



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

---

Departament de Teoria del Senyal  
i Comunicacions

Ph.D. Dissertation

# Resource Management Techniques for Sustainable Networks with Energy Harvesting Nodes

Author: Javier Rubio López

Advisor: Dr. Antonio Pascual Iserte

Signal Processing and Communications Group  
Department of Signal Theory and Communications  
Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, May 2016



*A mis padres y a Roser,*



# Abstract

In the last years there has been a considerable expansion of the wireless networks jointly with a continuous increase of the number of users. This expansion and the fact that new applications require higher data rates involve a need for a substantial increase of system capacity. In wireless networks, this capacity increase is technically challenging since the resources to be shared among the users are limited. At the same time, in order to be more spectrally efficient, the general trend is to reduce the coverage radius of the access networks. Due to such short distances between transmitters and receivers, the radiated powers can be comparable with or even lower than the powers consumed by the front-end and the baseband stages. In this context, novel strategies for assigning the network resources that take into account all the power consumption sinks should be developed.

On the other hand, it is important to emphasize that battery-powered terminals are becoming broadly used as they provide high mobility to the end users. Additionally, transmitters (base stations in the context of cellular communications) or sensors are sometimes deployed in places where there is no access to the power grid, such as rural areas, making batteries the only mean to be able to offer communications service in those areas. Unfortunately, one of the limiting factors of current technology is the short lifetime of the batteries; the battery technology has not evolved fast enough to cope with the increase in energy consumption associated with the growth of the processing capability of the devices. In wireless sensors networks this can be a serious issue since sensors are usually placed in positions that are difficult or impossible to be accessed, thus, making the process of replacing the batteries very costly. In cellular environments, the telecommunication providers have put a lot of attention on providing good services with enhanced coverage, but this will not be translated into a really perceived added value if the users cannot make use of them due to the mentioned battery limitations. In this regard, it is not enough to become more efficient in terms of energy consumption; instead, a solution that provides sustainable networks is required. Energy harvesting is a technological solution that enables the network devices to recharge the batteries by collecting energy from the environment. Hence, it is a potential technology both to increase the lifetime of battery-powered devices and to reduce the overall carbon footprint, which is also a global major concern nowadays.

This dissertation proposes novel techniques for assigning network resources among the users by considering that the coverage radii are small, implying that some power consumption sinks not considered so far should now be introduced, and by considering that the network devices are battery-powered terminals provided with energy harvesting capabilities. We develop resource

allocation techniques for different scenarios, from the classical single-input single-output settings to more advanced multiple-input multiple-output configurations, and assuming that the channel as well as the battery information at the transmitter are fully or partially known. In this framework, two different configurations in terms of harvesting capabilities are considered. First, we assume that the energy source is external and not controllable, such as solar energy. In this context, the proposed design should adapt to the energy that is currently being harvested. We also study in this context the effect of having a finite backhaul connection that links the wireless access network with the core network, optimizing the resources according to some backhaul capacity limitation. On the other hand, we propose a design in which the transmitter feeds actively the receivers with energy by transmitting signals that receivers use for recharging their batteries. In this case, the power transfer design should be carried out jointly with the power control strategy for users that receive information as both procedures, transfer of information and transfer of power, are implemented at the transmitter and make use of a common resource, i.e., power.

Apart from techniques for assigning the radio resources, this dissertation develops a procedure for switching on and off base stations. Concerning this, it is important to notice that one characteristic of the traffic profile is that it is not constant throughout the day; usually larger traffic demands are required during day hours and smaller ones during night periods. This is precisely the feature that can be exploited to define a strategy based on a dynamic selection of the base stations to be switched off when the traffic load is low, without affecting the quality experienced by the users. Thanks to this procedure, we are able to deploy smaller energy harvesting sources, e.g., solar panels, and smaller batteries and, thus, to reduce the cost of the equipment which directly translates into a reduction of the capital expenditures of the network deployment.

Finally, we derive some procedures to optimize high level decisions of the network operation in which variables from several layers of the protocol stack are involved. In this context, admission control procedures for deciding which user should be connected to which base station are studied and evaluated, based on the expected network aggregate throughput, the average channel information, and the current battery levels, among others. A multi-tier multi-cell scenario is assumed in which base stations belonging to different tiers have different capabilities, e.g., transmission power, battery size, end energy harvesting source size. A set of strategies that require different computational complexity are derived for scenarios with different user mobility requirements.

# Resumen

En los últimos años ha habido una expansión de las redes sin cables (en inglés *wireless*) a la vez que el número de usuarios ha incrementado. Esta expansión y el hecho de que las nuevas aplicaciones necesitan una mayor velocidad de transmisión, requieren incrementar la capacidad de las redes *wireless* de forma sustancial. En las redes *wireless*, este incremento de capacidad plantea un reto importante ya que los recursos disponibles de éstas son compartidos entre los distintos usuarios y son limitados. Además, la tendencia actual para ser eficientes en el uso del espectro, es la de reducir los radios de coberturas de las redes de acceso *wireless*. Debido a la corta distancia entre los transmisores y los receptores, las potencias radiadas pueden ser comparables o incluso más bajas que las potencias consumidas por las etapas de radio-frecuencia y de procesado de banda base. En este contexto, es necesario desarrollar estrategias innovadoras que asignen los recursos disponibles en las redes *wireless* teniendo en cuenta todas las fuentes de consumo de potencia y no sólo la potencia radiada como se ha hecho hasta ahora.

Por otro lado, es también importante enfatizar que los receptores con fuentes de alimentación finitas, es decir baterías finitas, están siendo utilizados en muchas aplicaciones, como teléfonos móviles, etc. debido a que proporcionan una alta movilidad a los usuarios finales. Además, los transmisores (estaciones base en el contexto de comunicaciones móviles) y los sensores son a menudo desplegados en lugares donde no hay acceso a la red eléctrica, como en zonas rurales, haciendo de las baterías el único medio para proporcionar energía y así poder ofrecer servicio en esas áreas. Desafortunadamente, uno de los factores más restrictivos de la tecnología actual es la corta duración de las baterías; la tecnología de las baterías no ha sido desarrollada lo suficientemente rápido como para compensar el incremento de energía consumida en los dispositivos asociado al aumento de capacidad de procesado de los mismos. En redes de sensores esto puede ser un gran problema debido a que los sensores son desplegados en numerosas ocasiones en zonas de difícil acceso, lo que hace que el reemplazo de las baterías sea muy costoso. En las redes celulares, los proveedores de servicios de telecomunicaciones han puesto mucha atención en proporcionar servicios de alta calidad pero esto no se traduce a un valor añadido percibido si los usuarios no pueden hacer uso de ellos debido a los problemas de batería mencionados anteriormente. En este sentido, no es suficiente con ser más eficiente desde un punto de vista de la energía consumida, se necesita una solución que sea sostenible.

Sistemas de captación de energía (en inglés *energy harvesting*) son una solución tecnológica que permiten que los diferentes dispositivos de la red puedan recargar sus baterías recolectando energía del medio ambiente (por ejemplo, mediante placas solares). Esto lo convierte en una

tecnología potencial para incrementar la duración de las baterías de los dispositivos y para reducir el impacto medioambiental de las redes de telecomunicaciones que es otra de las grandes preocupaciones hoy en día.

Esta tesis doctoral propone técnicas innovadoras para asignar los recursos disponibles en las redes *wireless* considerando que los radios de cobertura son pequeños, lo que implica que otras fuentes de consumo de energía no consideradas hasta ahora se tienen que introducir en los diseños, y considerando que los dispositivos están alimentados con baterías finitas y que tienen a su disposición fuentes de *energy harvesting*. En esta tesis se desarrollan técnicas de asignación de recursos para diferentes escenarios, desde el clásico escenario *single-input single-output* hasta configuraciones más avanzadas como *multiple-input multiple-output*, y asumiendo que el canal de comunicaciones y la información de la batería pueden ser conocidos de forma completa o parcial a la hora de hacer el diseño de asignación de recursos. En este contexto, se consideran dos configuraciones diferentes en función de las capacidades de *energy harvesting*. En primer lugar, se asumirá que la fuente de energía es externa e incontrolable, como por ejemplo la energía solar. Los diseños propuestos deben adaptarse a la energía que está siendo recolectada en ese preciso momento. Para este escenario, también se estudia el efecto de tener una conexión de *backhaul* con capacidad finita. En segundo lugar, se propone un diseño en el cual el transmisor es capaz de enviar energía a los receptores mediante señales de radio-frecuencia diseñadas para ese fin, energía que es utilizada para recargar las baterías. En este ámbito, la estrategia de asignación de recursos debe realizarse de forma conjunta entre los usuarios que reciben información y los que reciben energía ya que comparten un recurso de la red común como es la potencia.

Aparte de técnicas de asignación de recursos radio, en esta tesis doctoral se desarrolla un procedimiento dinámico para apagar y encender estaciones base. En este ámbito, es importante notar que una de las características del perfil de tráfico es que no es constante a lo largo del día. Usualmente, la demanda de tráfico es mayor durante las horas diurnas y menor durante las horas nocturnas. Este es precisamente el patrón que se puede explotar para definir una estrategia dinámica con la que decidir qué estaciones base deben ser apagadas cuando la demanda de tráfico es baja, todo ello sin afectar a la calidad experimentada por los usuarios. Gracias a este procedimiento, es posible desplegar fuentes de *energy harvesting* más pequeñas, es decir, paneles solares, y baterías más pequeñas. Gracias a esto, es posible reducir el coste de los equipos, lo que se traduce en una reducción en los costes de inversión del despliegue de la red.

Finalmente, esta tesis doctoral presenta procedimientos para optimizar decisiones de nivel más alto que afectan directamente al funcionamiento global de la red de acceso. Para tomar estas decisiones, se hace uso de diversas variables que pertenecen a diferentes capas de la pila de protocolos. En particular, esta tesis aborda el diseño de técnicas de control de admisión de usuarios a estaciones base en entornos con múltiples estaciones base, basándose en la velocidad de transmisión agregada obtenida en la red, la información estadística de los canales, y el nivel actual de las baterías, entre otros. Como se ha comentado, el escenario considerado está

compuesto de múltiples estaciones base, donde cada estación base pertenece a una familia y donde cada una de estas familias presenta diferentes capacidades, como por ejemplo, potencia de transmisión, tamaño de batería, o tamaño de la fuente de *energy harvesting*. En esta tesis se derivan un conjunto de técnicas con diferentes cargas computacionales que son de utilidad para aplicar a escenarios con diferente movilidad de usuarios, siendo las técnicas que requieren menos carga computacional más idóneas para escenarios donde la movilidad de usuarios es un factor determinante.



# Resum

Durant els últims anys hi ha hagut una expansió de les xarxes sense cables (*wireless* pel seu terme en anglès) i, de la mateixa manera, ha augmentat el nombre d'usuaris. Aquesta expansió, justament amb el fet que les noves aplicacions necessiten una velocitat de transmissió més elevada, requereixen incrementar la capacitat de les xarxes *wireless* de forma substancial. En les xarxes *wireless*, aquest increment de la capacitat planteja un repte important ja que els recursos disponibles d'aquestes són compartits entre diferents usuaris i són limitats. A més a més, la tendència actual per poder ser eficients en l'ús de l'espectre, és la de reduir els radis de cobertura de les xarxes d'accés *wireless*. Degut a la curta distància entre els transmissors i els receptors, les potències irradiades solen ser comparables, o inclús més baixes, que les potències consumides per les etapes de radio-freqüència i de processat de banda base. En aquest àmbit, és necessari desenvolupar estratègies innovadores que assignin els recursos disponibles a les xarxes *wireless*, tenint en compte, totes les fonts de consum de potència i, no, tant sols la potència irradiada, com s'ha fet fins ara.

Per altra banda, és també important emfatitzar que els receptors amb fonts d'alimentació finites, és a dir, bateries finites, s'utilitzen en moltes aplicacions, com per exemple telèfons mòbils, degut a que proporcionen una alta mobilitat als usuaris finals. A més a més, els transmissors (estacions base en el context de comunicacions mòbils) i els sensors són molts cops desplegats en llocs on no es té accés a la xarxa elèctrica, per exemple en zones rurals, fent de les bateries l'únic mitjà per proporcionar energia i, així, poder oferir-hi els serveis. Malauradament, un dels factors més restrictius de la tecnologia actual és la curta duració de les bateries; la tecnologia de les bateries no ha estat desenvolupada suficientment ràpid com per poder compensar l'increment d'energia consumida en els dispositius, associada a l'augment de capacitat de processat del senyal. En xarxes de sensors això pot ser un gran problema degut a que els sensors són desplegats en nombroses ocasions en zones de difícil accés, el que dificulta el reemplaçament de les bateries. En les xarxes cel·lulars, els proveïdors de serveis de telecomunicacions han posat molta atenció en proporcionar serveis d'alta qualitat, però això no és traduït en un valor afegit percebut si els usuaris no poden fer ús dels serveis degut als problemes de bateria mencionats anteriorment. En aquest sentit, no és suficient el fet de ser més eficient des d'un punt de vista d'energia consumida, es necessita una solució que sigui sostenible.

Sistemes de captació d'energia (*energy harvesting* pel seu terme en anglès) són una solució tecnològica que permet que els diferents dispositius de la xarxa puguin recarregar les bateries recollint energia del medi ambient (per exemple, mitjançant plaques solars). Això ho con-

verteix en una tecnologia en potència per incrementar la duració de les bateries dels dispositius, i per a reduir l'impacte mediambiental de les xarxes de telecomunicacions, que és una de les grans preocupacions d'avui en dia.

Aquesta tesis doctoral proposa tècniques innovadores per assignar els recursos disponibles a les xarxes *wireless* considerant que els radis de cobertura són petits, el que implica que altres fonts de consum d'energia no considerades fins al moment s'hagin d'introduir dins els dissenys, i considerant que els dispositius estan alimentats amb bateries finites i que tenen a la seva disposició fonts de *energy harvesting*. En aquesta tesis es desenvolupen tècniques d'assignació de recursos per a diferents escenaris, des del clàssic escenari *single-input single-output*, fins a les configuracions més avançades com *multiple-input multiple-output*, i també assumint que el canal de comunicacions i la informació de la bateria poder ser coneguts de forma completa o parcial a l'hora de fer el disseny d'assignació de recursos. En aquest context, es consideren dues configuracions diferents en funció de les capacitats de l'*energy harvesting*. En primer lloc, s'assumirà que la font d'energia és externa i incontrolable com, per exemple, l'energia solar. Els dissenys proposats han d'adaptar-se a l'energia que s'està recol·lectant en un precís moment. Per aquest escenari, també s'estudia l'efecte de tenir una connexió de *backhaul* amb capacitat finita, el qual enllaça la xarxa d'accés *wireless* amb la xarxa troncal de l'operador. En segon lloc, es proposa un disseny en el qual el transmissor és capaç d'enviar energia als receptors mitjançant senyals de radiofreqüència dissenyats per aquest fi, energia que és utilitzada per recarregar les bateries. En aquest àmbit, l'estratègia d'assignació de recursos s'ha de realitzar de forma conjunta entre els usuaris que reben informació i els que reben energia ja que comparteixen un recurs de la xarxa comú, la potència.

A part de tècniques d'assignació de recursos radio, en aquesta tesis doctoral es desenvolupa un procediment dinàmic per apagar i encendre estacions base. En aquest àmbit, és important notar que una de les característiques del perfil de tràfic és que no és constant al llarg del dia. Usualment, la demanda de tràfic és superior durant les hores diürnes i inferior durant les hores nocturnes. Aquest és precisament el patró que es pot explotar per definir una estratègia dinàmica per poder decidir quines estacions base han de ser apagades quan la demanda de tràfic és baixa, tot això sense afectar la qualitat experimentada pels usuaris. Gràcies a aquest procediment, es possible desplegar fonts d'*energy harvesting* més petites, és a dir, panells solars, i bateries més petites. Això implica que és possible reduir el cost dels equips, fet que es tradueix en una reducció dels costos d'inversió del desplegament de la xarxa.

Finalment, aquesta tesis doctoral presenta procediments per optimitzar decisions de nivell més alt que afecten directament al funcionament global de la xarxa d'accés. Per prendre aquestes decisions, es fa ús de diverses variables que pertanyen a diferents capes de la pila de protocols. En aquest context, aquesta tesis aborda el disseny de tècniques de control d'admissió d'usuaris a estacions base en entorns amb múltiples estacions base, basant-se amb la velocitat de transmissió agregada obtinguda a la xarxa, la informació estadística dels canals, i el nivell actual de les

bateries, entre altres. Com ja s'ha comentat anteriorment, l'escenari considerat està format per múltiples estacions base, on cada estació base pertany a una família, i on cada una d'aquestes famílies presenta diferents capacitats, per exemple, potència de transmissió, mida de la bateria, o mida de la font d'*energy harvesting*. En aquesta tesis es deriven un conjunt de tècniques amb diferents costos computacionals que són d'utilitat per a poder aplicar a escenaris amb diferents mobilitats d'usuaris; sent les tècniques que requereixen menys cost computacional més idònies per escenaris on la mobilitat d'usuaris és un factor determinant.



# Agradecimientos

Y todo llega a su fin. Con estas líneas se pone fin a una aventura que comenzó hace poco más de tres años, tiempo que he necesitado para madurar en mi carrera investigadora y poder desarrollar todo el contenido presente en este documento. La elaboración de una tesis no es un camino fácil, uno se tiene que doctorar en muchos ámbitos, no sólo en el profesional. Aunque siendo sincero, y a pesar de que estoy a punto de doctorarme, escribir estas líneas está siendo la tarea más difícil que he tenido que superar en todo este tiempo. Me gustaría dedicar estas líneas que ponen fin a esta etapa a todos los que han contribuido de alguna manera u otra a que esta aventura haya sido como ha sido ya que no cambiaría absolutamente nada de lo transcurrido en ella. Es por ello que estas líneas van dedicadas a todas y cada una de esas personas.

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mi director de tesis, Toni Pascual, por su ayuda incondicional e incesante durante todo este tiempo. Gracias por creer en mi y brindarme esta oportunidad. Es un placer poder decir que tu puerta siempre estuvo abierta para charlar sobre cualquier tema, sin importar la hora ni el día de la semana. Sin duda, el trabajo de este documento también es tuyo y no tendría ni la forma ni el contenido que tiene si no fuese por ti. Gracias. Espero que tú también te lleves un buen recuerdo de mi etapa como doctorando. Estoy convencido de que nuestra amistad durará de por vida, sin importar donde estemos.

Considero que he tenido la gran suerte de pertenecer a un extraordinario grupo de investigación. Compañeros de trabajo con los que he compartido vivencias, desarrollo de proyectos, y buenos momentos. He podido trabajar con ellos y aprender de ellos. Espero que ellos también hayan aprendido algo de mi. Al menos, lo intenté. Gracias a todos: Sandra Lagén, Jaume Del Olmo, Olga Muñoz, Toni Pascual, Josep Vidal, Adrián Agustín, y Juan Fernández. No me puedo olvidar tampoco de los compañeros del proyecto NEWCOM# del CTTC: Maria Gregori, Miquel Payaró, y Jesús Gómez.

Especial agradecimiento para mis compañeros de despacho, que en mayor o menor medida me han ayudado siempre que lo he necesitado. En particular: Sandra Lagén, Adriano Pastore, Màrius Caus, Josep Font, Eva Lagunas, Marc Torrellas, Juanma Castro, Jaume Del Olmo, y Pere Giménez. Espero haber sido útil cuando solicitasteis mis consejos. A los que ya os fuisteis, desearos todo lo mejor, a los que estáis a punto de terminar, mucho ánimo para la recta final (que además hace cuesta arriba), y a los que recién comenzáis, desearos toda la suerte del mundo. Trabajad duro y veréis como llegan los resultados.

Me gustaría agradecer el esfuerzo y la dedicación que han mostrado los profesores externos a mi grupo con los que he podido colaborar en algún momento determinado. Mis agradecimientos van a Andrea Goldsmith, Daniel P. Palomar, y Antonio G. Marqués. Me gustaría dar un agradecimiento especial a la profesora Andrea Goldsmith, por acogerme en su grupo de investigación y tratarme como un miembro más durante mi estancia en la *Stanford University*. Sin duda una experiencia inolvidable. Allí tuve la oportunidad de conocer gente extraordinaria con la que pasé buenisimos momentos. Gracias a todos: Mahnoosh Alizadeh, Nima Soltani, Mainak Chowdhury, Jinyuan Chen, Milind Rao, Alon Kipnis, Rui Song, Stefano Rini, y Marco Mondelli, y a la pequeña familia española Idoia Ochoa, Mikel Hernaez, y Javier García. *What a wonderful time we had exploring the bay area with the bikes! Thanks Mainak and Nima.* Tampoco me puedo olvidar de la maravillosa familia que me acogió durante esos meses. La familia Osborn, compuesta por Elizabeth, Henry, Margaret, y Paul, vivía en una preciosa casa en la ciudad de Menlo Park. Gracias por cuidarme como si fuera uno de los vuestros.

No me puedo olvidar de dar las gracias a mis amigos de toda la vida. Con los que comparto los buenos y malos momentos de mi vida personal. En especial: Carlos Rubio, Israel Díaz, Hugo Hernández, Víctor Moreno, y a mis dos buenos amigos de la carrera Carlos Serra y Arnau Raventós. Algunos de vosotros estáis inmersos en cambios importantes en vuestra vidas. Sólo deseamos todo lo mejor. Ya sabéis que podéis contar conmigo al igual que yo también he contado con vosotros durante todos estos años. Gracias por aguantarme (que no es fácil).

*Last, but not least,* me gustaría dar un especial agradecimiento muy merecido a mi padres Montse y Javier, y a mi pareja Roser, y dedicar esta tesis a ellos por su apoyo siempre que lo he necesitado y por hacerme tan feliz durante todos estos años. Estoy convencido de que todos ellos están contentos de que haya llegado este momento. Quiero que sepáis, que sin vosotros, esta aventura no hubiera tenido ni el color ni la forma que tiene. *I love you all.*

*Javier Rubio López  
Barcelona, Mayo 2016*

# **ANEXO**

## **FINANCIACIÓN RECIBIDA DURANTE EL DESARROLLO DE LA TESIS DOCTORAL**

El trabajo de investigación que ha dado lugar a la tesis doctoral “Resource Management Techniques for Sustainable Networks with Energy Harvesting Nodes” ha recibido financiación del Grup de Processament del Senyal i Comunicacions (SPCOM-GPS) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), del Ministerio de Economía y Competitividad de España a través de las becas FPI BES-2012-052850 y EEBB-I-15-09380 y a través de los proyectos nacionales GRE3N-LINK-MAC (TEC2011-29006-C03-02) y DISNET (TEC2013-41315-R), de la Comisión Europea a través de los proyectos Network of Excellence in Wireless COMMunications NEWCOM# (no. 318306) y TUCAN3G (no. ICT-2011-601102), del programa Europeo de Cooperación en Ciencia y Tecnología a través del proyecto COST Action IC0902, y del Govern de la Generalitat de Catalunya (AGAUR) a través de las ayudas 2009 SGR 891 y 2014 SGR 60.

Barcelona, mayo de 2016.

# Contents

<b>Notation</b>	<b>xxiii</b>
<b>Acronyms</b>	<b>xxvii</b>
<b>List of Figures</b>	<b>xxxix</b>
<b>List of Algorithms</b>	<b>xxxix</b>
<b>I Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>3</b>
1.1 Motivation . . . . .	3
1.1.1 Power Consumption Sinks . . . . .	5
1.1.2 Energy Harvesting Systems . . . . .	7
1.2 State of the Art of Resource Allocation Strategies with Energy Harvesting Nodes	9
1.2.1 Passive Energy Harvesting Systems . . . . .	10
1.2.2 Active Energy Harvesting Systems . . . . .	13
1.3 Outline of Dissertation . . . . .	14
1.3.1 Energy Harvesting Capabilities at the Receiver Side . . . . .	14
1.3.2 Energy Harvesting Capabilities at the Transmitter Side . . . . .	16
1.4 Research Contributions . . . . .	19
<b>2 Mathematical Preliminaries</b>	<b>23</b>
2.1 Convex Optimization Theory . . . . .	23
2.1.1 Convex Sets and Convex Functions . . . . .	24
2.1.2 Definition of Convex Problems . . . . .	25
2.1.3 Duality Theory and KKT Conditions . . . . .	27
2.1.4 Solving Convex Problems . . . . .	30
2.2 Ergodic Stochastic Optimization Theory . . . . .	30
2.2.1 Problem Formulation . . . . .	31
2.2.2 Problem Resolution . . . . .	32
2.3 Multi-Objective Optimization . . . . .	35

2.3.1	Definitions . . . . .	36
2.3.2	Efficient Solutions . . . . .	36
2.3.3	Finding Pareto Optimal Points . . . . .	36
2.4	The Majorization-Minimization Optimization Method . . . . .	38
2.5	Extension to the Case of Complex Variables . . . . .	39
<b>II</b>	<b>Energy Harvesting Techniques at the Receiver Side</b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>Energy-Aware Resource Allocation for Battery-Constrained Receivers</b>	<b>43</b>
3.1	Introduction . . . . .	43
3.1.1	Related Work . . . . .	44
3.1.2	Main Contribution . . . . .	45
3.1.3	Organization of the Chapter . . . . .	46
3.2	Signal Model . . . . .	46
3.3	Energy Modeling . . . . .	47
3.3.1	Power Consumption Models . . . . .	47
3.3.2	Energy Harvesting Model . . . . .	50
3.3.3	Battery Dynamics . . . . .	50
3.3.4	Energy Assignment for Decoding . . . . .	51
3.4	Energy-Aware Multiuser MIMO Precoder Design . . . . .	53
3.4.1	Precoder Design with Perfect CSI and Energy Constraints . . . . .	53
3.4.2	Robust Precoder Design with Imperfect CSI . . . . .	61
3.4.3	Robust Precoder Design with Quantized Battery Knowledge . . . . .	65
3.4.4	Numerical Simulations . . . . .	66
3.4.5	Asymptotic Results . . . . .	72
3.5	Scheduling Procedures for User Selection . . . . .	81
3.5.1	Introduction . . . . .	81
3.5.2	Energy-Aware Proportional Fair Scheduling . . . . .	82
3.5.3	Numerical Simulations of the Scheduling Policy . . . . .	85
3.6	Chapter Summary and Conclusions . . . . .	90
3.A	Proof of Proposition 3.1 . . . . .	91
3.B	Proof of Proposition 3.3 . . . . .	92
3.C	Proof of Proposition 3.4 . . . . .	94
3.D	Derivation of the Complexity of Matrix Operations . . . . .	95
3.E	Derivation of the Computational Complexity of the Proposed Scheduler . . . . .	95

3.F	Derivation of the Computational Complexity of the Optimum Scheduler . . . . .	96
<b>4</b>	<b>User Grouping and Resource Allocation Strategies in Multiuser MIMO</b>	
	<b>SWIPT Networks</b>	<b>99</b>
4.1	Introduction . . . . .	99
4.1.1	Related Work . . . . .	99
4.1.2	Main Contribution . . . . .	101
4.1.3	Organization of the Chapter . . . . .	102
4.2	System Model . . . . .	103
4.2.1	Signal Model . . . . .	103
4.2.2	Power Consumption Models . . . . .	105
4.2.3	Battery Dynamics . . . . .	106
4.3	Part I: BD-Based Transmit Covariance Optimization Techniques . . . . .	107
4.3.1	Joint Resource Allocation and User Grouping Formulation . . . . .	107
4.3.2	Weighted Sum Rate Maximization with Harvesting Constraints . . . . .	110
4.3.3	User Selection Policies . . . . .	118
4.3.4	Overall User Grouping and Resource Allocation Algorithm . . . . .	123
4.3.5	Numerical Simulations . . . . .	123
4.3.6	Harvesting Management Strategies Based on Convex Sensitivity Theory .	130
4.4	Part II: MM-Based Transmit Covariance Optimization Techniques . . . . .	134
4.4.1	Problem Formulation . . . . .	136
4.4.2	MM-based Techniques to Solve Problem (4.41) . . . . .	139
4.4.3	Numerical Simulations of the MM Strategies and Comparison with the BD-Based Techniques . . . . .	144
4.5	Chapter Summary and Conclusions . . . . .	150
4.A	Proof of Theorem 4.1 . . . . .	152
4.B	Proof of Proposition 4.6 . . . . .	153
4.C	Proof of Lemma 4.1 . . . . .	153
4.D	Proof of Lemma 4.2 . . . . .	153
4.E	Proof of Lemma 4.3 . . . . .	154
4.F	Proof of Proposition 4.3 . . . . .	154
4.G	Proof of Proposition 4.4 . . . . .	158
4.H	Proof of Proposition 4.5 . . . . .	160
4.I	Benchmark Formulations and Algorithms Based on the MM Method . . . . .	163
4.J	Gradients of Problem (4.46) . . . . .	164

<b>III</b>	<b>Energy Harvesting Techniques at the Transmitter Side</b>	<b>167</b>
<b>5</b>	<b>Energy Dimensioning Methodology and Dynamic Base Station On-Off Mechanisms for Sustainable Wireless Networks</b>	<b>169</b>
5.1	Introduction . . . . .	169
5.1.1	Related Work . . . . .	170
5.1.2	Main Contribution . . . . .	171
5.1.3	Organization of the Chapter . . . . .	171
5.2	System Model . . . . .	172
5.3	Energy Provision and Energy Systems Dimensioning . . . . .	175
5.3.1	Energy Computation . . . . .	176
5.3.2	Energy Dimensioning . . . . .	177
5.4	BS On/Off Switching Strategies . . . . .	178
5.4.1	Deterministic Switching Strategies . . . . .	178
5.4.2	Robust Switching Strategy . . . . .	180
5.5	Numerical Simulations . . . . .	184
5.6	Chapter Summary and Conclusions . . . . .	191
5.A	Proof of Proposition 5.1 . . . . .	192
5.B	Computation of Moments of Truncated Gaussian Random Variables . . . . .	195
<b>6</b>	<b>Stochastic Resource Allocation with Backhaul and Energy Constraints</b>	<b>197</b>
6.1	Introduction . . . . .	197
6.1.1	Related Work . . . . .	198
6.1.2	Main Contribution . . . . .	199
6.1.3	Organization of the Chapter . . . . .	199
6.2	Stochastic Resource Allocation for the Downlink Scenario . . . . .	199
6.2.1	System Model . . . . .	199
6.2.2	Problem Formulation and Resolution . . . . .	203
6.2.3	Numerical Simulations . . . . .	210
6.3	Stochastic Resource Allocation for the Uplink Scenario . . . . .	217
6.3.1	System Model and Assumptions . . . . .	217
6.3.2	Problem Formulation and Resolution . . . . .	219
6.3.3	Numerical Simulations . . . . .	222
6.4	Chapter Summary and Conclusions . . . . .	226
6.A	Proof of Proposition 6.1 . . . . .	228
6.B	Description of the Algorithm to Solve Problem (6.31) . . . . .	230

<b>7</b>	<b>User Association for Load Balancing in Heterogeneous Networks Powered with Energy Harvesting Sources</b>	<b>233</b>
7.1	Introduction . . . . .	233
7.2	System Model and Problem Formulation . . . . .	235
7.2.1	System Description . . . . .	235
7.2.2	Power Consumption Model and Battery Dynamics . . . . .	236
7.2.3	Energy Harvesting Model . . . . .	238
7.2.4	System Definitions . . . . .	238
7.2.5	Problem Formulation . . . . .	239
7.3	Part I: Greedy-Based User Association Strategies . . . . .	242
7.3.1	General Epoch by Epoch User Association Formulation . . . . .	244
7.3.2	Epoch by Epoch User Association: Low Complexity Solutions . . . . .	248
7.3.3	Distributed Algorithm . . . . .	252
7.3.4	Asymptotic Analysis of the Battery Evolution . . . . .	256
7.4	Part II: Ergodic-Based User Association Strategies . . . . .	257
7.4.1	Problem Formulation . . . . .	257
7.4.2	Resolution of the Inner Problem (7.47) . . . . .	259
7.4.3	Resolution of the Outer Problem (7.48) . . . . .	261
7.4.4	Overall User Association Algorithm . . . . .	264
7.5	Numerical Simulations . . . . .	265
7.5.1	Numerical Simulations of the User Association Strategy from Section 7.3 . . . . .	266
7.5.2	Numerical Simulations of the User Association Strategy from Section 7.4 . . . . .	272
7.6	Chapter Summary and Conclusions . . . . .	278
7.A	Approach to Obtain the Optimum Short-Term Variables . . . . .	280
7.B	Proof of Proposition 7.1 . . . . .	283
7.C	Generalization of the Sensitivity Analysis in Convex Analysis . . . . .	285
<b>IV</b>	<b>Conclusions</b>	<b>289</b>
<b>8</b>	<b>Conclusions and Future Work</b>	<b>291</b>
8.1	Conclusions . . . . .	291
8.2	Future Work . . . . .	293
	<b>References</b>	<b>296</b>



# Notation

$\mathbb{R}, \mathbb{C}$	The set of real and complex numbers, respectively.
$\mathbb{R}_+$	The set of nonnegative real numbers.
$\mathbb{R}^n, \mathbb{R}_+^n, \mathbb{C}^n$	The set of vectors of dimension $n$ with entries in $\mathbb{R}, \mathbb{R}_+$ , and $\mathbb{C}$ , respectively.
$\mathbb{R}^{n \times m}, \mathbb{R}_+^{n \times m}, \mathbb{C}^{n \times m}$	The set of $n \times m$ matrices with entries in $\mathbb{R}, \mathbb{R}_+$ , and $\mathbb{C}$ , respectively.
$x$	Scalar.
$\mathbf{x}$	Column vector.
$\mathbf{X}$	Matrix.
$\mathcal{X}$	Set.
$ \mathcal{X} $	Cardinality of set $\mathcal{X}$ .
$[\mathbf{x}]_n$	The $n$ -th component of vector $\mathbf{x}$ .
$[\mathbf{X}]_{pq}$	Element in the $p$ -th row and $q$ -th column of matrix $\mathbf{X}$ .
$[\mathbf{X}]_{:,q}$	The $q$ -th column of matrix $\mathbf{X}$ .
$\mathbf{I}_n$	Identity matrix of order $n$ . The dimension $n$ might be omitted when it can be deduced from the context.
$\mathbf{1}_n, \mathbf{0}_n$	Column vector of $n$ ones or zeros. The dimension $n$ might be omitted when it can be deduced from the context.
$(\cdot)^T$	Transpose operator.
$(\cdot)^*$	Complex conjugate operator.
$(\cdot)^H$	Complex conjugate and transpose (Hermitian) operator.
$\text{Tr}(\mathbf{X})$	Trace of matrix $\mathbf{X}$ .
$ \mathbf{X} $ or $\det(\mathbf{X})$	Determinant of matrix $\mathbf{X}$ .
$\text{Diag}(\mathbf{x})$	Diagonal matrix where the diagonal entries are given by the vector $\mathbf{x}$ .
$\ x\ $	Vector norm.
$\ \mathbf{X}\ _F$	Frobenius norm of matrix $\mathbf{X}$ : $\ \mathbf{X}\ _F = \sqrt{\text{Tr}(\mathbf{X}^H \mathbf{X})}$
$\mathbf{X}^{-1}$	Inverse of matrix $\mathbf{X}$ .

$\mathbf{X}^{1/2}$	Hermitian square root of the positive semidefinite matrix $\mathbf{X}$ , i.e., $\mathbf{X} = \mathbf{X}^{1/2}\mathbf{X}^{1/2}$ .
$\mathbf{S}^n$	The set of Hermitian $n \times n$ matrices $\mathbf{S}^n \triangleq \{\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{n \times n}   \mathbf{X} = \mathbf{X}^H\}$ .
$\mathbf{S}_+^n$	The set of Hermitian positive semidefinite $n \times n$ matrices $\mathbf{S}_+^n \triangleq \{\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{n \times n}   \mathbf{X} = \mathbf{X}^H \succeq \mathbf{0}\}$ .
$\mathbf{S}_{++}^n$	The set of Hermitian positive definite $n \times n$ matrices $\mathbf{S}_{++}^n \triangleq \{\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{n \times n}   \mathbf{X} = \mathbf{X}^H \succ \mathbf{0}\}$ .
$\mathbf{X} \succeq \mathbf{0}$	Matrix $\mathbf{X}$ is positive semidefinite.
$\mathbf{X} \succ \mathbf{0}$	Matrix $\mathbf{X}$ is positive definite.
$\mathbf{X} \succeq \mathbf{Y}$	$\mathbf{X} - \mathbf{Y}$ is positive semidefinite.
$\mathbf{X} \succ \mathbf{Y}$	$\mathbf{X} - \mathbf{Y}$ is positive definite.
$\text{vec}(\mathbf{X})$	Vec operator: if $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n]$ , then $\text{vec}(\mathbf{X})$ is the column vector $[\mathbf{x}_1^T, \dots, \mathbf{x}_n^T]^T$ .
$\lambda_{\max}(\mathbf{X})$	Maximum eigenvalue of the positive semidefinite matrix $\mathbf{X}$ .
$\mathbf{u}_{\max}(\mathbf{X})$	Normalized eigenvector associated with the maximum eigenvalue of the positive semidefinite matrix $\mathbf{X}$ .
$\mathbf{x} \succeq \mathbf{0}$	Componentwise greater, i.e., if $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ , then $x_i \geq 0$ , $i = 1, \dots, n$ .
$ x $	Modulus of the complex scalar $x$ .
$(x)^+$	Projection of $x$ onto the nonnegative orthant, i.e., $(x)^+ = \max\{0, x\}$ .
$(x)_a^b$	Projection of $x$ onto the interval $[a, b]$ , i.e., $(x)_a^b = \min\{\max\{a, x\}, b\}$ .
$\sim$	Distributed according to.
$\text{Pr}(\cdot)$	Probability.
$\mathbb{E}[\cdot]$	Mathematical expectation.
$\mathcal{N}(\mathbf{m}, \mathbf{C})$	Real Gaussian vector distribution with mean $\mathbf{m}$ and covariance matrix $\mathbf{C}$ .
$\mathcal{CN}(\mathbf{m}, \mathbf{C})$	Complex circularly symmetric Gaussian vector distribution with mean $\mathbf{m}$ and covariance matrix $\mathbf{C}$ .
$\otimes$	Kronecker product.
$\text{Re}\{\cdot\}$	Real part.
$\text{Im}\{\cdot\}$	Imaginary part.
$\triangleq$	Defined as.

---

$\approx$	Approximately equal.
$\arg$	Argument.
$\max, \min$	Maximum and minimum.
$\sup, \inf$	Supremum and infimum.
$x^*$	Optimum value of variable $x$ in an optimization problem.
$\text{dom } f$	Domain of function $f$ .
$f(x)\big _{x=a}$	Function $f(x)$ evaluated at $x = a$ .
$\sup_{\mathbf{x}} f, \inf_{\mathbf{x}} f$	Supremum and infimum of $f$ with respect to $\mathbf{x}$ .
$\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}, \nabla_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x})$	Gradient of function $f$ with respect to $\mathbf{x}$ .
$\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i}$	Partial derivative of function $f$ with respect to $x_i$ .
$\frac{\partial f(x)}{\partial x}, \dot{f}(x)$	Derivative of function $f(x)$ .
$\nabla_{\mathbf{x}}^2 f(\mathbf{x})$	Hessian matrix of function $f$ with respect to $\mathbf{x}$ .
$\int_a^b f(x) dx$	Integral of $f(x)$ with respect to $x$ in the interval $[a, b]$ .
$\lim$	Limit.
$\exp(\cdot)$	Exponential function.
$\log(\cdot)$	Base-2 logarithm.
$\mathbb{1}_{\{x\}}$	Indicator function defined as $\mathbb{1}_{\{x\}} = 1$ if $x$ is true; otherwise $\mathbb{1}_{\{x\}} = 0$ .



# Acronyms

<b>ADC</b>	Analog to Digital Converter.
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise.
<b>BD</b>	Block Diagonalization.
<b>BER</b>	Bit Error Rate.
<b>BS</b>	Base Station.
<b>CAPEX</b>	Capital Expenditures.
<b>CDF</b>	Cumulative Distribution Function.
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access.
<b>CoMP</b>	Coordinate Multi-Point.
<b>CRE</b>	Cell Range Expansion.
<b>CSI</b>	Channel State Information.
<b>DAC</b>	Digital to Analog Converter.
<b>DL</b>	Downlink.
<b>DP</b>	Dynamic Programming.
<b>EVD</b>	Eigenvalue Decomposition.
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplexing.
<b>GP</b>	Geometric Programming.
<b>HetNets</b>	Heterogeneous Networks.
<b>HPA</b>	High Power Amplifier.
<b>ICT</b>	Information and Communications Technology.
<b>i.i.d.</b>	independent and identically distributed.
<b>KKT</b>	Karush-Kuhn-Tucker.
<b>LMS</b>	Least Mean Square.
<b>LP</b>	Linear Programming.
<b>LTE</b>	Long Term Evolution.
<b>MAC</b>	Medium Access Control.

<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output.
<b>MISO</b>	Multiple-Input Single-Output.
<b>ML</b>	Maximum Likelihood.
<b>MM</b>	Majorization-Minimization or Minorization-Maximization.
<b>MMSE</b>	Minimum Mean-Square Error.
<b>MSE</b>	Mean-Square Error.
<b>MUI</b>	Multiuser Interference.
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
<b>PDF</b>	Probability Distribution Function.
<b>PF</b>	Proportional Fair.
<b>PHY</b>	Physical.
<b>QoS</b>	Quality of Service.
<b>QP</b>	Quadratic Programming.
<b>RF</b>	Radio Frequency.
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification.
<b>SC</b>	Small Cell.
<b>SCA</b>	Successive Convex Approximation.
<b>SDP</b>	Semidefinite Programming.
<b>SINR</b>	Signal to Interference Noise Ratio.
<b>SISO</b>	Single-Input Single-Output.
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio.
<b>SVD</b>	Singular Value Decomposition.
<b>SWIPT</b>	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer.
<b>TDD</b>	Time Division Duplexing.
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System.
<b>UL</b>	Uplink.
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Networks.
<b>w.l.o.g.</b>	without loss of generality.
<b>w.r.t.</b>	with respect to.
<b>ZMCCS</b>	Zero Mean Circularly Complex Symmetric.
<b>ZF</b>	Zero Forcing.





# List of Figures

1.1	Expected sales of energy harvesting modules by application (in M\$) (source: [Dev12a]). . . . .	5
1.2	The required transmit power for bands of interest assuming short distances. For the ISM band, centered at 2.5 GHz, the figure shows the required power for Bluetooth applications (80 MHz bandwidth) for a data-rate of 26 Mbps. The 60 GHz band presents the upcoming high-bandwidth high-throughput wireless paradigm. The bandwidth is large (3 GHz) and the throughput is 1.5 Gbps. Path-loss exponents are assumed to be 3 (indoor environment) and the noise figure is 3 dB. Most applications today lie somewhere between the two curves. Observe that even for 1.5 Gbps link, the transmit power is not more than a few hundred milliwatts for a distance of 3 m. Many of these applications are designed for even smaller distances, where the transmit power is only a few tens of milliwatts. The source for this figure is [Gro11]. . . . .	6
1.3	Reference scenario for the first part of the dissertation. Receivers are battery-constrained with energy harvesting capabilities. . . . .	15
1.4	Reference scenario for the second part of the dissertation. Transmitters are battery-constrained with energy harvesting capabilities. . . . .	17
2.1	Convex sets and non-convex sets. . . . .	25
2.2	Example of a convex and a concave function. . . . .	25
3.1	RF chain model for the transmitter and the receiver considered in this thesis. . .	48
3.2	Schematic representation of the DL broadcast multiuser communication system. Note that each user feeds back its current battery level and the current CSI. The BS designs the precoder matrices using the feedback information. . . . .	54
3.3	Example of the optimum multiuser water-filling in a scenario with 3 users and 2 streams per user. Users 1 and 2 are energy saturated (i.e., $R_k^* = R_{\max,k}$ ) whereas user 3 achieves the common water level. It is assumed that $\sigma^2 = 1$ . . . . .	59

3.4	Uniform quantization regions of the battery level of the $k$ -th user. As it can be observed, there are $2^b$ regions corresponding to the use of $b$ quantization bits. . .	66
3.5	Comparison of the average data rate evolution for the given scenario with and without battery quantization for two different values of $\alpha$ . . . . .	67
3.6	Evolution of the average battery levels with and without battery quantization for two different values of $\alpha$ . . . . .	68
3.7	Comparison of the average rate with perfect and imperfect CSI with $\alpha = 0.1$ . . .	69
3.8	Average sum rate (over the 50 frames considered in the simulations) and aggregated residual battery in percentage after 50 frames as a function of $\alpha$ for different numbers of users. A system with up to 4 users is considered whose battery sizes $C_{\max}^k$ are 3,000 J, 6,000 J, 9,000 J, and 12,000 J. The transmitter has 10 antennas and the terminals are provided with 2 antennas each. . . . .	70
3.9	Optimum value of $\alpha$ and corresponding sum rate as a function of the probability of energy packet arrival. . . . .	71
3.10	Average data rate evolution for different decoder consumption models (exponential and linear) and different decoder efficiencies. Note that, due to space limitations, we have not included the units of the decoder constants $c_1$ , $c_2$ , and $\nu$ . . . . .	72
3.11	Aggregated expected value of the rates $\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_k \mathbb{E}[R_k(t)]$ . . . . .	75
3.12	Expected value of the individual batteries. . . . .	75
3.13	Expected value of the rates with users with different harvesting intensities. . . .	76
3.14	Expected value of the batteries with users with different harvesting intensities. .	77
3.15	Evolution of the data rates for different types of decoder power consumption models. The units of the decoder constants $c_1$ , $c_2$ , and $\nu$ are W, 1/(bits/s/Hz), and W/(bits/s/Hz), respectively. . . . .	79
3.16	Evolution of the battery levels for different types of decoder power consumption models. The units of the decoder constants $c_1$ , $c_2$ , and $\nu$ are W, 1/(bits/s/Hz), and W/(bits/s/Hz), respectively. . . . .	80
3.17	General downlink reference scenario. . . . .	82
3.18	Evolution of the battery levels for two different values of $\alpha$ and with different users demanding different QoS. . . . .	87

3.19	Average data rates for users with different types of QoS for the three proposed scheduling strategies and different values of $\alpha$ . . . . .	88
3.20	Evolution of the ratio of average data rates as a function of the ratio of qos. . . . .	88
3.21	Percentage of users achieving their qos. . . . .	89
4.1	Schematic representation of the DL broadcast multiuser communication system. Note that each user can switch from being an information user to being an energy harvester user. Note also that BD is applied at the transmitter. This is the transmitter architecture used in the first part of this chapter. In the second part of the chapter BD will not be applied and, hence, the BS will be composed of user grouping and precoding stages without precancelation matrices $\{\tilde{\mathbf{V}}_i^{(0)}\}$ . . . . .	104
4.2	Representation of the three-dimensional rate-power surface of problem (4.23). The figure represents the existing trade-off between the optimal solution of the problem, i.e., the weighted sum rate, and the two power harvesting constraints. . . . .	116
4.3	Contour lines of the three-dimensional rate-power surface of problem (4.23). Notice that the density of lines increases with the gradient of the surface, and the color indicates the value of such surface. Note also that some important boundary characteristic points have been marked. . . . .	117
4.4	Average sum rate of the system for the different approaches. . . . .	125
4.5	CDF of the individual data rates of all the users in the system for the different approaches. . . . .	126
4.6	Time evolution of the battery levels of all users in the system for the different approaches. . . . .	126
4.7	Average harvested power of all the users in the system for the different approaches (in power units). . . . .	127
4.8	Expected system sum rate as a function of the distance to the BS. . . . .	128
4.9	Sum of the expected harvested powers by all users (in power units) as a function of the distance to the BS. . . . .	128
4.10	Expected system sum rate as a function of the relative size of the harvesting user group. . . . .	129
4.11	Sum of the expected harvested powers by all users (in power units) as a function of the relative size of the harvesting user group. . . . .	129

4.12	Performance of the proposed algorithm with minimum energy management based on (4.39). . . . .	135
4.13	Performance of the proposed algorithm based on (4.35). . . . .	135
4.14	Performance of the proposed algorithm based on (4.37). . . . .	136
4.15	Convergence of the system sum rate vs number of iterations for three different approaches. . . . .	145
4.16	Convergence of the system sum rate vs computational time for three different approaches. . . . .	146
4.17	Convergence of the system sum rate vs iterations for a gradient approach for constrained optimization. . . . .	147
4.18	Convergence of the system sum rate vs computational time for a gradient approach for constrained optimization. . . . .	147
4.19	Rate-power surface for the MM method. . . . .	148
4.20	Rate-power surface for the BD method. . . . .	149
4.21	Contour of rate-power surface for the MM method. . . . .	149
4.22	Contour of rate-power surface for the BD method. . . . .	150
4.23	Rate region for different values of $Q_j$ (in power units). . . . .	151
5.1	Scenario with two BSs placed at the same communications tower with fully overlapped coverage areas. . . . .	172
5.2	Real landscape of the scenarios under consideration in this work. These locations correspond to rural areas in the Amazon forest of Perú. . . . .	173
5.3	Picture showing the real BS, battery, and solar panel employed in the deployment. . . . .	174
5.4	Satellite view and traffic distribution of one of the target scenarios, Santa Clotilde, in the forest in Perú. . . . .	174
5.5	Satellite view and traffic distribution of one of the target scenarios, Tuta Pisco, in the forest in Perú. . . . .	174
5.6	Provided coverage with two BSs deployed in two different target locations. . . . .	175
5.7	Determination of the switching threshold for a single type of traffic. . . . .	179

5.8	Graphic representation of the threshold computation for the deterministic case with two types of traffic. . . . .	181
5.9	Graphic representation of the threshold computation for the robust case with two types of traffic. . . . .	184
5.10	Daily traffic profile of the 4 different towns considered for voice services. . . . .	185
5.11	Daily traffic profile of the 4 different towns considered for data services. . . . .	186
5.12	On/off switching threshold example for a single traffic profile during the first year with traffic type TP1. . . . .	186
5.13	Solar panel size reduction for different traffic profiles and different types of BS within the first 5 years. . . . .	187
5.14	Power reduction for different traffic profiles and different types of BS within the first 5 years. . . . .	188
5.15	Region of ( $\lambda$ -threshold) for mixed traffic for a specific traffic profile for the first year. . . . .	188
5.16	Hours of the day needing 1 or 2 active BSs for a specific traffic profile for the first year. . . . .	189
5.17	Solar panel size reduction for mixed traffic and two different traffic profiles. . . .	189
5.18	Bayesian threshold as a function of the variance $\sigma_p^2$ for different outages. . . . .	190
5.19	Bayesian threshold as a function of the outage probability for $\sigma_p^2 = 0$ . . . . .	190
6.1	Architecture of the target rural scenario under consideration in the chapter. The BS is powered with a solar panel and a battery and the backhaul considered is based on WiFi-LD. The specific details of the real deployment as well as the location will be explained in the simulation section. . . . .	201
6.2	Snapshot of the user distribution and the aerial view of the town Tuta Pisco located in the forest in Perú. . . . .	212
6.3	Time evolution of the instantaneous data rates served at the access network and the backhaul capacity limitation per user with a backhaul capacity of 2 Mbps. . .	213
6.4	Time evolution of the data rates for the different approaches and the backhaul capacity per user when the BS is connected to the electric grid with a backhaul capacity of 2 Mbps. . . . .	213

6.5	Time evolution of the data rates for the different approaches and the backhaul capacity per user when the BS is connected to the electric grid with a backhaul capacity of 500 Kbps. . . . .	214
6.6	Time evolution of the stochastic Lagrange multipliers for different backhaul capacities. . . . .	215
6.7	Sum rates as a function of backhaul capacity for different approaches and different probabilities of energy packet $p$ . . . . .	216
6.8	Battery evolution of the proposed stochastic approach and the PF with sum constraint with a probability of energy packet $p = 0.4$ and $p = 0.8$ and for $\alpha = 0.1$ and $\alpha = 1$ . . . . .	216
6.9	Average bit rates per data user served in the air interface by different schedulers for a total backhaul capacity of 6 Mbps. . . . .	225
6.10	Average bit rates per data user served in the air interface by different schedulers for a total backhaul capacity of 2 Mbps. . . . .	225
6.11	Sum-rate served in the air interface for data users versus the total backhaul capacity.	226
6.12	Rate served in the air interface for the worst case data user versus the total backhaul capacity. . . . .	226
7.1	Centralized architecture consisting of resource allocation, user association, and CRE. . . . .	237
7.2	Reference scenario and available BSs at a given epoch. The color bar represents the number of BSs available at each point. . . . .	266
7.3	Snapshot of the user association for different policies. . . . .	267
7.4	CDF of the instantaneous user rates for different user association strategies. . . . .	268
7.5	Average battery evolution (among BSs) of tier 1 and tier 2. . . . .	268
7.6	Average battery evolution (among BSs) of tier 3 and tier 4. . . . .	269
7.7	Evolution of user association in tier 1 and tier 2. . . . .	270
7.8	Evolution of user association in tier 3 and tier 4. . . . .	271
7.9	Percentage of feasibilities. . . . .	271
7.10	Convergence of $\tilde{P}_i$ to proof the null duality gap. . . . .	273

7.11	Evolution and convergence of the stochastic multipliers $\lambda_j(\tau)$ . . . . .	273
7.12	Evolution and convergence of the expected throughput of the users $\tilde{R}_j^*(\lambda_j(\tau))$ . We also show the mean value in convergence of $\tilde{R}_j^*(\lambda_j(\tau))$ in the legend. . . . .	274
7.13	Instantaneous data rates $\sum_{i \in \mathcal{B}} \bar{R}_{ji}(\tau)$ and the expected value of them. . . . .	274
7.14	Evolution of stochastic variables with harvesting intensity $p = 0.4$ . . . . .	275
7.15	Evolution of stochastic variables with harvesting intensity $p = 0.7$ . . . . .	276
7.16	Evolution of the stochastic Lagrange multipliers $\lambda_j(\tau)$ . . . . .	277
7.17	Battery evolution of the different tiers (averaged over BSs) with different harvesting intensities. . . . .	277
7.18	Comparison of the CDF of the individual user rates of the stochastic approach with the greedy epoch-by-epoch general approach and the max-SINR approach. . . . .	278
7.19	Comparison of the user association across time in different tiers of the max-SINR strategy with the proposed stochastic approach. . . . .	279



# List of Algorithms

3.1	Battery update and energy allocation . . . . .	53
3.2	Multi-level water-filling algorithm with battery and QoS constraints . . . . .	60
3.3	Precoder design with imperfect CSI: all users are energy saturated . . . . .	64
3.4	Proportional fair-based scheduler with energy constraints . . . . .	85
4.1	Algorithm for solving problem (4.23) . . . . .	115
4.2	Algorithm to obtain the super-frame sets $\mathcal{U}_I^S$ and $\mathcal{U}_E^S$ . . . . .	120
4.3	Algorithm to obtain the set of information users $\mathcal{U}_I$ . . . . .	121
4.4	Algorithm to obtain the set of harvesting users $\mathcal{U}_E$ . . . . .	121
4.5	Algorithm to obtain jointly the set of information and harvesting users $\mathcal{U}_I, \mathcal{U}_E$ . . . . .	122
4.6	Overall user grouping and resource allocation algorithm . . . . .	124
4.7	Algorithm for adjusting the harvesting constraints . . . . .	134
4.8	Algorithm for solving problem (4.46) . . . . .	141
4.9	Algorithm for solving problem (4.48) . . . . .	144
4.10	Algorithm for solving problem (4.46) . . . . .	163
5.1	Threshold computation for switching on/off BSs with single traffic . . . . .	179
5.2	Threshold computation for switching on/off BSs with two traffics . . . . .	180
6.1	Algorithm for solving resource allocation problem (6.9) . . . . .	211
6.2	Algorithm for solving resource allocation problem (6.51) . . . . .	223
6.3	Algorithm for solving the resource allocation strategy for the UL connections . . . . .	224
7.1	Primal-dual general user association algorithm . . . . .	249
7.2	User association strategy based on the distributed algorithm . . . . .	255
7.3	Algorithm for solving ergodic user association problem (7.46) . . . . .	265
7.4	Primal-dual coordinate iterative algorithm for solving (7.75) . . . . .	284