte en el consum d'energia del sector industrial de les poblacions receptores, augmentant-lo, i per tant, també influeixen en el consum total. Per contra, els moviments per motius comercials tenen un impacte molt menor.

- ▶ Els models gravitacionals no distingeixen els motius dels desplaçaments de les persones, i per tant, no poden explicar satisfactòriament les conseqüències energètiques d'aquests desplaçaments.

Aquesta afirmació pot generar una nova línia d'investigació amb l'objectiu de

→ revisar minuciosament l'aplicació dels MG i definir noves variables que tinguessin en compte les especificitats que relacionen els desplaçaments de les persones amb el consum d'energia que realitzen en els llocs de destí.

Per aplicar els models gravitacionals a una regió, cal delimitar-la geogràficament, establint unes fronteres. En deixar excloses les poblacions de l'exterior de la frontera es comet un error evident: aquestes poblacions també influeixen com atractors o emissors de persones en les poblacions veïnes dins la frontera. Caldria incloure a l'estudi les poblacions situades a una certa distància més enllà de les fronteres definides inicialment, proposant una nova frontera.

→ S'haurien de cercar noves variables que permetessin situar aquesta segona frontera atenent a la influència de les poblacions situades entre ambdues fronteres

La importància de la previsió de la demanda d'energia elèctrica, és especialment important tenint en compte que aquesta energia no es pot emmagatzemar. Això implica que hi ha d'haver un equilibri constant a temps real entre producció i demanda. Per assegurar aquest objectiu s'han d'anticipar les necessitats que hi haurà en diferents horitzons temporals: a curt termini per proveir la demanda a temps real, a mig termini per planificar el manteniment de les infraestructures de generació i transmissió, i a llarg termini per planificar la construcció de noves plantes de generació i línies de transmissió. Durant la última dècada s'han utilitzat força models i algorismes matemàtics per tal de predir la demanda d'energia elèctrica. Tanmateix no s'han tingut en compte la grandària de les aglomeracions urbanes, la situació geogràfica d'aquestes o els consums desagregats en els sectors econòmics. En aquesta tesi es proposa utilitzar les lleis al·lomètriques com una eina que té en compte aquests factors, i corregir les previsions de consum fetes pels algorismes clàssics utilitzats fins ara amb la finalitat d'aplicar-ho en el disseny d'una línia elèctrica. Per fer-ho, s'ha escollit una eina gràfica que permeti incorporar la informació provinent dels estudis al·lomètrics: el diagrama de funcionament elèctric de Perrine i Baum, (Checa 1988, Holladay 1922, Perrine et al. 1900) en algunes publicacions anomenat de Blondel i Thielemans. Aquest diagrama ha estat utilitzat fins ara, més per finalitats teòriques que no pas com una eina pràctica per l'ús en projectes reals. En aquesta tesi

- es proposen algunes modificacions a la teoria general del traçat d'aquest diagrama per tal de permetre la seva realització pràctica

i utilitzant els conceptes de les lleis d'escala descrites més amunt,

- incorporar eixos temporals al diagrama modificat per tal de predir la data aproximada en què la demanda de potència sobrepasarà la capacitat de transport de la línia.

S'ha construït i utilitzat el diagrama en el cas d'estudi d'Andalusia, i una de les conclusions de les seves lectures és que

- ▶ una línia pot ser superada per la demanda set anys abans del previst sense utilitzar el diagrama modificat que incorpora eixos temporals.

Cal dir que hi ha aspectes exògens relacionats amb la línia (topologia de la xarxa, tipologia de consum, construccions de noves infraestructures), i limitacions de les dades utilitzades en l'estudi al·lomètric (any de les dades usades, regió geogràfica d'estudi, influència dels sectors econòmics, nombre de municipis usats) que poden minvar la fiabilitat de les lectures del diagrama. El propòsit del cas d'estudi Ic no és tant el voler ser una eina d'anàlisi de la capacitat de transport d'un sistema elèctric d'alta tensió, si no fer palès l'impacte que poden tenir les lleis d'escala en el seu disseny. En futures línies de recerca caldria

- desenvolupar algoritmes que poguessin reflectir l'evolució real del sistema elèctric i que incorporessin les lleis d'escala

El que sembla indubtable és que les modificacions proposades i la incorporació dels eixos temporals augmenten la potencialitat de l'ús docent. Per comprovar-ho

- s'ha implementat el diagrama modificat com a eina docent en l'assignatura *Càlcul i disseny de Línies Elèctriques d'Alta Tensió* de la titulació de *Grau en Enginyeria Elèctrica* en els cursos 10/11 i 11/12 (cas d'estudi III).

- ▶ Els resultats acadèmics dels estudiants mostren al ser comparats amb els resultats obtinguts en anys anteriors una millora notable (veure justificació a l'Annex 1).

Darrerament les xarxes d'alta tensió s'han considerat com a xarxes complexes per alguns autors, i com a tals se'ls ha aplicat les tècniques d'anàlisi d'aquestes. Amb aquesta visió s'han estudiat les seves característiques topològiques bàsiques, les propietats estadístiques dels seus grafs i la seva vulnerabilitat o fortalesa en xarxes arreu del món.

- En el capítol 3 d'aquesta tesi s'apliquen els conceptes de la teoria de les xarxes complexes a les xarxes de transmissió i distribució per modelar-les com una xarxa espacial.

S'han utilitzat les dades obtingudes d'una xarxa d'alta tensió (UCTE) i dues de mitja (XD1, XD2) per aplicar-ho a casos reals (cas d'estudi II). Després d'identificar el model de xarxa s'ha estudiat el grau de centralitat dels seus nusos i s'ha vist que

- ▶ les xarxes elèctriques de distribució són més radials i esglaonades (diferents nivells de tensió) que les de transmissió, constituint una topologia simple amb camins amb pocs nusos.

De l'anàlisi espacial de les xarxes elèctriques de distribució s'ha comprovat que:

- ▶ la longitud de cada línia influeix de manera important en el comportament i/o rendiment de tota la xarxa elèctrica

Per satisfer l'objectiu final proposat en el capítol 3, de relacionar les variacions estadístiques en la topologia amb la fiabilitat de la xarxa entesa com a continuïtat del subministrament de l'energia elèctrica,

- ▶ s'han utilitzat els mètodes anomenats *shuffling*: el mètode canvi d'aresta, (an. *edge exchange*) i el mètode d'intercanvi de vèrtexs (an. *vertex swapping*) per analitzar la seva optimalitat en termes de cost de connexió mínim.

Dels resultats s'ha extret la conclusió que

- ▶ les xarxes de transmissió poden estar més a prop del seu òptim espacial que les xarxes de distribució.

Per altra banda s'ha comprovat que

- ▶ les xarxes on existeixen més línies de llarga distància i tenen antenes amb més nodes són més febles i que
- > la situació geogràfica i les constriccions espacials d'una xarxa poden jugar un paper important en la seva estructura

S'ha vist també que

- ▶ a mesura que creix la xarxa, el nombre de nodes en els llaços creix proporcionalment.

Les implicacions que això pot tenir en la fragilitat de la xarxa són poc conclouents. En aquesta tesi únicament s'ha pogut constatar les diferències de fragilitat entesa com a fiabilitat, mitjançant l'anàlisi dels seus TIEPIs. S'ha vist que

- ▶ de les xarxes de distribució estudiades, aquella menys optimitzada en termes de cost de connexió (això és, longituds de línia) és la que ofereix una menor fiabilitat en termes de TIEPI acumulat i que

→ per relacionar les variacions estadístiques en la topologia d'una xarxa amb la seva feblesa cal desenvolupar un model o hipòtesi que permeti validar-ho.

5.2 Una última reflexió

En aquest darrer apartat vull fer unes últimes reflexions al voltant de la tesi i del que ha suposat aquesta per a mi en la meua percepció de la realitat de les xarxes elèctriques. Per fer-ho utilitzaré com a fil conductor les cinc citacions d'autors que hi ha al començament del document.

Duncan Watts, en la primera de les citacions, i Dressler i Akany en la segona, expressen el seu convenciment que hi ha qüestions en l'estudi de les xarxes que només es podran resoldre amb equips multidisciplinaris d'investigadors i utilitzant mètodes que ells anomenen *no ortodoxes*. Després del temps que he dedicat a aquesta tesi, jo també n'estic convençut, i de fet també ho estava el meu director de tesi en Martí Rosas quan em va proposar de formar part del seu grup d'investigació multidisciplinari, en el qual jo havia d'aportar el meu gra de sorra com a enginyer elèctric en l'estudi de les xarxes elèctriques. Per una banda, treballar amb un equip multidisciplinari i obrir noves vies d'investigació suposa en molts casos treballar amb un elevat grau de transversalitat, arribant a provocar incertesa i indecisions que poden posar en dubte i qüestionar tot el treball fet. Un clar exemple d'això en aquesta tesi ha estat la utilització dels Models Gravitacionals (Capítol 2) per millorar la previsió de població d'una ciutat. Per altra banda, treballar amb un elevat grau de transversalitat pot fer que s'obrin més portes que no pas se'n tanquin, sorgint més interrogants dels que s'han resolt. Una bona mostra d'això són les nombroses línies d'investigació proposades en l'apartat anterior. Penso que obrir portes i plantejar interrogants és una de les conseqüències d'investigar, i de fet és necessari i sa.

Plantejar l'estudi de les línies elèctriques i les xarxes formades per aquestes, des d'una mirada transversal i *no ortodoxa*, ens va portar a inspirar-nos en les xarxes naturals i les lleis d'escala que d'aquestes s'han deduït. La “mirada biònica” ha estat un recurs bàsic en bona part de la tesi. He dit “inspirar-nos” perquè seria infinitament pretensions per la nostra part voler imitar la natura. Litinetski ho expressa perfectament en la tercera de les citacions. Segurament ha estat aquesta “mirada biònica” de les línies elèctriques el que més ha sorprès i ha creat més reticències a alguns dels meus companys enginyers elèctrics, instal·lats en els mètodes tradicionals i “ortodoxos”.

En les citacions quarta i cinquena hi ha alguns dels motius pels quals he dedicat el meu temps a una tesi que intenta “escapar” del tarannà clàssic de l'enginyeria. Després de llegir els llibres que les contenen no he pogut continuar immers en una manera de veure la tecnologia i la ciència que ens ha portat a l'estat actual de la nostra societat. En la citació de J. Diamond hi ha una frase que diu: “*los países de la tierra comparten recursos i se afectan mutuamente*”. Aquesta afirmació es podria aplicar també a les línies elèctriques. És aquest un dels objectius d'estudi principals del capítol 3 d'aquesta tesi.

Tal i com he explicat en l'apartat Agraïments, “*Los límites del crecimiento*” va ser un llibre que em va canviar la meua manera de veure el món. Fa uns anys, vaig tenir la sort de poder assistir a una conferència d'un dels autors, en Dennis Meadows en relació a una revisió d'aquest estudi: “*Limits to Growth. The 30-Year Update*”. Només puc dir que, per enèsima vegada se'm va tornar a fer evident la importància del rol

que com a comunicador pot tenir una persona sobre els altres. Jo, com a professional de la docència que sóc, em sento més capaç i amb més eines per comunicar, sobretot pel fet d’haver après a mirar la tecnologia d’una manera diferent, d’una manera “transgressora”, i li he de donar gràcies a aquest doctorat.

5.3 Referències

Arcaute, E., et al. City boundaries and the universality of scaling laws. 2013, vol. eprint arXiv:1301.1674.

Bettencourt, L. M. A., et al. Urban Scaling and Its Deviations: Revealing the Structure of Wealth, Innovation and Crime across Cities. *Pols One* . 2010-a, no. 5(11).

Bettencourt, L. M. A.; and West, G. B. Bigger cities do more with less. *Scientific American* . 2011,.

Bettencourt, L. M. A.; and West, G. B. A unified theory of urban living. *Nature* . 2010-b, vol. 467, p. 912-913 .

Bettencourt, Luis M. A., et al. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *P. Natl. Acad. Sci. USA* . 2007, vol. 104, no. 17, p. 7301-7306 .

Checa, L. M. *Lineas de Transporte de Energía*. 3rd ed. Barcelona: Marcombo, 1988. ISBN 8426706843.

Holladay, C. H. A Graphic Method for the Exact Solution of Transmission Lines. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the* . 1922, vol. XLI, p. 785-793 .

Perrine, F. A. C.; and Baum, F. G. The Use of Aluminium Line Wire and Some Constants for Transmission Lines. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions* . 1900, vol. XVII, p. 345-384 .

Shalizi, C. R. Scaling and hierarchy in urban economies. *Cornell University Library* . 2011, no. arXiv:1102.4101.

Simini, F., et al. A universal model for mobility and migration patterns. *Nature* . 2012, vol. 484, no. 7392, p. 96-100 .

Annex 1

Cas d'estudi (III): Exemple docent d'implementació del diagrama de Perrine-Baum modificat

Actualment el professorat i els estudiants tenen al seu abast eines computacionals que faciliten moltíssim els nombrosos càlculs complexos necessaris en el disseny d'una línia elèctrica d'Alta Tensió. Aquestes eines han desplaçat a d'altres com els laboriosos diagrames vectorials, que han estat eliminats dels programes o han passat a explicar-se només teòricament sense arribar a implementar-los en exemples de càlcul reals. En els darrers anys s'ha observat que els estudiants titulats han guanyat en rapidesa de càlcul gràcies a aquestes eines però també s'ha observat que han perdut capacitat interpretativa dels resultats obtinguts pels programes informàtics. Aquesta capacitat interpretativa implica reconèixer resultats informàtics erronis, absurds o fora del rang de les possibilitats tecnològiques que ens ofereixen els materials existents per construir aquestes infraestructures. El diagrama de Perrine-Baum (PB) permet visualitzar ràpidament les caigudes de tensió de la línia per diferents estats de càrrega i factors de potència. Fins i tot permet obtenir ràpidament la potència reactiva d'una eventual bateria de condensadors en cas de necessitat de compensació d'energia reactiva. Evidentment aquests resultats es poden obtenir més exactament amb els programes informàtics de càlcul existents. Però el que no poden oferir aquests programes és una visió panoràmica de la línia on es vegi d'una ullada les possibilitats que ofereix sense superar les seves limitacions tècniques. Per posar un símil imaginem que algú pretén saber quines són les poblacions més pròximes a una població determinada. Si a aquesta persona li oferim només un llistat de coordenades (altitud i longitud) d'aquestes poblacions podrà calcular amb exactitud les respectives distàncies, però si a més li oferim un mapa, segur que el seu grau de coneixement de la disposició i localització relativa millorarà molt. Es pot dir que aquest diagrama ve a ser un mapa d'estats de càrrega d'una línia elèctrica per l'estudiant. Per l'autor d'aquesta tesi el diagrama PB és el que aconsegueix millor aquest objectiu. Ara bé, per què aquest diagrama sigui una eina d'utilitat ha calgut fer les modificacions que es presenten en capítol 4.

Un dels objectius del pla d'estudis de la titulació de Grau en Enginyeria Elèctrica que s'imparteix en l'Escola d'Enginyeria de Terrassa de la Universitat Politècnica de Catalunya és que els estudiants adquireixin la competència de saber projectar una línia elèctrica d'alta tensió. Aquest pla es va posar en marxa l'any 2009 i va substituint progressivament el pla d'estudis d'Enginyeria Tècnica en Electricitat que s'ha estat impartint des de l'any 2004. En el nou pla aquest objectiu es pretén assolir mitjançant

diferents assignatures, una de les quals és Càlcul i disseny de línies elèctriques d'alta tensió que s'impartirà el curs 2011-2012. Aquesta assignatura substitueix a l'assignatura Anàlisi i Disseny de Línies i Xarxes del pla anterior. S'ha aprofitat el canvi de pla d'estudis per tal d'implementar aquesta nova eina de càlcul i disseny per incrementar el grau d'aprenentatge dels estudiants. Per assegurar que serà d'utilitat s'ha estat assajant durant els cursos 2010/2011 i 2011/2012 i s'han comparat els resultats de les avaluacions dels estudiants amb els dels dos cursos anteriors. Els estudiants de l'assignatura Anàlisi i Disseny de Línies i Xarxes aprenen en primer lloc a calcular les constants físiques i elèctriques d'una línia elèctrica d'alta tensió. Amb els valors d'aquestes constants aprenen a plantejar i resoldre les anomenades equacions de propagació. És en aquest punt on interpretant el resultat dels sistemes d'equacions han de decidir si la secció i la distribució geomètrica de la línia pot satisfer les necessitats de transport d'energia elèctrica per les quals ha estat projectada. S'expliquen a continuació diagrames més teòrics com el diagrama de buit i el diagrama de curtcircuit i diagrames més pràctics com el diagrama circular de potències o el de pèrdues d'energia activa. S'ha incorporat el diagrama PB modificat en el programa de l'assignatura per tal que l'alumne visualitzi gràficament els resultats d'aquests sistemes d'equacions i l'utilitzi com una eina de disseny pràctic. Els resultats de la implementació del diagrama es poden veure en els resultats comparatius de les avaluacions dels estudiants durant els cursos 2008 a 2012. Es presenten a la Taula 1 els resultats de l'avaluació final de l'assignatura, i el grau d'encert a 3 preguntes concretes (P1, P2, P3) de dificultat similar pels tres anys valorats que pretenen avaluar la capacitat interpretativa dels resultats obtinguts mitjançant la resolució dels càlculs amb programes informàtics. Cal tenir en compte que els valors són sobre un màxim de 10 i que s'han tingut en compte només els alumnes que han aprovat l'assignatura. S'han descartat els estudiants que han abandonat l'assignatura en algun moment del curs o que han suspès ja que molts d'ells no es presenten a les proves d'avaluació on s'implementa aquesta nova eina.

Curs acadèmic	08/09	09/10	10/11	11/12
Nombre d'estudiants de la mostra	25	28	33	21
Nota mitjana final	6,7	6,3	7,5	6,9
Nota mitjana P1	5,2	5,5	7,8	7,4
Nota mitjana P2	5,4	5,0	6,8	6,4
Nota mitjana P3	5,1	5,8	7,2	6,9
Desviació estàndard màxima	0,15	0,40	0,35	0,50
p-valors (test-Fisher) $\alpha = 0,05$				
08/09		0,46	0,01	0,04
09/10			0,02	0,24
10/11				0,14

Taula 1 Cas d'estudi III: Resultats acadèmics comparatius

Segons els resultats de la Taula 1 es pot veure que la millora és notable en els cursos 2010/2011 i 2011/2012 en què s'ha implementat aquesta nova eina. Els p-valors del test de Fisher mostren que no hi ha diferència ($p\text{-valor} \geq 0,05$) en la comparativa dels cursos 08/09 amb 09/10 i 10/11 amb 11/12, tal i com es pot esperar al comparar anys en els quals el programa no ha sofert canvis. Per altra banda l'estadístic

de Fisher corrobora que sí que existeixen canvis significatius ($p\text{-valor} \leq 0,05$) en la comparativa entre els cursos 08/09 amb 10/11, 08/09 amb 11/12 i 09/10 amb 10/11, tal i com s'esperava. Únicament la comparativa 09/10 amb 11/12 no permet assegurar que hi hagi variació respecte la implementació del PB.

Annex 2

ARTICLE I

Acta a congrés: COMPENG 2010, *Complexity in Engineering 2010*. Roma (Itàlia).
IEEE COMPUTER SOCIETY
Títol: *Discerning Electricity Consumption Patterns from Urban Allometric Scaling*
<http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/COMPENG.2010.29>

ARTICLE II

Article en revista: IEEE Transactions on Education (Volume: 56, Issue:3). Agost del 2013
Títol: *Modification of the Perrine–Baum Diagram to Improve the Calculation of High-Voltage Transmission Line*
<http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TE.2012.2215861>

Aquests articles ocupen les pàgines 172 a 182 de la tesi; d'acord amb els drets de l'editor, no es poden mostrar aquí, però es poden consultar a la URL que acompanya la citació

ARTICLE III

Article en procés de revisió en revista Physica A

Títol: *Scaling laws in electricity consumption as a tool to characterize the evolution of economic sectors in cities*

Scaling laws in electricity consumption as a tool to characterize the evolution of economic sectors in urban contexts

Ricard Horta-Bernús^a, Oliver Planes^b, Marti Rosas-Casals^{a, c, *}

^a Sustainability Measurement and Modelling Lab, Universitat Politècnica de Catalunya-Barcelona Tech, EET-Campus Terrassa, Colom 1, 08222, Barcelona, Spain.

^b Departament de Matemàtica Aplicada, Universitat Politècnica de Catalunya-Barcelona Tech, EET-Campus Terrassa, Colom 1, 08222, Barcelona, Spain.

^c ICREA-Complex Systems Lab, Universitat Pompeu Fabra (GRIB), Dr Aiguader 80, 08003 Barcelona, Spain.

* Corresponding author at: Sustainability Measurement and Modelling Lab, Universitat Politècnica de Catalunya-Barcelona Tech, EET-Campus Terrassa, Colom 1, 08222, Barcelona, Spain. Tel.: +34937398060; fax: +34937398225.

E-mail addresses: rhorta@ee.upc.edu (R. Horta-Bernús), oliver.planes@upc.edu (O. Planes), rosas@mmt.upc.edu (M. Rosas-Casals), svalver@gmail.com (S. Valverde).

Abstract

This paper empirically explores allometric scaling correlations of five economic sectors and ten years of electricity consumption of more than five hundred urban agglomerations in Andalucía, the southernmost region of Spain. It is shown that scaling exponents are relatively constant through the years for each sector and superlinear scaling consumption is mainly related with secondary and tertiary economic sectors. Deviations from average values show a robust trend in time, highlighting the importance of energy measures as proxies for the evolution of other economic and social variables in urban contexts. Significant correlations between residuals for different economic sectors are used to obtain regional energy consumption signatures. We believe these results can be useful for the development of a unified theory of urban living which can help us to better assess sustainability issues and policy decisions in urban planning in the near future.

Keywords

Allometric scaling, electricity consumption, economic sectors, urban agglomerations.

1 Introduction

Over the last years much effort has been devoted to developing a unified theory of urban living [1]. With 52% of people (78% in more developed regions) now living in cities [2], sustainability science is in great need of finding a predictive framework where dynamics involved in the on-going expansion processes of urban areas can be considered. Among many frames of reference [3], allometric scaling appears as a promising one [4–6]. Allometry, defined in biology as the study of the relationship of body size to shape [7], anatomy or physiology, has been extremely useful in revealing a unifying framework for biological structure and its organizational dynamics [8]. Living organisms are amazingly diverse and complex. But nonetheless share a remarkable and simple characteristic: the scaling behaviour of key biological processes over a broad spectrum of phenomena and an immense range of energy and mass [9]. This observed scaling is typically a simple power law:

$$Y \propto M^b \quad (1)$$

where Y is some observable, M the mass of the organism and b the scaling exponent. Although some controversy exists with respect to the universality of this law in biology [10] and especially with respect to the exact value of the exponent in the different systems, it is agreed that it approximates a simple multiple of $\frac{1}{4}$ over a broad range.

Following this biological metaphor, cities can be considered living organisms as well [11]. Formed by many interacting parts, they evolve and grow in time due to social and economic drivers. In fact, many properties of cities that characterize their inner dynamics are shown to be power-law functions of population size. Urban growth is a remarkable example, with a scaling relationship that relates, for a given urban area, land area occupied A and population size M like:

$$A \propto M^n \quad (2)$$

with found in the literature values for n ranging from 0.6 to 3.7, depending on data sets, and on whether the value is found for a spatial distribution of cities or for the same city evolving in time [4,6]. Many other properties of cities like urban supply networks and infrastructures [12], economic productivity and creative output [13], and even prosocial activities like voting and organ donation [14] have been found to scale with population. But in contrast with biological systems, where economies of scale are the usual outcome, observables of man-made systems like urban agglomerations present much more variability. In general terms though, whereas quantities reflecting social interactions tend to show superlinear (increasing returns) correlation with population size (i.e., $b > 1$), infrastructure variables show material economies of scale with sub-linear exponents (i.e., $b < 1$) [5].

Among all urban observables, those related with energy in general, and electricity consumption in particular, arise as distinctly meaningful ones when considered as proxies for the basal metabolism rate of the cities. Energy has a central role in modern human economies and it is continuously demonstrated by the positive relationship between its consumption and any form of economic growth [15]. From a macroecological perspective, statistical relationships between energy use and economic activity for many nations and over many years show a permanent, and not sustainable, dependence of economies on natural resources [16]. Following this rationale, electricity consumption scaling with population and for different economic sectors can be used to detect particular dynamics involving those aspects of energy which constrain productivity differences among urban areas. The relationship between urban size and productivity is indeed a central fact of urban economics [17] but from a global environmental accounting point of view, energy consumption can effectively restrain economic, social and environmental sustainability, and might counterbalance advantages coming from agglomeration economies [18–20].

In order to detect how urban economies can become differentiated with regards to their energy consumption, this paper analyses five economic sectors and ten years of electricity consumption data of 584 urban agglomerations in Andalucía, the southernmost region of Spain. It is organized as follows. Section 2 describes the methodology and the relevant features of our data. Section 3 presents scaling results, the statistical analysis of deviations for every economic sector and possible causes. Section 4 discusses the findings of the paper and Section 5 concludes outlining several implications for the sustainability paradigm in urban contexts.

2 Materials and methods

The data set used to evaluate the scaling law of the electricity consumption for urban agglomerations includes 584 urban centres from Andalucía, ranging from 150 inhabitants (Castro de Filabres, province of Almería) to 705.000 inhabitants (Sevilla, administrative centre and capital of the autonomous region). The spatial unit of analysis is the administrative centre defined by the Instituto de Estadística de Andalucía [21]. Electricity consumption data has been retrieved from the same reference. Andalucía is the southernmost autonomous region of Spain, the second largest, with an area of 87268 km², and the first one in population, with little more than 8 million people in 2010. Primary and secondary sectors give occupation to almost one half of the active population. While the former is mostly dispersed, the latter is concentrated in coastal areas and in the Guadalquivir valley. Finally, tertiary sector emerges as the most economically important one, primarily centred on tourism, mainly in coastal provinces. Therefore, electrical consumption data includes cities and urban agglomerations with remarkably different climates, geography, GDP's, social dynamics and economical drivers and activities. Scaling has been performed using census population from year 2000 to year 2010 and data includes values for electricity consumption in primary, secondary and tertiary sectors, including public and household. In our case, primary sector includes consumption from agriculture, mining, forestry, farming, grazing and fishing, together with packaging and processing of the raw material. Secondary sector includes manufacturing of finished goods like metal working and smelting, automobile production, textile production, chemical and engineering industries, energy utilities, engineering, breweries and bottlers, construction, and shipbuilding. Tertiary sector includes trade and services like commerce (stock, selling in small and big stores, buying and distribution), tourism (hotels, motels, apartments and restaurants), service enterprises to particulars or other facilities, non-public cultural industry (cinemas, theatres, art galleries, bookstores, etc.), banks and financial facilities and non-public learning centres. Public (or administrative) sector includes buildings (mayors, offices, etc.), public learning centres, lighting in public spaces, streets, monuments, public facilities, sport halls and even military facilities.

Scaling laws for the different economic sectors have been fitted using ordinary least squares to the logarithm of population and the following equation:

$$Y_i = Y_0 M_i^b \quad (3)$$

where Y_i is the electricity consumption in each sector and for every city, M_i is the population of each urban agglomeration, b is the scaling exponent and Y_0 is a normalization constant. Deviations from the average (3) can be used to better specify the behaviour of each individual city. These can be quantified by the residuals [22,23]:

$$r_i = \log \frac{Y_i}{Y(M_i)} = \log \frac{Y_i}{Y_0 M_i^b} \quad (4)$$

where Y_i is the observed value of the metric for each specific city. Bettencourt and collaborators (2010) refer to r_i as *scale-adjusted metropolitan indicators* (or SAMI's), since they represent a city's success or failure relative to other cities. Residuals from these fits, for every economic sector and each year, have been used to construct related histograms. From these histograms, normal best fit probability distribution has been obtained. Finally, residuals have been normalized using the standard normal deviate:

$$z = \frac{r_i - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

where μ is the mean and σ the standard deviation, in order to work with standard normal distributions and allow comparison for each city, two by two, by means of scatterplots.

3 Results

Scaling law for global electricity consumption in 2010 is shown in Figure 1 as an example. Summary results for every two years are shown in Table 1. For each sector, the evolution in time of b , the confidence interval and the adjusted R^2 are shown.

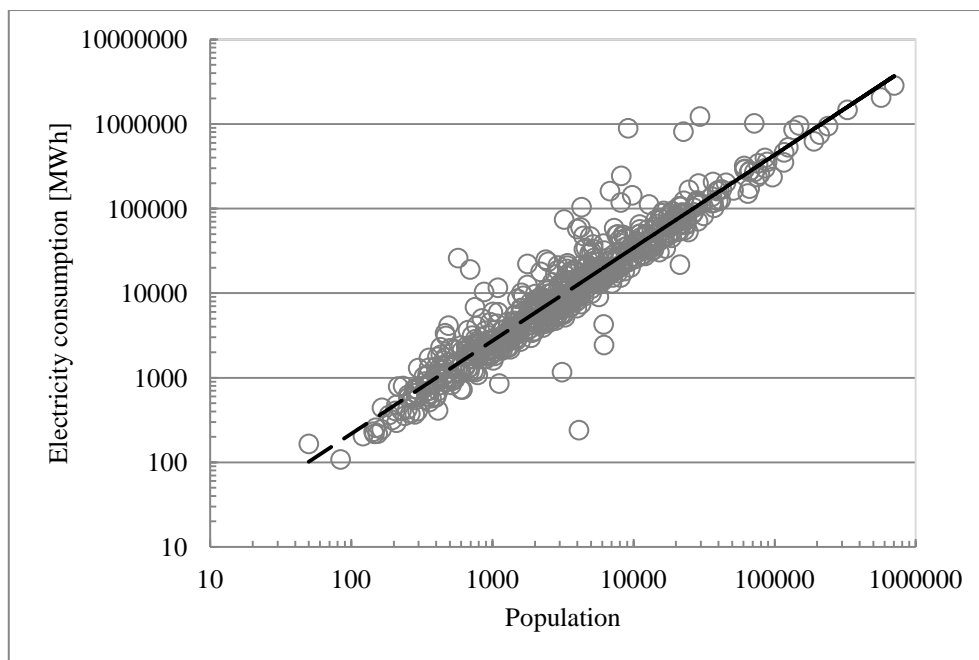


Figure 1. Scaling relationship between global electricity consumption and population size in 2010. The scaling exponent is slightly superlinear with a value of $b = 1.09$ ($R^2 = 0.91$).

The dynamic evolution of b throughout the years is shown graphically in Figure 2. The values of b are kept essentially constant in time, though a slight decreasing trend is observed from year 2006 onwards. As we can see, sectors can be grouped by means of the exponent. We have the following segregation:

- **Primary sector.** Slightly sublinear scaling with $0.92 < b < 0.99$. But very poorly adjusted R^2 .
- **Secondary, tertiary and household sectors.** Superlinear scaling, with $1.18 < b < 1.39$ for secondary and tertiary sectors and slightly superlinear for household sector, with $1.06 < b < 1.12$. Very poorly adjusted R^2 for secondary sector.
- **Public (administration) sector.** Increasingly linear scaling in time with $0.97 < b < 1.04$, but only data for year 2010 completely falling in the linear range.

Sector	Year	<i>b</i>	95% CI	Adj-R ²
Primary	2002	0.97	[0.88,1.06]	0.38
	2004	0.99	[0.89,1.08]	0.39
	2006	0.97	[0.87,1.06]	0.39
	2008	0.95	[0.86,1.04]	0.40
	2010	0.92	[0.83,1.01]	0.40
Secondary	2002	1.32	[1.24,1.40]	0.60
	2004	1.35	[1.26,1.44]	0.59
	2006	1.36	[1.27,1.45]	0.60
	2008	1.32	[1.23,1.41]	0.58
	2010	1.29	[1.20,1.38]	0.57
Tertiary	2002	1.30	[1.26,1.33]	0.88
	2004	1.33	[1.30,1.36]	0.91
	2006	1.31	[1.28,1.34]	0.91
	2008	1.30	[1.27,1.33]	0.91
	2010	1.27	[1.24,1.31]	0.90
Household	2002	1.09	[1.06,1.11]	0.90
	2004	1.08	[1.06,1.10]	0.96
	2006	1.08	[1.07,1.10]	0.96
	2008	1.07	[1.06,1.09]	0.96
	2010	1.06	[1.04,1.08]	0.95
Public	2002	1.04	[1.01,1.07]	0.83
	2004	1.00	[0.97,1.04]	0.85
	2006	1.01	[0.98,1.04]	0.85
	2008	0.99	[0.96,1.02]	0.85
	2010	0.97	[0.94,1.00]	0.85

Table 1 Scaling exponents for urban electricity consumption sectors and every two years. (CI, confidence interval; Adj-R², adjusted R²).

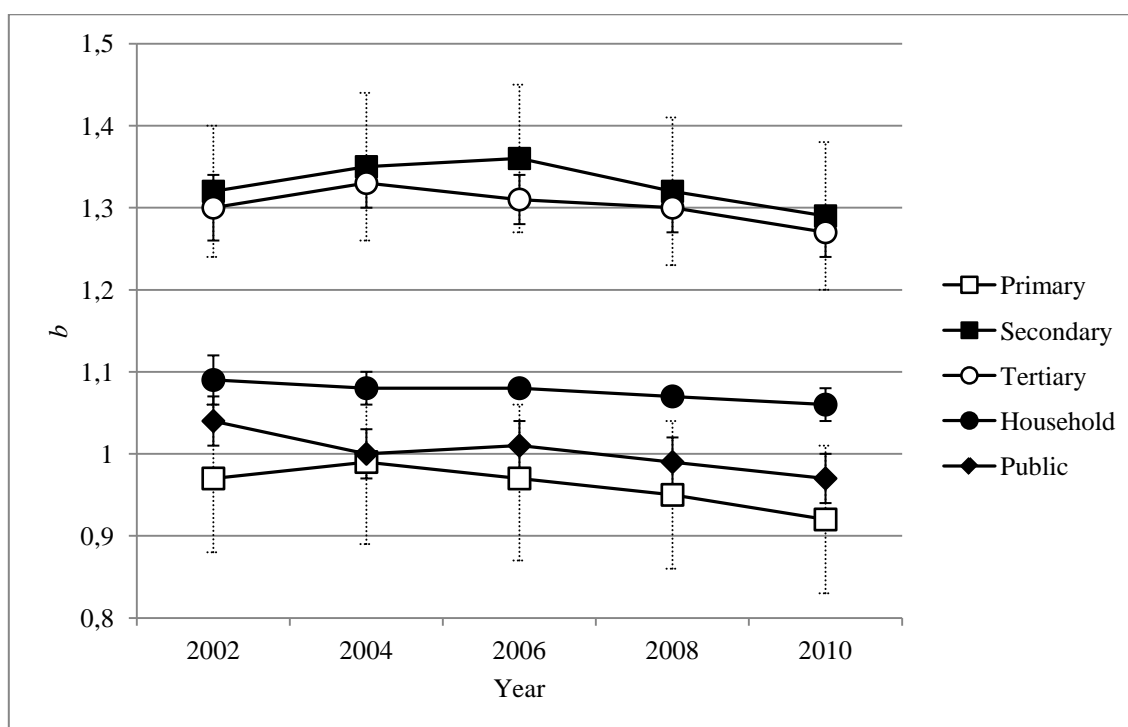
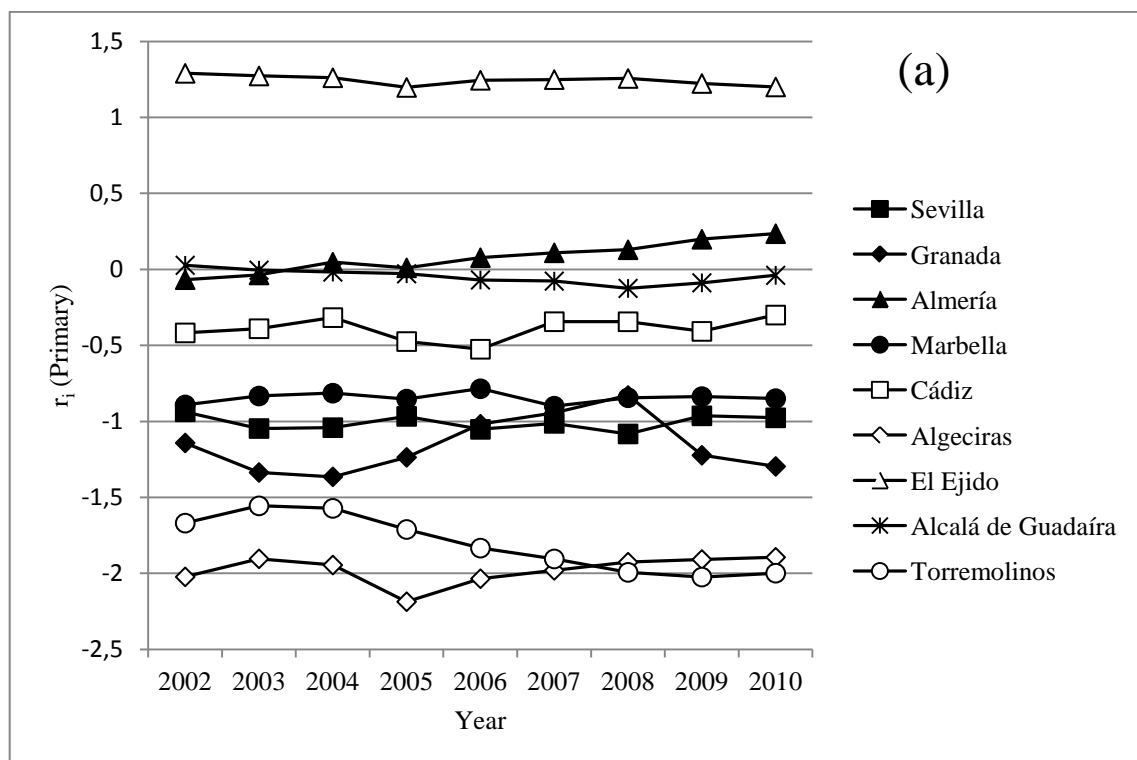
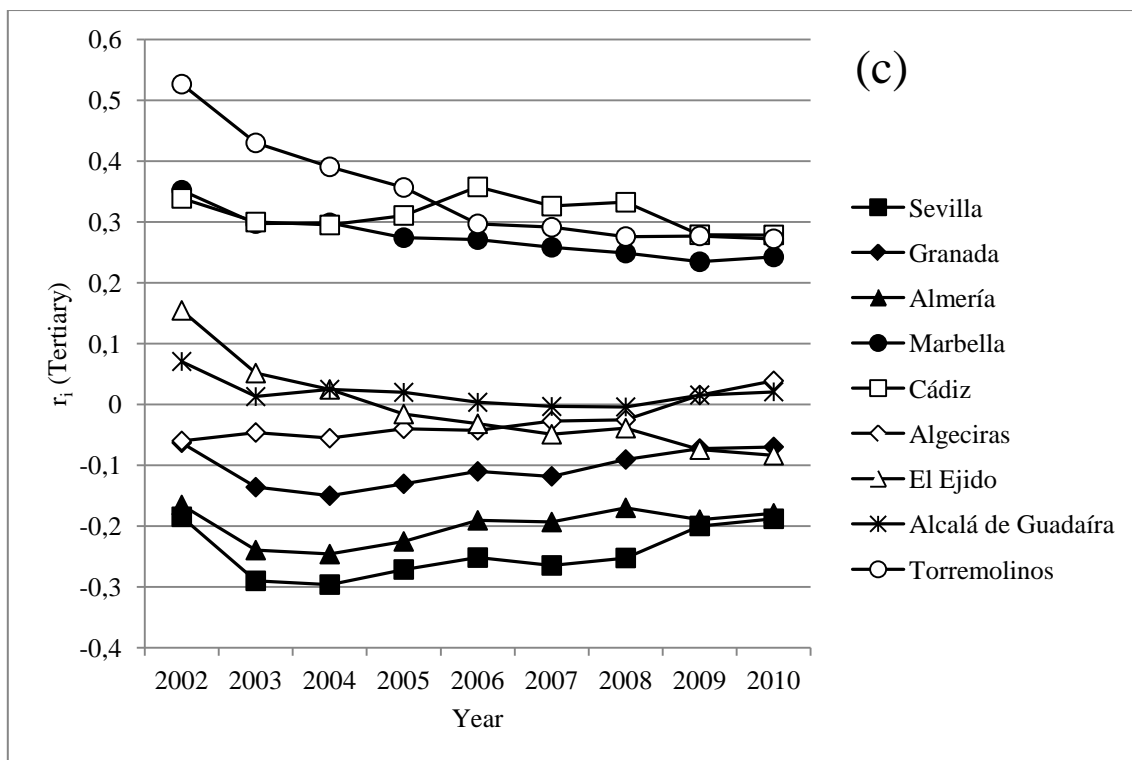
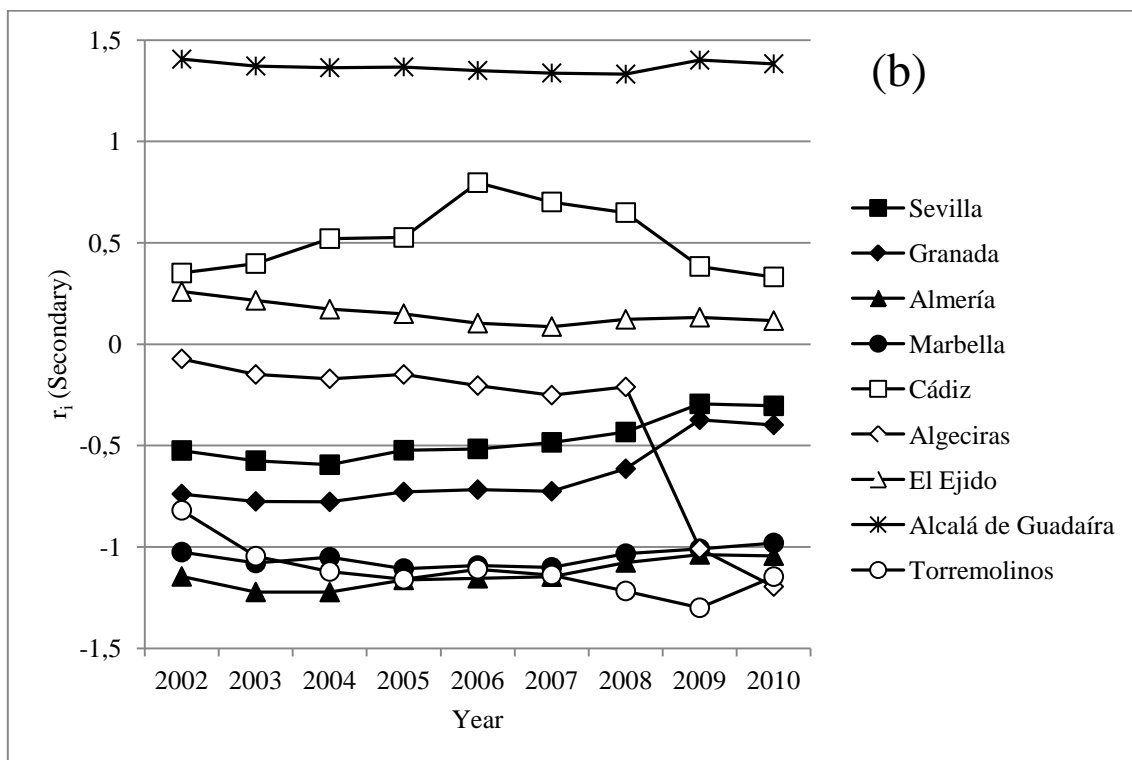


Fig. 2 Evolution of b in time for several economic sectors and confidence intervals (in dashed lines for primary and secondary sectors) following data from table 1.

Figure 3 shows the temporal evolution of residuals r_i for selected cities. Among some general trends that can be detected, the more striking one is the robustness and stability of r_i as a statistical measure through the years and sectors. There is also a broader variability in residuals for primary and secondary sectors (Figure 3, (a) and (b)), ranging from 1.5 to -2.5, compared to the rest of the economic sectors under study, which move from 0.6 to -0.3. This is in clear relation with the value of R^2 shown in Table 1, where minimum variation (i.e., higher R^2 values) accounts for household and tertiary sectors, followed by public sector. Case cities include the capital of the region (i.e., Seville), some other major cities and a random sample of cities both from inner and coastal regions (see next section).





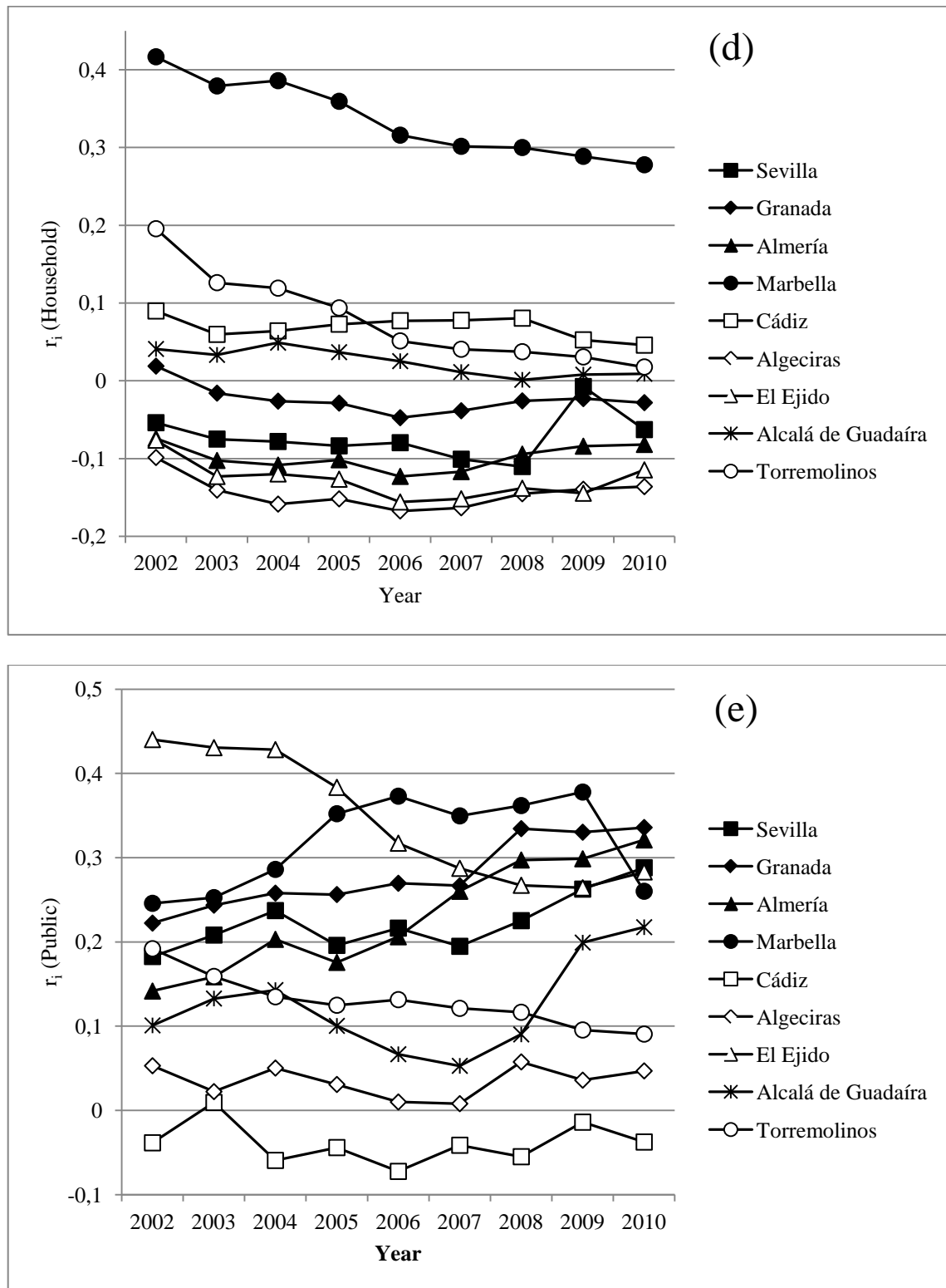


Fig. 3 Temporal evolution of residuals r_i for economic sectors and selected cities. (a) Primary, (b) secondary, (c) tertiary, (d) household and (e) public sectors.

Residuals can be statistically characterized by probability distributions. Figure 4 shows, as an example, the probability distribution (histogram) of residuals for household sector and year 2010. Residuals in primary and secondary sectors are well characterized by normal distributions, although poor values in

adj.- R^2 for the correlations make these results somehow meaningless. On the contrary, frequency of residuals for every year analysed and for tertiary, household and public sectors (i.e., those with significant values for adj.- R^2) are all well characterized by log-logistic distributions (in particular Burr 4-parameters distribution). As we can see, the probability distributions of residuals might suggest that they behave like random fluctuations, although they are stable in time and robust during the years and for every city analysed.

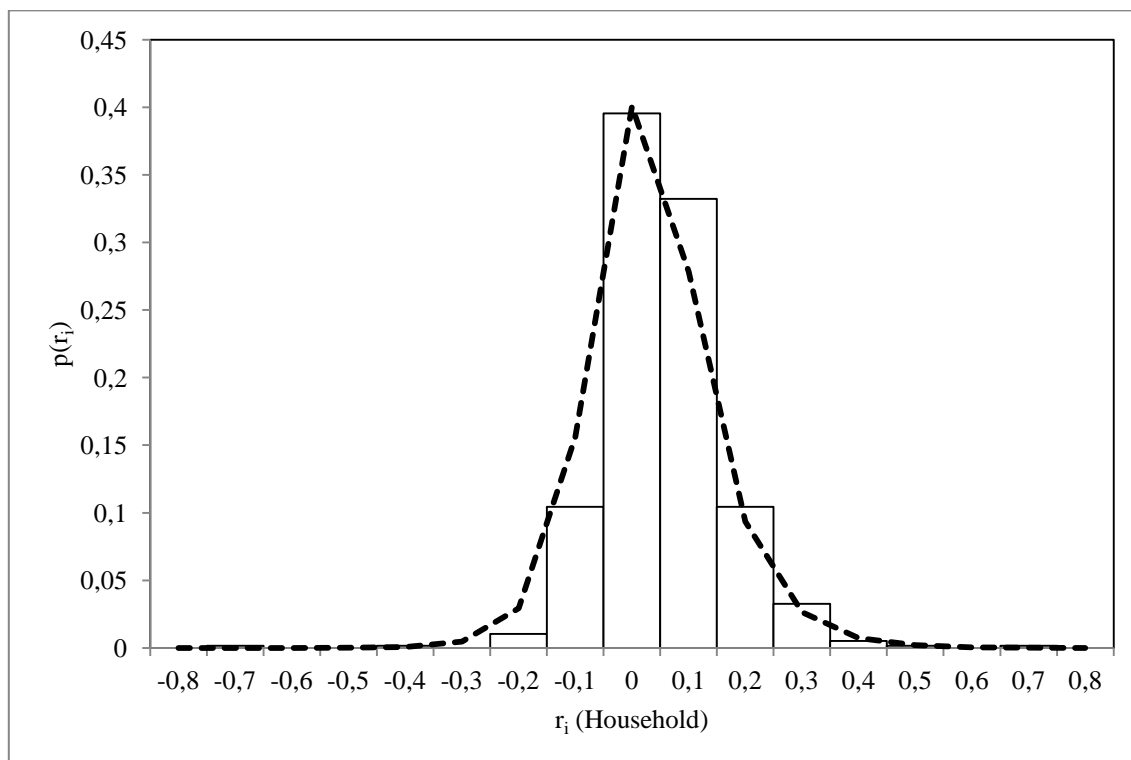


Fig. 4 Histogram with frequency of residuals and best-fit (Kolmogorov-Smirnov test) Burr function for household sector and year 2010.

Finally, in order to detect potential correlations among consumption sectors that could help characterizing exceptional cities, provinces or regions, residuals (4) have been related two by two after being normalized by their standard deviation and mean (5) and for every province. Most pair wise correlations do not give meaningful results. The clear exceptions are tertiary and household (Figure 5), highly correlated for all provinces with R^2 values as high as 0.68 for cities in the province of Cadiz in year 2001 (0.55 in year 2010) or Huelva ($R^2= 0.52$ for the same years and results not shown in the paper). For Málaga, the first economy among Andalucía provinces, tertiary is also highly correlated with public sector ($R^2= 0.59$ in year 2010) and public and household sectors offer constant and meaningful correlations ($R^2 > 0.6$) throughout the years as well.

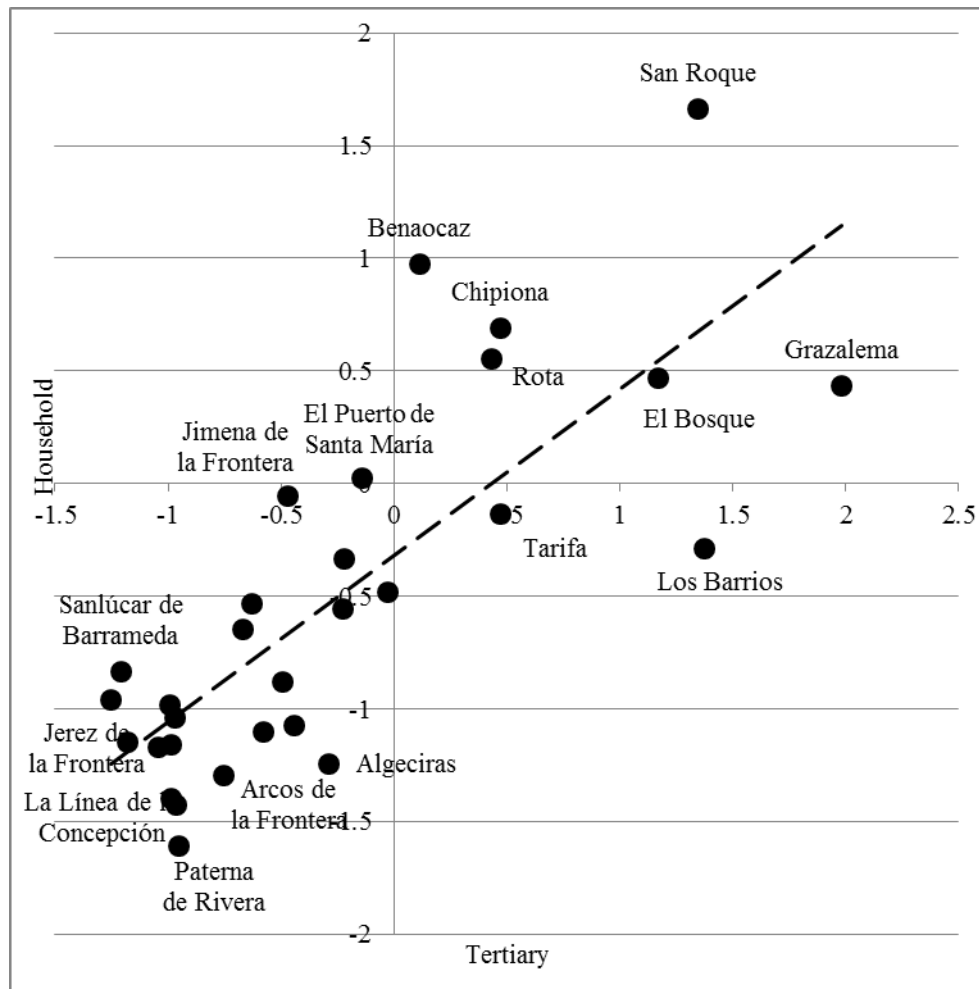


Fig. 5 Scatterplot and linear best-fit ($R^2 = 0.61$) between residuals in tertiary and household economic sectors for year 2010 and the province of Cádiz.

4 Discussion

In this paper we characterize the evolution of urban economic sectors by means of scaling laws in electricity consumption. Scaling exponents show a constant behaviour through the years for each sector, although a remarkable variability is found among them. One first evident result is the very poor fitting of equation (3) with data for the primary and secondary sectors. Figure 3, (a) and (b) clearly show a large value for residuals, which means that electricity consumption at this level, cannot be uniquely described in terms of population size. In spite of this, primary sector is the only economic sector characterized by a sublinear correlation, which could be related with diminishing rural areas with increasing population, as a global trend in urban agglomerations [2]. Rather unexpectedly, household electrical consumption scales superlinearly, as well as secondary and tertiary economic sectors. These three sectors accumulate 83% of the total electricity consumption of Andalucía (Figure 6). This would corroborate the fact that a city's growth in terms of population implies an improvement of their inner wealth and productivity indicators at the expenses of increasing electricity consumption at all economic levels. Only public sector seems to be reducing consumption given its continuous and decreasing exponent, that goes from 1.04 in year 2002, to 0.97 in year 2010. Recent analysis of electricity consumption data sets though suggest power law scaling with population size that would depend on more exogenous variables, such as geographic location [24] and consumption sectors [25], rather than

endogenous ones such as suboptimal transportation and/or distribution networks [5]. In this case, as we can see, two economic sectors, secondary and tertiary, are responsible for almost 50% of the global electricity consumption which, in turn, scales superlinearly with population. Therefore superlinear scaling of total electricity consumption (with $b = 1.08$) is mainly due to superlinear scaling of secondary and tertiary sectors and not (only) due to a supposed suboptimal distribution networks.

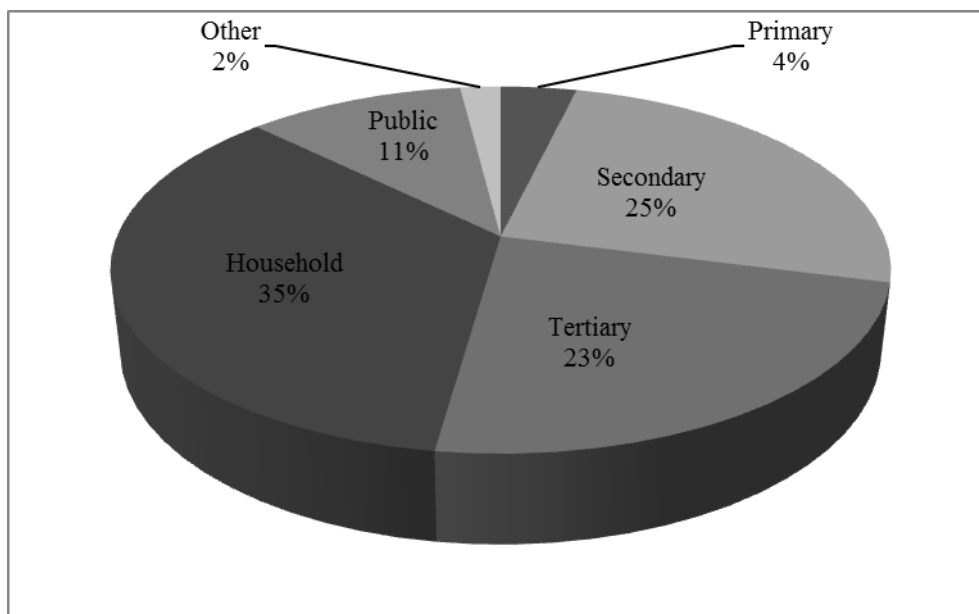


Fig. 6 Averaged electricity consumption distribution (as percentage) and by sector, from year 2000 to 2010.

Considering equations (1) and (2), it is straightforward to analyse the scaling behaviour between consumption and urban area, like

$$A \propto C^{n/b} \quad (6)$$

For $b = n$, consumption and urban area will scale linearly. For $n > b$ and $n < b$, urban area will scale super- and sublinearly with consumption, respectively. With a median value of $n \sim 2$ [6] and values for b , taken from this analysis, between 0.9 (primary sector) and 1.3 (secondary and tertiary sectors), electrical consumption would tend to restrain urban land area increase, specifically for those cities characterized with economic sectors with superlinear scaling factors.

The evolution of residuals in time is remarkably robust (Figure 3), showing tendencies than can be correlated with socioeconomic variables. Evolution of residuals for primary and secondary sectors (Figure 3, (a) and (b)) show a more acute variability, with positive residuals for cities highly characterized by its rural activity like El Ejido or Almería, and negative residuals for province capitals like Sevilla, Córdoba or Granada, or cities characterized by other economic activities, like Algeciras, and coastal cities like Marbella or Torremolinos. Two striking tendencies can be observed for two purely industrial

cities like Alcalá de Guadaíra and Algeciras. The former holds a maximum deviation in residuals for secondary sector since it is one of the most industrialized city of the region³. The latter, being essentially a shipment city with an important commercial haven, shows a decreasing trend from year 2008 onwards, clearly related to the global economic crisis and the advent of new and cheaper competitors in the Mediterranean area.⁴ Variability in tertiary sector diminishes (Figure 3, (c)) and a subtle tendency towards zero residuals is observed. Although a more detailed analysis of the region as a whole is needed, one clear socioeconomic process in the last years, and specially in Spain has been the concentration of tertiary sector in highly populated areas [26], which would explain decreasing negative residuals in capitals (i.e., Seville, Córdoba, Almería and Granada) and decreasing positive residuals for smaller cities (i.e., Torremolinos, Marbella or El Ejido). Patterns in Figure 3(d) and 3(e) suggest a regular tendency for most of the cities. The statistical procedure allows detecting higher consumption levels for well-known high standard touristic destinations like Marbella and Torremolinos, but with a decreasing trend that we will try to explain in the next subsection. Finally, Figure 3(e) shows the evolution of the consumption in the public sector. An increasing trend is detected for major cities and province capitals, indicating the radical tendency to concentrate expenses for these sectors in the last years due to mainly the global crisis [26]. A more acute tendency to higher residuals is observed for Alcalá de Guadaíra from 2007 onwards. This can be explained by an increase in public consumption due to a major social, urban and economic regeneration process of this city's historical centre, the URBAN plan, with the construction of huge infrastructures and new facilities (including a streetcar), than began in 2008 and will end in 2013.⁵

Finally, with residuals related two by two we are able to detect cities whose consumption is permanently under or over the mean and with an electricity consumption signature stable in time. In the case of Cádiz (Figure 5), a remarkable correlation can be observed for tertiary and household residuals which, apart from being robust in time, is able to disaggregate different kind of cities for this province. In particular coastal tourist destinations like San Roque, Tarifa, Rota, Chipiona or El Puerto de Santamaría together with Grazalema or El Bosque, inside the Grazalema Natural Park, show positive deviations in both sectors; while industrial or interior cities like Jerez, Arcos de la Frontera, Algeciras or La Línea de la Concepción, present a negative value in both residuals.

Last but not least, it is worth to stress the difficulties associated in finding city boundaries when validating the universality of scaling laws [27]. Cities are problematic to use as objects in geographical models for a number of reasons. Firstly, cities grow together and new sub-centers may emerge over time. Furthermore, cities are not atomic objects even during their lifetime since parts of two different cities may interact more with each other than these parts do with some parts of the cities to which they belong. The correlations presented in this analysis consider administrative boundaries, with populations not limited to any lower value, as it happens with Urban Areas (UAs) in the US, with population size of 50 000 or greater and delineated at the start of each decade [6]. In the same sense, it has been recently stated that algebraically distributed functions (i.e., Zipf, power-law, Pareto, etc.) have a functional form which depends on the number of events (Cristelli et al., 2012) and thus coherence should be asked for in a set to be described in terms of a rank-size rule. These questions should be at the core of a future research on a theory of urban living.

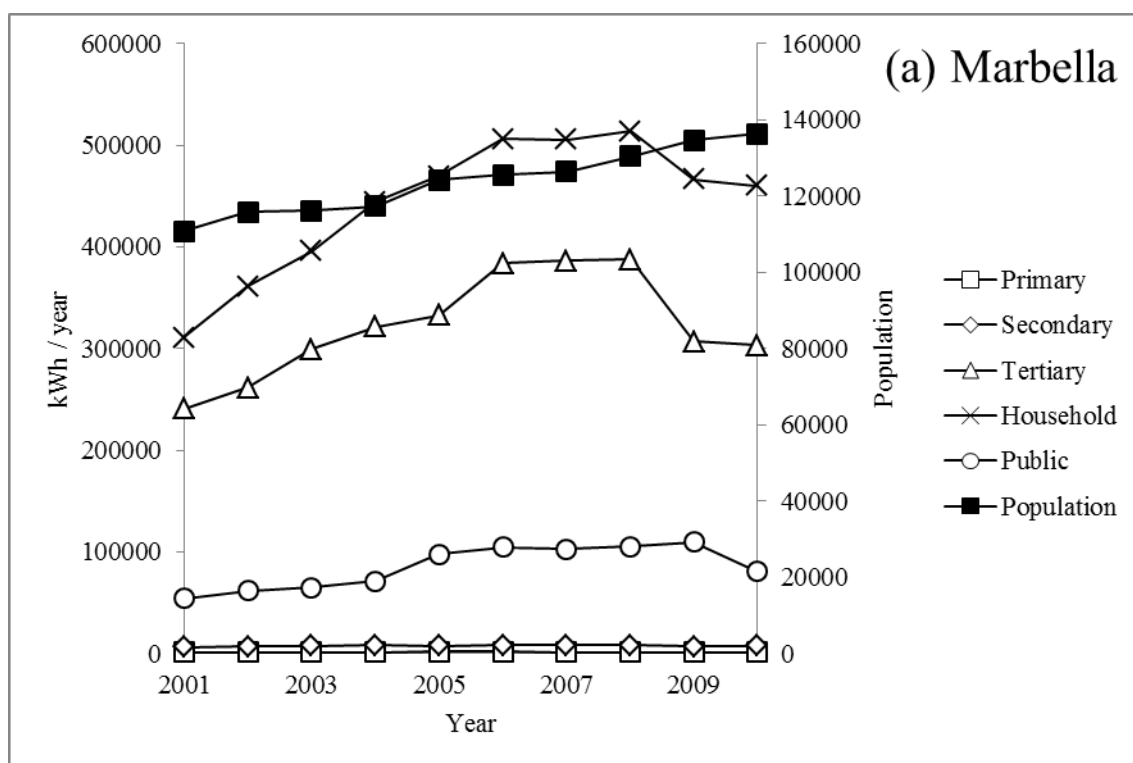
³ http://en.wikipedia.org/wiki/Alcal%C3%A1_de_Guada%C3%ADra#Economy (Last accessed: February 2013)

⁴ Spanish port faces threat from Tangier (Financial Times, April 14 2009, Robert Wright)

⁵ <http://www.ciudadalcala.org/pdf/Proyecto-URBAN.pdf> (last accessed in February 2013).

4.1 Relation with other social and economic variables

In order to explain some of the evolving processes observed and their possible correlation with other social and economic variables, we focus in two distinct cities. These are Marbella (population 136,300 in 2010) and El Ejido (population 84,227 in 2010). Marbella belongs to the province of Málaga, part of the region of the Costa del Sol, and it is especially popular for luxury tourism (from Northern Europe, Saudi Arabia, United Arab Emirates and the United States) and particularly noted for the presence of aristocrats, celebrities and wealthy people. Thus, primary and secondary sectors can be barely considered, while tertiary and household accumulate most of its global consumption (Figure 7). On the contrary, El Ejido, being also a coastal municipality, now in the province of Almería, is a centre of production for fruit and vegetables, in the middle of the "El Poniente" shire. Consequently, consumption in primary sector stands above the rest (Figure 7(b)). Both cities present similar evolving patterns in population and present a descending trend in global electricity consumption from 2007 – 2008 onwards, that can be related to increasing unemployment, constant rates in trade income taxes (IAE) and decreasing number of rooms per capita (Figure 8). If we look at the residuals of Marbella and El Ejido for household sector (Figure 3(d)), we observe a clear downward tendency that can be positively correlated with the number of phone lines per capita (Figure 8). Finally, Marbella's residuals in the public sector have been increasing, while El Ejido's ones have been decreasing (Figure 3(e)) showing the aforementioned tendency to centralize public expenditure in urban agglomerations with high population. This tendency is more clearly observed in El Ejido, where phone lines have been decreasing steadily for the last ten years, while Marbella has been able to maintain the same number of phone lines per capita until 2007. This fact could in turn influence household consumption, as can be observed in a slightly household consumption reduction in residuals for Marbella than in El Ejido (Figure 3(d)).



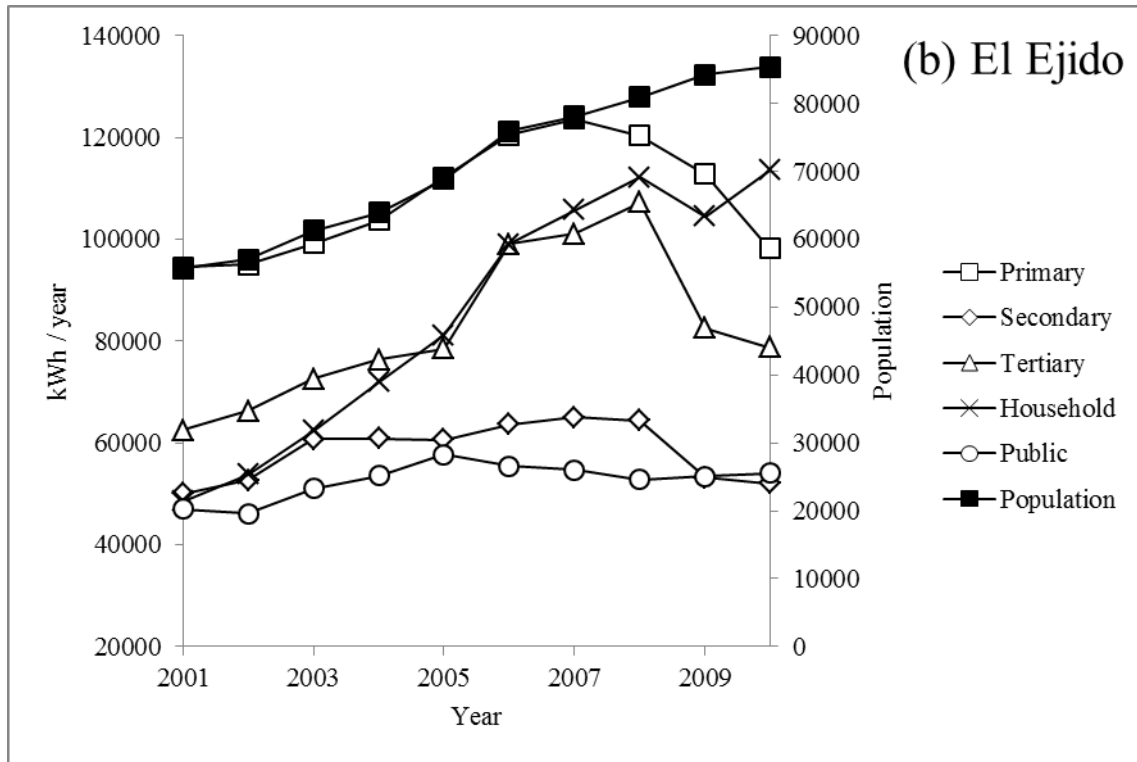
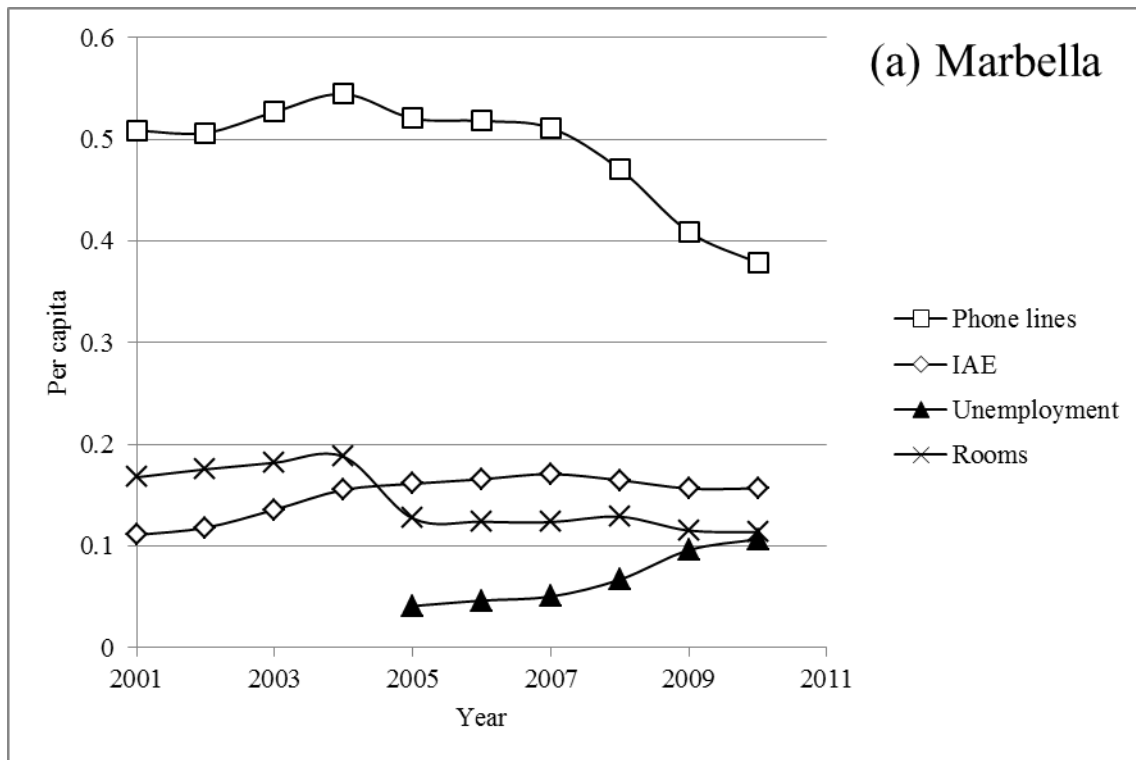


Fig. 7 Marbella and El Ejido electricity consumption and population patterns from 2001 to 2010.



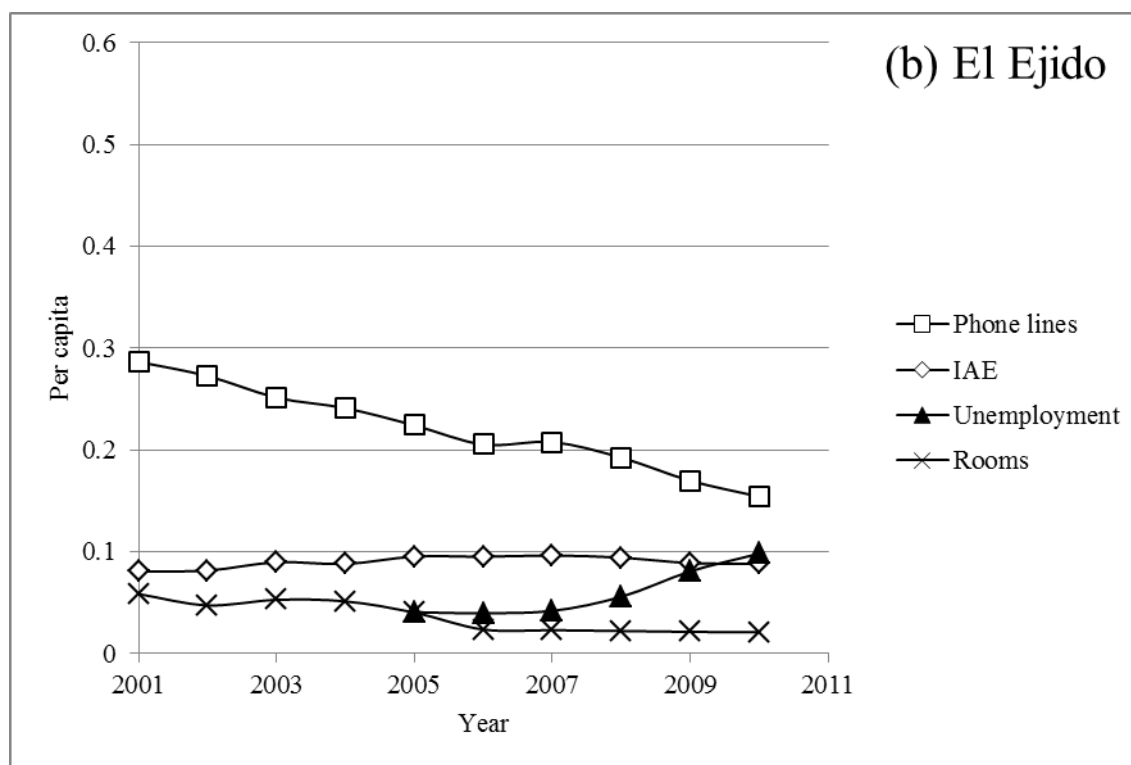


Fig. 8 Selected socioeconomic data per capita for Marbella and El Ejido from 2001 to 2010.

5 Conclusions

Allometric scaling is a remarkable trait of living organisms. Metabolism and other key biological processes scale with mass following a simple power law, usually with a scaling exponent less than one. The emergence of these economies of scale in the biological realm and since scaling laws typically reflect underlying generic features and physical principles that are independent of detailed dynamics or specific characteristics of particular models, have spurred research for finding similar scaling behaviour in man-made/conformed systems such as urban agglomerations. Many urban indicators have been correlated with city size in order to characterize economic development or knowledge creation within the urban environment. With the majority of people now living in cities, understanding how changes in these drivers modify and impact the fragile relation between biodiversity and society is a key issue for future scenarios of sustainable development and even the development of a theory of urban living and evolution. The current paper applies allometric scaling to electricity consumption in urban contexts. The average properties of these quantities are strongly predicted by the scaling law presented in (1). Results suggest that electricity consumption patterns for the region under study are: (a) increasing with urban population size, mainly due to secondary and tertiary sectors, and (b) persistent in time, with deviations from average values reflecting idiosyncratic traits for different cities, which can be finally related to social and economic variables. In this sense, the privileged role of cities as focal points for the generation and exchange of knowledge which turn them, at the same time, into more productive economic centres is clearly not for free: it appears together with a remarkable energetic cost that scales super-linearly with population size. With this methodology, regions can also be characterized by the residuals of such scaling correlations. These are robust in time, merging social, economic and energetic performances in one continuum that can be used to inspire and guide in the near term sustainability

issues, policy initiatives, social dynamics and urban planning decisions. The analyses presented here are empirical and additional work is necessary to explain these findings, relate them to urban dynamics and to properly discern their implications. Hypothesis and models behind results like the ones explored in this article are almost non-existent or at its very infancy. Complex issues like demonstrating causal mechanisms underlying these patterns or unfolding how urban planning can transform urban contexts into more energetically efficient environments in the short and mid-terms must be necessarily left to future research.

6 References

- [1] L.M.A. Bettencourt, G.B. West, A unified theory of urban living, *Nature*. 467 (2010) 912–913.
- [2] D. of E. and S.A. United Nations Population Division, *World Urbanization Prospects, the 2011 Revision*, (2012).
- [3] M. Batty, *Cities and complexity : understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*, MIT Press, Cambridge, Mass., 2005.
- [4] M. Batty, K.S. Kim, Form follows function: reformulating urban population density functions, *Urban Studies*. 29 (1992) 1043–1070.
- [5] L.M.A. Bettencourt, J. Lobo, D. Helbing, C. Kühnert, G.B. West, Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 104 (2007) 7301–7306.
- [6] J.D. Marshall, Urban land area and population growth: a new scaling relationship for metropolitan expansion, *Urban Studies*. 44 (2007) 1889–1904.
- [7] S.J. Gould, Allometry and size in ontogeny and phylogeny, *Biological Reviews*. 41 (1966) 587–640.
- [8] G.B. West, J.H. Brown, B.J. Enquist, A general model for the origin of allometric scaling laws in biology, *Science*. 276 (1997) 122–126.
- [9] G.B. West, J.H. Brown, The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization, *The Journal of Experimental Biology*. 208 (2005) 1575–1592.
- [10] T. Kolokotronis, V. Savage, E.J. Deeds, W. Fontana, Curvature in metabolic scaling, *Nature*. 464 (2010) 753–756.
- [11] L. von Bertalanffy, *General systems theory: foundations, development and applications*, Rev. Ed., George Braziller Inc., New York, 1968.
- [12] C. Kühnert, D. Helbing, G.B. West, Scaling laws in urban supply networks, *Physica A*. 363 (2006) 96–103.
- [13] S. Arbesman, J.M. Kleinberg, S.H. Strogatz, Superlinear scaling for innovation in cities, *Physical Review E*. 79 (2009) 16115.

- [14] S. Arbesman, N.A. Kristakis, Scaling of prosocial behavior in cities, *Physica A*. 390 (2011) 2155–2159.
- [15] V. Smil, *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, 2008.
- [16] J.H. Brown, W.R. Burnside, A.D. Davidson, J.R. DeLong, W.C. Dunn, M.J. Hamilton, et al., Energetic limits to economic growth, *BioScience*. 61 (2011) 19–26.
- [17] E.L. Glaeser, M.G. Resseger, The complementarity between cities and skills, *Journal of Regional Science*. 50 (2010) 221–244.
- [18] J.E. Rauch, Productivity gains from geographic concentration of human capital: evidence from cities, *Journal of Urban Economics*. 34 (1993) 380–400.
- [19] S.S. Rosenthal, W.C. Strange, Evidence on the nature and sources of agglomeration economies, in: J.V. Henderson, J.F. Thisse (Eds.), *Handbook of Regional and Urban Economics*, Elsevier/ North-Holland, Amsterdam, 2004.
- [20] G.A. Carlino, S. Chatterjee, R.M. Hunt, Urban density and the rate of invention, *Journal of Urban Economics*. 61 (2007) 389–419.
- [21] Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía (SIMA), Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2012).
- [22] M. Batty, L. March, The method of residues in urban modelling, *Environment and Planning A*. 8 (1976) 189–214.
- [23] L.M.A. Bettencourt, J. Lobo, D. Strumsky, G.B. West, Urban Scaling and Its Deviations: Revealing the Structure of Wealth, Innovation and Crime across Cities, *PLoS ONE*. 5 (2010) 9.
- [24] X. Zhu, A. Xiong, L. Li, M. Liu, X.S. Chen, Scaling law between urban electrical consumption and population in China, in: *Complex Sciences, Ser. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering 4*, Springer, Berlin, 2009.
- [25] R. Horta, M. Rosas, S. Valverde, Discerning electricity consumption patterns from urban allometric scaling, *Complexity in Engineering Conference*. (2010).
- [26] *Anuario Económico de España (La Caixa)*, Barcelona, 2012.
- [27] E. Arcaute, E. Hatna, P. Ferguson, H. Youn, A. Johansson, M. Batty, City boundaries and the universality of scaling laws, *arXiv:1301.1674 [physics.soc-ph]*. (2013).

ARTICLE IV

Article en procés de revisió en revista Journal of Urban Technology

Títol: *Obsolescence in Urban Energy Infrastructures: The Influence of Scaling Laws on Consumption Forecasting*

Aquest article ocupa les pàgines 202 a 220 de la tesi, i no pot ser mostrat per respecte als drets de l'editor de la revista