



Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia  
Scuola di Dottorato in ICT



# Simulazione di Reti di Telecomunicazioni tramite NS-3

Alessandro Paganelli  
alessandro.paganelli@unimore.it

June 6, 2011

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

- Fornire una panoramica delle tecniche di risoluzione di problemi ingegneristici.
- Illustrare le caratteristiche salienti della simulazione numerica, assieme alle sue potenzialità.
- Mostrare alcuni esempi applicativi dell'utilità della simulazione, nel caso delle reti di telecomunicazioni, utilizzando il simulatore NS-3.

# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

# Sommario

- 1 **Introduzione alla simulazione numerica**
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni



# Problemi ingegneristici

Una particolare classe di problemi in ingegneria è quella dei problemi di decisione, in cui, cioè, è necessario compiere una scelta di una o più tecnologie e/o soluzioni fra varie alternative disponibile (tipicamente molte).

In linea di principio, i problemi di decisione possono essere risolti “provando” o “sperimentando” le varie alternative e decidendo per la migliore, rispetto ad una data metrica.

# Metodologie di risoluzione

Le principali metodologie utilizzabili per la soluzione di un problema di decisione sono:

- 1 Utilizzo di un modello matematico, costituito da relazioni matematiche che descrivono il funzionamento del sistema oggetto dello studio.
- 2 Utilizzo di un modello in scala del sistema considerato, costituito da un insieme limitato di funzionalità, rispetto al sistema originale.
- 3 Utilizzo di un programma di simulazione, il quale replica il funzionamento del sistema oggetto dello studio.
- 4 Utilizzo di un sistema reale, ovvero di un'istanza completa del sistema studiato.

# Vantaggi e svantaggi

## Modello matematico

- Vantaggi:
  - Di rapido utilizzo
  - Praticità
- Svantaggi:
  - Non sempre è di facile derivazione → difficoltà analitiche
  - Spesso caratterizzati da approssimazioni e da limitati intervalli di validità

## Modello in scala

- Vantaggi:
  - Più economico rispetto ad un sistema reale
  - Non necessita di alcuna fase di modellazione matematica
- Svantaggi:
  - Potenzialmente costoso
  - Non è detto che racchiuda tutte le caratteristiche del sistema reale

# Vantaggi e svantaggi

## Programma di simulazione

### ■ Vantaggi:

- Più economico rispetto ad un sistema reale
- Permette di simulare aspetti e dettagli che spesso vengono tralasciati usando modelli matematici

### ■ Svantaggi:

- Necessita di una fase di modellazione del sistema
- Il tempo necessario per ottenere i risultati (“tempo di simulazione”) può essere notevole

# Vantaggi e svantaggi

## Sistema reale

- Vantaggi:
  - Non necessita di alcuna modellazione
  - Raccoglie tutti i dettagli di interesse
- Svantaggi:
  - Potenzialmente costoso e poco praticabile (es: sistemi di grandi dimensioni, sistemi composti da tanti sotto-sistemi, etc)
  - Potenziali problemi di scalabilità

# Scelta del metodo di risoluzione

- La scelta del metodo di risoluzione da adottare dipende fortemente dal problema considerato.
- Non è detto che un metodo di risoluzione sia applicabile a tutti i problemi!

# Sommario

- 1 **Introduzione alla simulazione numerica**
  - Problemi ingegneristici
  - **Simulazione numerica**
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni



# La simulazione in sintesi

La simulazione numerica consiste nei seguenti punti:

- Modellazione del sistema: estrazione dal sistema considerato dei dettagli di interesse per lo studio → costruzione di un modello del sistema.
  - Deve scendere ad un livello di dettaglio adeguato per l'obiettivo dello studio
- Realizzazione di un programma di simulazione capace di riprodurre le caratteristiche e il funzionamento del modello estratto.
  - Il programma sarà tanto più complesso quanti più dettagli verranno presi in considerazione nel modello
- Esecuzione del programma di simulazione per mezzo di un computer ed estrazione dei risultati di interesse.

# Pianificazione della simulazione

La simulazione numerica, come qualsiasi altro esperimento, deve essere pianificato accuratamente. È necessario:

- Individuare in modo chiaro gli obiettivi dello studio.
  - Individuare le metriche di interesse (output)
  - Individuare le variabili dello studio (i.e. le grandezze la cui variazione caratterizza il contesto di valutazione, es: numero di nodi, tipologia dei servizi, numero dei servizi, tecnologie trasmissive, etc)
- “Randomizzare” e replicare l’esperimento.
  - Per evitare errori sistematici e per fornire una misura della precisione dell’esperimento (errore sperimentale).
  - Il numero di replicazioni dipenderà dalla precisione che si desidera per l’esperimento.

# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

La simulazione è una delle tecniche più utilizzate nell'ambito delle reti di telecomunicazioni.

- Permette di modellare scenari complessi (es: internet) e ad un livello di dettaglio molto alto (es: tecniche di accesso al mezzo condiviso, tecniche di scheduling dei pacchetti, valutazione di protocolli di rete, etc).
- Permette di utilizzare codice reale, proveniente da implementazioni effettive (es: stack protocollare di linux).

## Pianificazione di una rete wireless

Si consideri un edificio costituito da più piani, all'interno del quale dovranno essere realizzati un numero predefinito di uffici. Si vuole fornire ad ognuno di essi la connettività dati attraverso l'installazione di un certo numero di access point IEEE 802.11.

- Qual'è il range di copertura radio fornito dal singolo access point?
- Quanti utenti è possibile servire con un singolo access point?
- Quanti access point devono essere installati in ogni piano?

## Dimensionamento della rete

Si consideri una rete data, costituita da una topologia prefissata e supportante un determinato insieme di servizi. La rete deve essere estesa (es: implementazione di un link di connessione fra due sedi distaccate).

- Quali tecnologie di interconnessione possono essere utilizzate?
- Qual'è la richiesta di risorsa che deve essere fatta al provider? (es: service-level agreement?)

## Valutazione di prestazioni in scenari complessi

Si consideri una rete data, con una predefinita topologia e un determinato insieme di servizi che devono essere supportati.

- La topologia considerata è in grado di supportare i servizi richiesti?
- Entro che margini la rete considerata è in grado di supportare i servizi dati?

## Valutazione dei bottleneck

Data una rete predefinita (es: rete aziendale) e un insieme di servizi di rete attivi, si vogliono analizzare i colli di bottiglia della rete stessa al fine di individuare i segmenti critici.

- Tali segmenti potranno essere quelli più interessati ad opere di upgrade della rete.



# Applicabilità della simulazione

In tutti gli esempi mostrati sono presenti difficoltà pratiche che rendono difficile l'utilizzo di tecniche risolutive alternative alla simulazione.

## Esempi

- Complessità dovute alla presenza di numerose variabili (es: numero di utenti, caratteristiche del canale wireless, applicazioni eterogenee...)
- Complessità legata alle caratteristiche dei protocolli di rete e delle applicazioni (es: come modellare in modo dettagliato e flessibile, tramite un modello analitico, il traffico originato da un web server?)

Esistono numerosi simulatori di rete, sia di tipo commerciale, sia di natura freeware e/o open-source. Alcuni dei più famosi sono:

- OPNET (commerciale)
- OMNeT++ (versione non commerciale) e OMNEST (versione commerciale)
- Network Simulator 2 (open source, di largo utilizzo)
- Network Simulator 3 (open source, sviluppo iniziato nel 2006).
- NetSim (commerciale)

# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

- “Network Simulator ver. 3” (NS-3) è un simulatore di rete ad eventi discreti, sviluppato a partire dal 2006 come progetto open-source ([www.nsnam.org](http://www.nsnam.org)).
- NS-3 è un simulatore nuovo, non compatibile all’indietro con NS-2.
- Obiettivo principale: essere il più possibile realistico.
- Offre il supporto alla virtualizzazione e verso la realizzazione di testbed (emulazione).
  - Il simulatore può essere interfacciato con hardware reale, sia all’interno di un testbed, sia all’interno di un sistema reale.
- Semplifica le operazioni di tracing dei risultati.

# Ambiente di sviluppo

- Le simulazioni in NS-3 vengono programmate principalmente in linguaggio C++.
  - Sono attualmente disponibili bindings per python.
- Non è previsto alcun IDE predefinito.
  - Ogni script di simulazione può essere scritto tramite un qualsiasi editor di testo.
  - È possibile integrare il sistema di compilazione di NS-3 con Eclipse, per sfruttarne le funzionalità.

# Come iniziare?

Il percorso “suggerito” per iniziare a conoscere ed utilizzare NS-3 è:

- 1 Iniziare con il tutorial.
- 2 Sfruttare il manuale di riferimento (“Reference manual”).
- 3 Sfruttare la documentazione delle classi, disponibile online tramite Doxygen.
- 4 Sfruttare il gruppo di discussione di NS-3 su “google-groups”.

NS-3 è un simulatore di rete → simula nodi e link

- La classe che rappresenta un nodo di rete è la classe `Node`.
- Su di ogni nodo è possibile installare una o più applicazioni. Esse vengono realizzate attraverso la classe `Application`.
- I nodi della rete simulata sono collegati fra loro attraverso opportuni canali di comunicazione, realizzati attraverso la classe `Channel`, o sue specializzazioni.

# Panoramica generale

- Per connettere un Node ad un Channel è necessario utilizzare un dispositivo opportuno; in NS-3 esso viene modellato tramite la classe NetDevice.
  - Un nodo può essere equipaggiato con un numero arbitrario di NetDevice, uno per ogni canale al quale esso è connesso.
  - Ogni specializzazione di NetDevice è specifica per un particolare canale.

## Esempio

PointToPointNetDevice è il NetDevice specifico per mettere in comunicazione due nodi attraverso un canale PointToPointChannel.



- NS-3 mette a disposizione numerosi metodi helper, utilizzabili per semplificare la realizzazione di topologie e configurazioni che richiederebbero la riscrittura di numerose linee di codice.

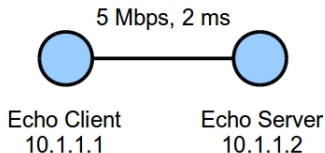
## Esempio

WifiHelper è la classe che può essere utilizzata per istanziare un helper utilizzabile per realizzare in modo semplice oggetti di tipo WifiNetDevice.

# Il primo script

Per iniziare consideriamo lo script “`first.cc`” del tutorial.

- In questo semplice script vengono realizzati due nodi di rete, connessi attraverso un link punto-punto.
- Il link punto-punto è caratterizzato da una bit-rate di livello fisico di 5 Mbps e da un ritardo di 2 ms.
- Il primo nodo ospita una applicazione di tipo `UdpEchoClient`, mentre il secondo ospita il rispettivo server.



# Il primo script

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/simulator-module.h"
#include "ns3/node-module.h"
#include "ns3/helper-module.h"

using namespace ns3;
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("FirstScriptExample");

int main (int argc, char *argv[])
{
    LogComponentEnable("UdpEchoClientApplication", LOG_LEVEL_INFO);
    LogComponentEnable("UdpEchoServerApplication", LOG_LEVEL_INFO);

    NodeContainer nodes;
    nodes.Create (2);

    PointToPointHelper pointToPoint;
    pointToPoint.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("5Mbps"));
    pointToPoint.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("2ms"));
    ...
}
```

# Il primo script

...

```
NetDeviceContainer devices;  
devices = pointToPoint.Install (nodes);
```

```
InternetStackHelper stack;  
stack.Install (nodes);
```

```
Ipv4AddressHelper address;  
address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
```

```
Ipv4InterfaceContainer interfaces = address.Assign (devices);
```

```
UdpEchoServerHelper echoServer (9);
```

```
ApplicationContainer serverApps = echoServer.Install (nodes.Get (1));  
serverApps.Start (Seconds (1.0));  
serverApps.Stop (Seconds (10.0));
```

...

# Il primo script

...

```
UdpEchoClientHelper echoClient (interfaces.GetAddress (1), 9);
echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (1));
echoClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (1.)));
echoClient.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (1024));

ApplicationContainer clientApps = echoClient.Install (nodes.Get (0));
clientApps.Start (Seconds (2.0));
clientApps.Stop (Seconds (10.0));

Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();
return 0;
}
```

# Il primo script - spiegazione

- Largo impiego di `container`, ovvero di oggetti che ospitano insiemi di oggetti specifici (es: `NodeContainer`, `ApplicationContainer`)
- Fase di configurazione separata da quella di effettiva implementazione

## Esempio

- Configurazione della base degli indirizzi IP con:  
`address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0")`
- Effettiva assegnazione degli indirizzi:  
`address.Assign (devices)`

# Il primo script - compilazione ed esecuzione

La compilazione e la successiva esecuzione dello script vengono effettuate spostandosi, tramite una shell, nella root di NS-3 e lanciando i seguenti comandi:

```
./waf  
./waf --run scratch/first
```

Il primo comando effettua la compilazione dell'intero simulatore, compreso lo script "script.cc" (opportunamente spostato nella directory scratch). Il secondo comando esegue lo script compilato.

# Il primo script - risultati

Lo script, tramite le funzionalità di logging attivate ad inizio simulazione, stampa su standard output:

```
Sent 1024 bytes to 10.1.1.2  
Received 1024 bytes from 10.1.1.1  
Received 1024 bytes from 10.1.1.2
```

- Il client (primo nodo) invia 1024 byte verso il server (secondo nodo).
- Il server risponde al client con un pacchetto di echo da 1024 byte.



# Come continuare?

- 1 Proseguire con gli esempi presenti nel tutorial, reperibile online su [www.nsnam.org](http://www.nsnam.org).
- 2 Sfruttare la documentazione reperibile online.
  - Doxygen per la documentazione del codice sorgente
  - Manuale di riferimento
  - Gruppo di discussione su google-groups
- 3 Analizzare il codice sorgente fornito con il simulatore
  - Sono presenti numerosi esempi di utilizzo dei vari componenti software che lo compongono.

# Panoramica dei moduli disponibili

- Applicazioni disponibili:
  - Bulk-send
  - Packet-sink (generico ricevitore di pacchetti)
  - On-off application
  - Udp-client, Udp-server
  - Udp-echo, ping
  
- “Tipologie” di NetDevice disponibili:
  - Wireless: 802.11, 802.16, LTE
  - Wired: PPP, Csma

# Panoramica dei moduli disponibili

- Modelli di canale radio
  - YaNS WiFi channel
  - Modelli di propagazione log-distance, Friis
  - Fading su breve scala (Nakagami)
  
- Modelli di mobilità:
  - Random walk
  - Random direction
  - Random waypoint (simulazione del movimento di veicoli)

# Estensione del simulatore

- Attualmente il simulatore comprende un buon numero di moduli pronti all'uso.
- Può succedere che un modulo necessario per simulare un determinato scenario di rete sia mancante.
- Come procedere in questo caso?
  - È possibile estendere le classi già presenti (nel senso OOP) e realizzare moduli personalizzati.
  - Il livello di dettaglio richiesto per ogni modulo dipenderà dagli obiettivi dello studio (es: modellazione a livello di rete, a livello MAC, a livello fisico, etc).

# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

# Copertura radio in reti WiFi

## Obiettivo dello studio

Valutare la distanza, fra stazione e access-point, alla quale una rete 802.11g va in fuori servizio.

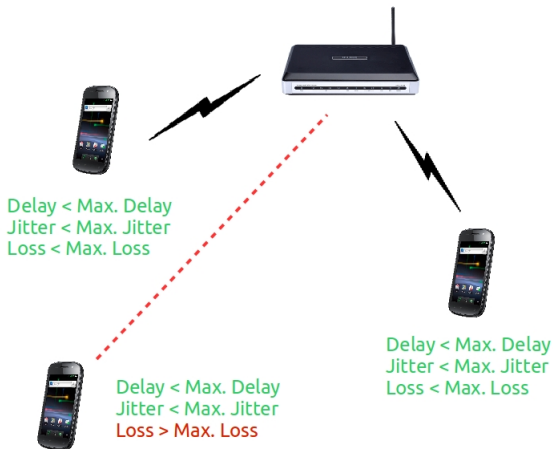
Cosa si intende con il “fuori servizio” di una rete?

- È la situazione nella quale i servizi di rete non riescono ad essere supportati adeguatamente e dipende dai parametri di qualità di servizio specifici per ogni servizio.

## Esempio - condizione di servizio

Throughput  $> T_{min}$ , delay  $< D_{max}$ , jitter  $< J_{max}$ .

# Copertura radio in reti WiFi - esempio



# Copertura radio in reti WiFi - parametri

Abbiamo considerato:

- Applicazione VoIP → modellata con UdpClient + UdpServer
  - Un solo nodo di rete posizionato a distanza  $d$  variabile rispetto all'access-point
  - Codec G.729 @ 8 kbps → 50 pacchetti/s
  - Pacchetti da 20 byte (livello applicazione) → 96 byte a livello MAC
  - Parametri di QoS:  $D_{max} = 30$  ms,  $J_{max} = 60$  ms, packet-loss ratio < 0.03
- Modello di canale realistico sia per il caso indoor, sia per il caso outdoor



# Copertura radio in reti WiFi - modellazione in NS-3

## Applicazione VoIP

```
ApplicationContainer clientContainer;  
UdpClientHelper client (Ipv4Address ("10.1.1.1"), 250);  
  
client.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (10000));  
client.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.02)));  
client.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (32));  
  
clientContainer = client.Install (source); // source -> nodo sorgente  
appContainer.Add (clientContainer);
```

# Copertura radio in reti WiFi - algoritmo

- Procedimento di ricerca dicotomica per la determinazione della distanza di fuori servizio
  - 1 Si stabilisce  $d_0$  (distanza iniziale) e  $s_0$  (ampiezza del passo).
  - 2 Se alla distanza attuale  $d_n$  almeno uno dei parametri di QoS eccede la soglia prefissata si impone  $d_{n+1} = d_n - s_n$ , altrimenti si impone  $d_{n+1} = d_n + s_n$ .
  - 3 Si pone  $s_{n+1} = s_n/2$  e si riparte dal punto 2.
- L'algoritmo è stato fermato quando il passo ha raggiunto la lunghezza di 1 metro.

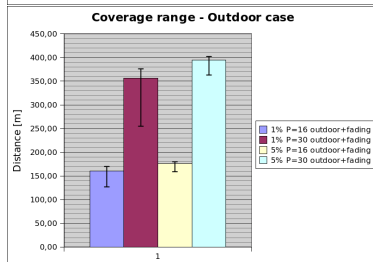
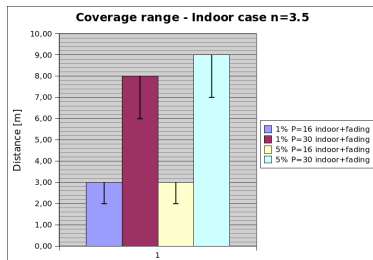
# Copertura radio in reti WiFi - risultati

Indoor: fino a 9 m @ EIRP=30 dBm

- Propagazione non in visibilità: condizione pessimistica
- Worst-case

Outdoor: più di 250 m @ EIRP=30 dBm

- Propagazione in visibilità: condizione ottimistica
- La vera distanza di fuori servizio può essere più bassa
- Best-case



# Sommario

- 1 Introduzione alla simulazione numerica
  - Problemi ingegneristici
  - Simulazione numerica
- 2 Simulazione di reti di telecomunicazioni
  - Introduzione
  - Esempi di problematiche
  - Simulatori di rete
- 3 Il simulatore NS-3
  - Introduzione
  - Primo script
- 4 Esempio di utilizzo di NS-3
  - Valutazione della copertura radio in reti WiFi
- 5 Conclusioni

# Conclusioni

- È stata presentata una breve panoramica della simulazione numerica
- È stata fornita una breve introduzione al simulatore di rete NS-3
- Sono stati mostrati alcuni esempi pratici del suo utilizzo.

## Link utili:

- Home page del progetto NS-3: <http://www.nsnam.org>
  - Contiene il tutorial, il manuale e la documentazione del codice sorgente.
  - Permette di accedere alle varie mailing list
  
- Blog di NS-3: <http://nsnam.blogspot.com/>

## 1 - Valutazione di prestazioni di generatori di traffico

Il progetto prevede l'analisi delle prestazioni di generatori/ricevitori di traffico mediante l'utilizzo di un testbed basato su sistemi Linux.

## 2 - Progetto di add-on per NS-3

Il progetto prevede lo studio e la progettazione di un modulo aggiuntivo per NS-3 per la valutazione delle prestazioni di servizi video.

# Tesi di Laurea Magistrale

## 1 - Studio di algoritmi per server di gestione di comunicazioni real-time

L'obiettivo della Tesi è quello di studiare e valutare, tramite opportuni strumenti, alcuni algoritmi utilizzabili per supportare efficacemente comunicazioni multimediali in reti eterogenee.

## 2 - Studio di meccanismi di QoS in reti eterogenee 802.11 – 802.16

L'obiettivo della Tesi è quello di analizzare e valutare algoritmi di gestione delle QoS per reti eterogenee IEEE 802.11 - IEEE 802.16. L'analisi verrà effettuata tramite NS-3.

## 3 - Studio di flussi TCP/UDP in reti satellitari DVB-RCS NG

L'obiettivo della Tesi è quello di studiare ed implementare in modo dettagliato le principali funzionalità previste dallo standard DVB-RCS NG, all'interno del simulatore NS-3.