

**ATTIVITA' SVOLTA NEL DOTTORATO IN INGEGNERIA
ELETTRONICA E DELLE COMUNICAZIONI
DA LUCA CHIARAVIGLIO**

- Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Torino, Italia
- Ciclo: XXIII
- Anni accademici di riferimento: 2007/2008 2008/2009 2009/2010
- Coordinatore: Prof. Ivo Montrosset
- Tutore : Prof. Fabio Neri
- Titolo della Tesi di Ricerca: “**Energy Efficient Telecommunications Networks**”

A. Descrizione dell'argomento della tesi

L'aumento dei costi energetici e la necessità di ridurre le emissioni di anidride carbonica hanno reso la riduzione del consumo energetico una sfida fondamentale del nostro tempo. Studi recenti hanno dimostrato come l'ICT (*Information and Communication Technologies*) stia diventando uno dei maggiori consumatori di energia, rappresentando oggi circa il 4% del consumo mondiale di potenza. Secondo l'agenzia internazionale dell'energia (IEA), il consumo di energia dell'ICT rappresenterà il 40% del consumo elettrico mondiale entro il 2030. I maggiori consumatori di energia nel settore ICT sono oggi i *data-centers*, i dispositivi mobili e le reti di telecomunicazioni. L'obiettivo perseguito nella tesi è stato di elaborare tecniche atte al risparmio di energia nelle reti di telecomunicazioni. Tradizionalmente, la rete Internet è stata progettata per massimizzare la qualità del servizio offerta agli utenti, senza considerare vincoli energetici. Tuttavia, l'enorme aumento del numero degli utenti e la diffusione di applicazioni distribuite hanno reso le reti di telecomunicazioni uno dei maggiori consumatori di energia all'interno del settore ICT. In particolare, nella tesi sono stati considerati: algoritmi efficienti per porre in stand-by parte delle reti di accesso, tecniche *energy-aware* per ridurre il consumo di potenza nelle reti di trasporto, meccanismi per la riduzione dei consumi in reti di computer. In tutti i casi, si è perseguito un approccio a livello di sistema per (i) massimizzare il più possibile il risparmio energetico sfruttando le tecnologie esistenti, (ii) indagare i limiti energetici dei sistemi odierni, e (iii) estendere il risparmio di energia all'intera rete piuttosto che limitarsi ai singoli componenti. I risultati ottenuti dimostrano come sia possibile ottenere risparmi elevati, dell'ordine del 50-70%, pur mantenendo un adeguato livello di qualità del servizio percepita dagli utenti.

B. Attività di ricerca svolta nel triennio

B.1 Descrizione Complessiva

L'attività di ricerca ha avuto come obiettivo la riduzione del consumo energetico nelle reti di telecomunicazioni. Inizialmente si è proceduto con un'attenta analisi dei consumi energetici nelle reti di telecomunicazioni odierne, dimostrando come i dispositivi di rete attualmente utilizzati nelle infrastrutture di trasporto e di accesso siano periodicamente sotto-utilizzati rispetto alla loro massima capacità di trasporto di informazione. Questo comportamento si spiega con il fatto che il traffico generato dagli utenti presenta spiccate non stazionarietà (per esempio evidenti differenze tra il giorno e la notte), con differenze dovute anche alla distribuzione degli utenti sul territorio. Ad esempio in una zona residenziale le apparecchiature di rete fissa (linee ADSL) e mobile (rete cellulare) vengono normalmente sotto-utilizzate di giorno, quando la maggior parte degli utenti si trova al lavoro, mentre di sera, quando gli utenti rientrano a casa, il traffico totale aumenta in maniera considerevole. Allo stesso modo in una zona industriale molti utenti sono presenti durante la settimana, mentre durante il week-end il traffico generato è di norma molto basso. Lo scarso utilizzo degli apparati di rete si traduce poi in uno spreco di risorse perché il consumo degli apparati odierni è pressoché costante al variare del traffico, in quanto dipende soltanto dalla capacità massima fornita. Tradizionalmente infatti le reti di telecomunicazioni sono state progettate per massimizzare la qualità del servizio a livello utente (ovvero la capacità offerta), tenendo conto solo in maniera marginale del consumo energetico degli apparati.

Il secondo passo nell'attività di ricerca è stato di proporre modelli matematici di reti di telecomunicazioni considerando in maniera esplicita la minimizzazione del consumo di potenza. In particolare, la tecnica proposta consiste nello spegnere parti della rete durante i periodi di basso carico, limitando il più possibile l'aumento di potenza per i dispositivi che rimangono accesi. Tale procedimento è stato applicato sia a reti di accesso, sia a infrastrutture di trasporto. Dal momento che i risultati ottenuti hanno confermato che sono possibili ampi margini di guadagno, si è proceduto ulteriormente nell'attività di ricerca. In particolare, sono state proposte euristiche efficienti dal punto di vista computazionale per risolvere i problemi proposti anche su istanze di rete di dimensioni notevoli, ottenendo dei risparmi di energia confrontabili con i modelli matematici.

Durante il periodo di ricerca svolto all'estero, le tematiche energetiche sono state ulteriormente ampliate, proponendo algoritmi per la cooperazione dal punto di vista energetico di data-center e reti di telecomunicazioni. Tale approccio dimostra come siano possibili guadagni notevoli quando data-center e operatori di telecomunicazioni cooperano per minimizzare assieme il consumo energetico. Il problema, proposto inizialmente come un unico modello di ottimizzazione, è stato successivamente distribuito per limitare la quantità di informazioni sensibili scambiate fra operatori e data-center, mostrando come anche in questo caso ampi margini di guadagno siano realizzabili.

Infine, si è proceduto ad una realizzazione pratica di una rete efficiente dal punto di vista energetico. In particolare, si è affrontato il problema di limitare il consumo delle reti di computer nel contesto del Politecnico di Torino. Una dettagliata analisi ha mostrato come 2000 computer siano sempre accesi di notte, rappresentando un chiaro esempio di spreco

di energia. Pertanto, è stato sviluppato un sistema distribuito corredato di opportuni strumenti software, chiamato PoliSave, che consente l'accensione e lo spegnimento automatico del proprio computer, semplicemente effettuando il login su un server del Politecnico. I risparmi possibili grazie all'utilizzo di PoliSave ammontano a più di 250.000 euro l'anno.

B.2 argomenti di ricerca specifici affrontati

Risparmio energetico per l'infrastruttura di trasporto

Inizialmente è stata valutata la quantità di risorse che può essere spenta nella rete Internet per ridurre il consumo di potenza. In particolare, è stato formulato un modello matematico che, sfruttando la teoria dei *random graph*, è in grado di stimare il numero di nodi e link che possono essere rimossi da una topologia senza perdere il vincolo di connettività fra gli utenti. In un secondo momento, i risultati teorici sono stati validati tramite simulazione utilizzando alcune topologie realistiche della rete Internet. I risultati dimostrano come nelle reti Internet corrente circa l'80% dei nodi di trasporto possa essere spento durante i periodi di basso traffico. Infine sono stati dimostrati i benefici derivanti da una possibile cooperazione fra i gestori della rete per ridurre il consumo totale di Internet, suggerendo che tale tecnica si presta a interessanti sviluppi futuri.

Come secondo passo è stata valutata la possibilità di spegnere parte della rete di un operatore di telecomunicazioni durante i periodi di basso traffico. In particolare, è stato considerato il problema del consumo di energia di rete per un Internet Service Provider (ISP), a fronte di uno scenario in cui i dispositivi di rete possono essere attivati e disattivati selettivamente per rispondere alle esigenze del traffico degli utenti, e reagire rapidamente in caso di guasti. L'obiettivo è di ridurre il consumo complessivo della rete di un ISP, considerandola come un unico sistema distribuito di elevate dimensioni. Piuttosto che concentrarsi sulla riduzione del consumo di potenza di ogni singolo dispositivo, l'obiettivo consiste nel controllare l'intera rete, in modo da trovare l'insieme minimo di dispositivi che devono essere utilizzati per soddisfare la domanda attuale di traffico. In particolare, il problema è stato formalizzato mediante tecniche di ottimizzazione, implementando un programma che è in grado di risolvere il modello matematico all'ottimo, interfacciandosi con l'ambiente di ottimizzazione CPLEX. In particolare il problema proposto consiste nel trovare l'insieme minimale di risorse (*router* e *link*) per: minimizzare il consumo totale di potenza, trasportare il traffico degli utenti, ed offrire un'adeguata qualità del servizio. Successivamente sono state sviluppate diverse euristiche per risolvere il problema in maniera approssimata anche per reti di dimensioni elevate. Gli algoritmi sviluppati sono stati applicati su reti sintetiche e sulla rete reale di un *Internet Service Provider* (ISP) italiano. I risultati indicano come i risparmi potenziali siano elevati (tipicamente maggiori del 40%), consentendo agli operatori di spegnere un numero cospicuo di apparati della rete di trasporto durante le ore di basso traffico.

Un ulteriore obiettivo è stata la riduzione del consumo di potenza nelle reti di trasporto ottiche. In particolare, le reti *Wavelength Routing* (WR) consentono di progettare una topologia logica su una topologia fisica mantenendo diversi gradi di libertà. Per progettare una topologia logica con vincoli di qualità del servizio nel corso degli anni è stato definito e risolto il problema di *Routing and Wavelength Assignment* (RWA), ampiamente studiato in letteratura. Tuttavia tutte le formulazioni classiche non

comprendono il consumo della rete fisica. Pertanto si è deciso di formulare il problema RWA inserendo esplicitamente l'obiettivo di minimizzare il consumo di potenza degli apparati fisici. Dopo aver formulato il problema con tecniche di ottimizzazione, sono state proposte delle semplici euristiche per limitare il consumo di potenza totale. I risultati dimostrano come i risparmi possano essere elevati, riducendo il consumo di potenza dell'80% in confronto ad una rete tradizionale.

Infine, un altro aspetto trattato è stato lo studio di meccanismi di cooperazione fra gestori della rete (*Internet Service Provider*) e distributori di contenuti (*Content Provider*) per ridurre il consumo totale di entrambe le infrastrutture. Lo scenario di partenza è una rete di telecomunicazioni, a cui sono connessi utenti che richiedono contenuti (ad esempio video o dati) a server situati in diverse località distanti geograficamente e connessi al gestore della rete. L'obiettivo proposto consiste nel trovare la configurazione ottima in termini di risorse che minimizza il consumo totale della rete e il consumo dei server del distributore dei contenuti. Inizialmente il problema è stato formulato mediante una modellazione matematica e risolto con tecniche di ottimizzazione considerando delle topologie realistiche. I risultati dimostrano come un approccio cooperativo permetta di ridurre il consumo di potenza totale in maniera sostanziale, con un risparmio di energia maggiore del 70%. Come passo successivo è stata considerata la possibilità di distribuire il problema fra gestore della rete e distributore di contenuti per limitare la quantità di informazioni sensibili scambiate. In particolare, sono state utilizzate tecniche di decomposizione, la cui efficacia è stata comparata con il modello centralizzato originale. I risparmi possibili su scenari realistici sono comparabili con il modello centralizzato, dimostrando quindi che sia possibile minimizzare il consumo di potenza limitando la quantità di informazioni scambiate.

Risparmio energetico per la rete di accesso

Una prima tematica in questa attività riguarda la riduzione del consumo di reti di accesso per connettere utenti fissi. Inizialmente è stato affrontato il problema del consumo di potenza dei nodi di accesso in una rete reale appartenente ad un *Internet Service Provider* (ISP) italiano. In particolare è stata proposta una tecnica per variare la capacità offerta da ciascun nodo a seconda della richiesta di traffico attuale. Dalle simulazioni effettuate a partire dalla topologia di una rete reale è emerso come la tecnica proposta possa risparmiare fino al 70% del consumo di potenza per i nodi di accesso, mantenendo inalterata la qualità del servizio per gli utenti finali.

Un secondo filone di attività riguarda le tecniche di risparmio energetico applicate a reti di accesso per connettere gli utenti mobili. In particolare sono state sviluppate delle tecniche di risparmio energetico basate sull'idea di tenere acceso il minimo numero di apparati di rete a seconda del traffico attuale degli utenti. Tali tecniche sono state sviluppate ed applicate sia alla rete cellulare UMTS, sia alle reti *Wireless LAN* (WLANs). Nel caso della rete cellulare UMTS è possibile, infatti, spegnere delle stazioni base (chiamate Node-B) quando il traffico è basso. La tecnica proposta si basa su un concetto molto semplice: minimizzare il numero totale di stazioni accese, ovvero spegnere il maggior numero possibile di Node-B. Tale procedimento può essere adottato in quanto la rete di accesso è dimensionata per supportare il traffico degli utenti nell'ora di picco (tipicamente di giorno), mentre di notte essa risulta ampiamente sovradimensionata. I

risultati ottenuti dimostrano come l'intera rete potrebbe risparmiare fino al 40% del consumo totale. Come passo successivo sono stati considerati i tempi necessari per spegnere i Node-B, dal momento che le chiamate in corso degli utenti devono essere trasferite dalle stazioni base che stanno per essere spente alle stazioni adiacenti che rimangono accese. I risultati ottenuti su casi realistici dimostrano come il tempo necessario per spegnere una stazione base sia relativamente contenuto, dell'ordine di 1-2 minuti.

Infine, un lavoro analogo alle reti UMTS è stato sviluppato anche per le reti WLANs. Tipicamente, queste reti sono costituite da un numero elevato di *Access Points* (APs), i quali rimangono spesso accesi anche se inutilizzati. Anche in questo caso, l'idea principale è quella di spegnere gli apparati di rete (APs) durante le ore di basso traffico. A tale scopo è stato sviluppato un modello analitico che permette di gestire l'accensione e lo spegnimento degli APs in maniera centralizzata, a seconda del traffico attuale degli utenti. I risultati ottenuti mostrano come sia possibile ottenere risparmi fino al 90% durante i periodi di bassa intensità di traffico, per esempio durante la notte o nei week-end.

Risparmio energetico per reti di computer

L'ultimo ambito di ricerca ha riguardato lo sviluppo di PoliSave, un'architettura software per comandare lo spegnimento e l'accensione da remoto dei computer. Tale attività è stata inizialmente sviluppata per il Dipartimento di Elettronica, per poi essere estesa a livello di ateneo, grazie all'interazione con l'*Area Information Technology* (AIT) del Politecnico.

In particolare, si è proceduto ad un'attenta fase di misurazione del numero di computer accesi all'interno della sede centrale del Politecnico. Dai dati raccolti è emerso come di notte più di 2000 computer rimangano sempre accesi, rappresentando uno spreco di energia quantificabile in 350 kWh, ovvero circa il 40% sul totale dell'energia consumata dal Politecnico.

PoliSave è stato inizialmente sviluppato secondo il paradigma *server-client*. Il *server* invia al *client* le richieste di accensione e spegnimento. Il *client* invece elabora le risposte ed esegue il comando richiesto. Successivamente, tale architettura è stata modificata per poter essere estesa a livello di Ateneo. In particolare, la parte *server* è stata migrata presso i servizi centrali di *Area Information Technologies*: in questo modo ciascun utente può accendere o spegnere il proprio PC semplicemente collegandosi alla pagina di SWAS del portale di ateneo. Tale migrazione ha imposto anche un sostanziale aggiornamento del *client* per poter meglio rispondere alle differenti classi di utenti esistenti a livello di ateneo.

Attualmente, è possibile scaricare PoliSave dal seguente sito:

<http://www.swas.polito.it/services/polisave/>

PoliSave è in fase di *beta-testing*, ovvero diverse classi di utenti lo hanno installato e lo stanno testando in maniera volontaria. Nei prossimi mesi verrà rilasciata la versione ufficiale da utilizzare su tutti i PC del Politecnico.

B.3 Risultati più rilevanti ottenuti nel triennio

I risultati dimostrano come ampi margini di risparmio siano realizzabili per le reti di telecomunicazioni. Per quanto riguarda la rete di trasporto, sono possibili risparmi dell'ordine del 40-70% utilizzando meccanismi di *stand-by* per *router* e *link*. Anche per quanto riguarda la rete di accesso, un uso efficiente delle risorse di rete permette di risparmiare più del 40% sull'energia consumata, dal momento che nei periodi di basso traffico la rete risulta ampiamente sovradimensionata. Infine, per quanto riguarda le reti di computer, il software PoliSave, esteso a tutte le macchine dell'ateneo, può risparmiare fino a 250.000 euro l'anno.

In tutti i casi i risparmi vengono ottenuti con una limitata e/o trascurabile degradazione di qualità del servizio per gli utenti. Tuttavia, ulteriori indagini sono necessarie per poter sfruttare le tecniche proposte. Ad esempio, i dispositivi devono prevedere primitive di spegnimento e accensione e i protocolli di trasporto devono tener conto di possibili variazioni nella struttura delle rete dovute alla variazione dei dispositivi accesi. Tali premesse rappresentano la base per ulteriori sviluppi futuri.

La comunità scientifica ha iniziato ad occuparsi di tematiche energetiche nel settore ICT. In particolare, nel corso degli ultimi due anni sono stati tenuti su questo tema molteplici conferenze e workshop a livello internazionale, mostrando quindi come l'uso efficiente di energia nel settore ICT sia diventato un promettente campo di ricerca. Grazie ai risultati ottenuti è stato possibile pubblicare diversi articoli, ottenendo degli utili feedback per il proseguimento della ricerca.

Infine, gran parte degli sviluppi futuri sono stati inseriti nel progetto europeo TREND (*Towards Real Energy-Aware Network Design*), rete di eccellenza proposta da 12 partner a livello europeo, con il coordinamento del Politecnico di Torino. Il progetto TREND è stato finanziato ed ha iniziato le sue attività nel settembre 2010, offrendo al Politecnico di Torino interessanti opportunità di collaborazione con importanti attori a livello europeo nell'ambito di tematiche energetiche nelle reti di telecomunicazioni.

B.4 Collaborazioni di ricerca

Durante il dottorato ho trascorso un periodo di ricerca di 9 mesi (da Agosto 2009 ad Aprile 2010) presso il Computer Science Department della Boston University (USA), sotto la supervisione del prof. Ibrahim Matta. Durante questo periodo, sono venuto a contatto con un ambiente competitivo e stimolante. Le mie attività di ricerca presso la Boston University si sono concentrate su algoritmi *energy-aware* per la distribuzione dei contenuti e la gestione della rete. La collaborazione ha prodotto come maggior risultato l'accettazione di due pubblicazioni presso conferenze internazionali di rilievo nel settore.

Inoltre, ho collaborato con il Gruppo Reti dell'Università degli Studi di Catania su tecniche *energy-aware* per reti di accesso. In particolare, abbiamo considerato un caso di studio basandoci sull'infrastruttura di rete di un Internet Service Provider italiano. Un articolo congiunto è stato accettato presso ACM SIGCOMM e-Energy 2010, una conferenza internazionale su aspetti di efficienza energetica nel settore reti.

Un'altra collaborazione in corso riguarda aspetti di efficienza energetica per reti cellulari. Partner della collaborazione è il centro di ricerca Alcatel-Lucent Bell Labs Francia (ALBLF). In particolare, stiamo studiando l'impatto di diversi meccanismi per lo spegnimento di Base Stations (BS) in una rete cellulare. Un articolo preliminare è stato

accettato presso un workshop internazionale. Attualmente, stiamo lavorando a un lavoro comune con un caso di studio realistico fornito da ALBLF.

Infine, vale la pena citare un'altra collaborazione in corso con il Gruppo Telecomunicazioni della Technische Universität di Berlino (TUB) su reti ottiche power-aware. Attualmente, stiamo lavorando a un lavoro congiunto che indaga l'impatto di algoritmi *energy-aware* sia a livello IP che a livello ottico.

B.5 Partecipazione progetti nazionali/internazionali

Vengono riportate di seguito in maniera sintetica le partecipazioni a progetti nazionali/internazionali durante il dottorato:

- 6 mesi di partecipazione al progetto BONE (*Building the Future Optical Network in Europe*), finanziato dalla comunità europea.
- 1 anno di partecipazione al progetto WIFI4ENERGY, finanziato dalla Regione Piemonte.
- 6 mesi di partecipazione alla NoE (*Network of Excellence*) TREND (*Towards Real Energy-Aware Network Design*), finanziato dalla comunità europea tramite FP7.

B.7 Supervisione delle attività di ricerca

- Supervisione dello studente Wu Yong per la sua tesi di laurea specialistica. L'argomento della tesi è stato sulla progettazione di reti ottiche con vincoli di potenza. I risultati di questo lavoro sono stati pubblicati a ECOC 2009, una conferenza internazionale sulle comunicazioni ottiche.
- Supervisione dello studente Joan Villa per la sua tesi di laurea specialistica. La tesi è stata focalizzata sullo sviluppo di un software di *energy-aware*, chiamato PoliSave, che spegne automaticamente i PC del Campus durante la notte. In particolare, Joan ha sviluppato la versione di PoliSave per sistemi operativi Unix. Attualmente, stiamo estendendo PoliSave all'interno del nostro Campus, con un risparmio stimato di 250.000 € all'anno.

B.8 Altre Attività

- Collaborazione con ETECSA per attività di supporto alla didattica durante il mese di Novembre 2008.

C. Attività di formazione

C.1 partecipazione ad attività interne di supporto alla didattica

- *Operations Research: Theory and Applications to Networking* (04/11-06/11), corso di Laurea Specialistica, tipo di attività: esercitazioni/laboratorio, docente responsabile: Marco Mellia, attività remunerata con contratto (10 ore).
- *Laboratorio di Reti Telematiche* (05/10-06/10), corso di Laurea Triennale, tipo di attività: esercitazioni/laboratorio, docente responsabile: Marco Mellia, attività remunerata con contratto (15 ore).

- *Laboratorio di Reti Telematiche* (05/09-06/09), corso di Laurea Triennale, tipo di attività: esercitazioni/laboratorio, docente responsabile: Marco Mellia, attività remunerata con contratto (15 ore).
- *Laboratorio di Protocolli* (11/08-01/09), corso di Laurea Specialistica, tipo di attività: esercitazioni/laboratorio, docente responsabile: Marco Mellia, attività remunerata con contratto (15 ore).

C.2 Corsi e seminari più significativi seguiti

- *A course in scientific writing*, 15 ore (3 crediti), docente Sarah Clark, didattica di eccellenza, Politecnico di Torino.
- *A tutorial on computational complexity and approximation algorithms*, 20 ore (4 crediti), docente Vangelis Paschos, didattica di eccellenza, Politecnico di Torino.
- *Apprendimento Mimetico*, 40 ore (8 crediti), docente Elio Piccolo, corso di dottorato, Politecnico di Torino.
- *Experimental modeling: costruzione di modelli da dati sperimentali*, 30 ore (6 crediti), docente Mario Milanese, corso di dottorato, Politecnico di Torino.
- *Impatto ambientale dei sistemi energetici*, 10 ore (2 crediti), docente Mario De Salve, corso di dottorato, Politecnico di Torino.
- *Interior Point Methods for Linear, Quadratic and Nonlinear programming*, 20 ore (4 crediti), docente Jacek Gondzio, didattica di eccellenza, Politecnico di Torino.
- *Optical networks*, 50 ore (5 crediti), docente Marco Mellia, corso di laurea specialistica, Politecnico di Torino.
- *Ottimizzazione convessa e applicazioni ingegneristiche*, 15 ore (3 crediti), docente Giuseppe Calafiore, corso di dottorato, Politecnico di Torino.
- *Sistemi produttivi e fabbisogni energetici*, 30 ore (6 crediti), docente Riccardo Varvelli, corso di dottorato, Politecnico di Torino.
- *Switching architectures*, 50 ore (5 crediti), docente Andrea Bianco, corso di laurea specialistica, Politecnico di Torino.
- *Transportation system design*, 10 ore (2 crediti), docente Teodor Gabriel Crainic, didattica di eccellenza, Politecnico di Torino.
- *Nonlinear Programming*, 40 ore, prof. Georgia Perakis, corso di formazione, MIT, Febbraio-Aprile 2010.
- *The Green ICT*, 8 ore, seminario, Telecom Italia, Giugno 2010.

D. Indicazione delle pubblicazioni nel triennio

- 17 atti di congressi internazionali
- 2 atti di congressi nazionali
- Pubblicazioni in fase di revisione: 2 riviste internazionali e 1 atti di congressi internazionali

E. Note

Pagina personale: www.telematica.polito.it/chiaraviglio

E-Mail: luca.chiaraviglio@gmail.com