

## ABSTRACT

---

Internet of Things (IoT) devices face significant challenges in maintaining continuous operation due to the limited capacity of their batteries. Despite the adoption of low-power communication protocols, many devices are unable to meet their energy demand, leading to frequent battery replacements in scenarios where electric power is unavailable. This affects data reliability and causes service interruptions, with repercussions across the entire data-driven IoT infrastructure.

Energy accumulation mechanisms based on environmental sources offer a promising way to extend the operational lifetime of such devices. However, sources such as sunlight and wind are highly variable and unreliable for systems that require continuous operation, and they are difficult to implement in small-scale devices. A more promising approach is to exploit the electromagnetic energy available within the network itself: the Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) technique enables energy harvesting from wireless signals, allowing devices to recharge their batteries while receiving data.

Although extensively studied in the literature, SWIPT protocols have limitations related to the poor modeling of network parameters in heterogeneous context, where cellular and energy harvesting devices co-exist. It is therefore essential to develop network models and protocols capable of maximizing the collected energy by intelligently exploiting the properties of the channel, the environment, and the device density.

This thesis proposes a modeling and analysis framework for SWIPT-enabled networks in heterogeneous scenarios characterized by multiple devices and interference conditions. The analysis, initially focused on random spatial patterns, is then extended to vehicular and future smart city contexts, where node density and mobility play a critical role in the network's energy and communication performance.

Considering the growing relevance of 5G and future 6G networks, the thesis introduces a more realistic implementation that

defines adaptive patterns and optimization strategies accounting for network-specific characteristics. The achieved energy gains and optimization policies are examined as functions of the network configuration and operational conditions.

Taking into account the progressive decentralization of network policies, two device-side optimization policies are proposed for device-side energy harvesting, designed according to the criticality of the operating context, aiming to balance energy efficiency and quality of service.

The results of this work, beyond their methodological contribution, establish a solid knowledge foundation for the study and enhancement of SWIPT-based networks. The findings provide practical and non-trivial guidelines on how to model networks according to spatial geometries and environmental factors. Overall, the outcomes confirm the potential of SWIPT and self-sustainable network paradigms in enabling the transition toward autonomous, batteryless IoT infrastructures.

## ABSTRACT

---

I dispositivi dell'Internet of Things (IoT) incontrano notevoli difficoltà nel mantenere un funzionamento continuo a causa delle limitate capacità delle loro batterie. Nonostante l'adozione di protocolli a basso consumo energetico, molti dispositivi non riescono a soddisfare la richiesta energetica, con conseguenti frequenti sostituzioni delle batterie in scenari dove non è possibile l'alimentazione elettrica. Ciò compromette l'affidabilità dei dati raccolti e causa interruzioni nei servizi offerti, con impatti sull'intera infrastruttura basata su dati provenienti dai dispositivi IoT.

Meccanismi per l'accumulo di energia tramite fonti ambientali presentano una buona possibilità per estendere la vita di questi dispositivi. Tuttavia, fonti come sole e vento risultano altamente variabili e poco affidabili per sistemi che richiedono continuità operativa, nonchè difficili da implementare in dispositivi di piccole dimensioni. Una strategia più promettente consiste nello sfruttare l'energia elettromagnetica della rete stessa: la tecnica Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT)

permette di ricavare energia dal segnale wireless, ricaricando le batterie dei dispositivi durante la ricezione del segnale.

Nonostante i numerosi studi presenti in letteratura, SWIPT presenta ancora limitazioni legate alla modellazione dei parametri delle reti in contesti eterogenei al fine di sfruttarli al meglio. È quindi necessario sviluppare protocolli e modelli di rete in grado di massimizzare l'energia raccolta, sfruttando in modo intelligente le caratteristiche del canale, dell'ambiente e la densità dei dispositivi.

Questa tesi propone un modello di rete SWIPT e la relativa analisi in scenari eterogenei caratterizzati dalla presenza di molteplici dispositivi e da condizioni di interferenza. L'analisi, inizialmente condotta su pattern randomici, viene successivamente estesa a contesti veicolari e smart city di futura generazione, dove la densità e la mobilità dei dispositivi influenzano in modo significativo le prestazioni energetiche e di comunicazione.

Considerando la crescente rilevanza delle reti 5G e delle future 6G, la tesi introduce nella seconda parte una modellazione più realistica, che integra strategie di ottimizzazione e definisce pattern adattivi basati sulle caratteristiche del canale e della rete. In questo contesto vengono esaminati i guadagni energetici ottenibili e le strategie di configurazione più efficaci per massimizzare l'energia raccolta dai dispositivi.

Infine, tenendo conto della progressiva decentralizzazione delle scelte a opera dei dispositivi, vengono proposte due politiche di ottimizzazione del processo di energy harvesting lato dispositivo, definite in funzione del livello di criticità del contesto operativo, con l'obiettivo di bilanciare l'efficienza energetica e la qualità del servizio.

I risultati della tesi, oltre al contributo metodologico, costituiscono una base di conoscenza solida per lo studio e il miglioramento delle reti SWIPT, offrendo linee guida pratiche e non banali su come modellare la rete in relazione alle geometrie e alle condizioni ambientali. Tali risultati confermano il potenziale delle tecniche SWIPT e delle reti auto-sostenibili nel favorire la transizione verso infrastrutture IoT autonome, alimentate senza batterie.