

# Utilização de modelos analíticos para quantificação de crosstalk em WSSs

**Daniel Alves Ribeiro Chaves 1**

Escola Politécnica de Pernambuco  
Universidade de Pernambuco  
50.720-001 - Recife, Brasil  
darc@ecomp.poli.br

**Hartur Barreto Brito**

Escola Politécnica de Pernambuco  
Universidade de Pernambuco  
50.720-001 - Recife, Brasil  
hbb@ecomp.poli.br

**Autor 3**

Escola Politécnica de Pernambuco  
Universidade de Pernambuco  
50.720-001 - Recife, Brasil  
[Autor2@meu-email](mailto:Autor2@meu-email)

**Resumo** *Este projeto visa estudar o efeito da interferência de crosstalk em comutadores ópticos (WSSs e OXCs) utilizando modelagem analítica e simulações monte carlo e desenvolver um programa para que esses modelos possam ser utilizados no simulador SIMTON, ajudando na análise de resultados obtidos pelo simulador.*

**Abstract** *This project tries to study the effect of the interference and crosstalk in optical switches (WSSs and OXCs) using analytical models and monte carlo simulation and develop a program that use these models to implement at the simulator SIMTON, helping the analysis of the results.*

## 1 Introdução

A disseminação da internet tem facilitado o surgimento de vários serviços de comunicação so\_sticados.

A utilização de meios desses meios comunicação, como vídeo sob demanda, voz sobre IP e redes sociais, tem se tornado cada vez mais frequente. Esses serviços demandam a troca de grande quantidade de informações à elevadas taxas de transmissão. Para suportar esses serviços a infra-estrutura de telecomunicações deve se adequar a essa requisição. Atualmente, a tecnologia que melhor atende a esses requisitos é o sistema de comunicações ópticas interligados em rede (redes ópticas). Os sistemas ópticos atuais utilizam principalmente o sistema de multiplexação por divisão de comprimento de onda ou WDM. O WDM viabiliza a transmissão simultânea de diversos \_uxos informações diferentes (e.g. de usuários diferentes da rede) em uma mesma \_bra óptica. Cada \_uxo de informação é transmitido utilizando um comprimento de onda diferente.

As redes ópticas podem ser classi\_cadas em: opaca, transparente e translúcida. Nas opacas, o sinal é convertido do domínio óptico para o eletrônico e novamente para o óptico (conversão O-E-O) em todos os nós da rede. Essa conversão permite a regeneração de todos os sinais que estão trafegando na rede resultando em um bom desempenho da mesma. Por outro lado seu custo de implementação é elevado, pois um grande número de dispositivos que realizam O-E-O é necessário. Nas redes transparentes não são empregadas interfaces O-E-O reduzindo seu custo de implantação. Porém, como não são realizadas O-E-O, há acúmulo de degradação do sinal óptico imposto pela camada física o que leva a uma perda de desempenho signi\_cativa em relação às redes opacas. As redes translúcidas são redes transparentes que possuem interfaces O-E-O (também chamadas aqui de regeneradores) estrategicamente posicionadas na rede. A rede translúcida é uma solução intermediária que procura aliar o bom desempenho da rede opaca com o baixo custo da transparente.

A utilização de uma topologia em malha. Na topologia em malha, cada nó da rede óptica pode se conectar a diversos outros nós da rede. Ou seja, um nó com essa característica possui N portas de entrada e N portas de saída. Ele deve ser capaz de comutar qualquer comprimento de onda em uma porta de entrada para qualquer porta de saída. O dispositivo que implementa essa funcionalidade é chamado na literatura de OXC (optical cross connect).

O dispositivo óptico utilizado atualmente em redes que viabiliza a construção de OXCs é o WSS (Wavelength Selective Switch). O WSS pode ser um dispositivo com uma entrada e múltiplas saídas (1xN), ou um dispositivo com

muitas entradas e uma única saída (Nx1). O WSS pode escolher, de forma independente, quais comprimento de onda presentes em uma entrada serão transmitidos para a saída do dispositivo. As topologias de ligação mais utilizadas para se formar um OXC com WSSs são as estruturas broadcast and select (BS) e a select and select (SS). A BS apresenta um menor custo porém, em geral, introduz uma maior degradação ao sinal em comparação ao SS.

Ao ser comutado no WSS o sinal óptico pode ser degradado. Isso porque, devido a não idealidade do dispositivo, comprimentos de ondas que transportam informação diferentes podem interferir entre si no interior do WSS gerando uma penalidade conhecida como crosstalk. Nesse caso, a relação sinal ruído (relação que indica o quanto a intensidade de sinal é maior que a intensidade de ruído) do sinal comutado no WSS sofre uma redução pelo aumento da parcela de ruído gerado por crosstalk no interior do WSS.

Tipicamente um sinal óptico é comutado em vários nós no seu percurso. Se a cada nó de comutação há acúmulo da penalidade de crosstalk, ela pode impactar o sinal que está sendo transmitido a ponto de inviabilizar sua recepção.

## 2 Formulação geral para WSS Nx1

### 2.1 Premissas

O WSS considerado é mostrado na Figure 1. Ele tem N portas de entrada e 1 de saída. Há K slots de frequência diferentes permitidos em cada porta de entrada/saída. Cada slot de frequência tem um comprimento de onda permitido de  $\Delta w$  e frequências centrais  $w_1, w_2; \dots, w_K$ . A frequência é representada pela variável independente  $w$ .

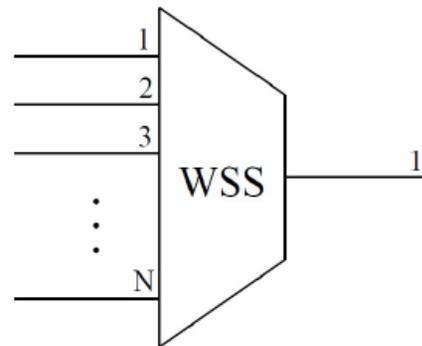


Figura 1: WSS Nx1

A matriz de comutação  $\underline{A} = \{a_{n,k}\}$  do WSS pode ser definida como:

$$a_{n,k} = \begin{cases} 1, & \text{Se o } k\text{-th slot de frequência na } n\text{-th} \\ & \text{porta de entrada for comutada para} \\ & \text{a saída.} \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

Considerando  $g_n(w)$  como função transferência entre a  $n$ -th entrada do WSS e sua saída. O vetor de transferência pode ser descrito como  $\underline{\mathbf{G}}(w) = [g_1(w), \dots, g_n(w)]^t$  composto por N funções transferência.

Suponha que na  $n$ -ésima porta de entrada do WSS exista um sinal  $s_n(w)$  (que pode ser ou não um sinal com interferência) e um sinal adicional de ruído  $r_n(w)$  (que pode ser gerado por diversas fontes, incluindo ruído ASE ou interferência de crosstalk). Além disso, assuma que o sinal total na  $n$ -ésima porta de entrada do WSS pode ser escrita por  $s_n(w) + r_n(w)$ .

## 2.2 Cálculo do sinal sem interferência na saída

Algumas partes do spectrum  $s_n(w)$  são comutadas para a saída do WSS e outras são bloqueadas. Uma forma de escrever o sinal  $s'_n(w)$  composto apenas pelas partes do spectrum  $s_n(w)$  que são comutadas para a saída do WSS é:

$$s'_n(w) = s_n(w) \sum_{k=1}^K a_{n,k} \pi(w - w_k) \quad (2)$$

Sendo a função  $\pi(w)$  é definida por:

$$\pi(w) = \begin{cases} 1, & \text{se } |w| < \frac{\Delta w}{2} \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (3)$$

Definindo  $\underline{\mathbf{\pi}}(w) = [\pi(w - w_1), \dots, \pi(w - w_k)]^t$ , e  $\underline{\mathbf{S}}' = [s'_1(w), \dots, s'_N(w)]^T$  pode-se escrever (2) na forma de matriz como:

$$\underline{\mathbf{S}}'(w) = (\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w) \quad (4)$$

Sendo a representação do produto de matrizes de Hadamard. Dadas duas matrizes  $\underline{\mathbf{A}} = \{a_{i,j}\}$  e  $\underline{\mathbf{B}} = \{b_{i,j}\}$  o produto de Hadamard retorna a matriz  $\underline{\mathbf{C}} = \{c_{i,j}\}$  considerando que  $c_{i,j} = a_{i,j} b_{i,j}$ .

O crosstalk em um WSS é gerado pela imperfeição no bloqueio do spectrum de frequência que não deveria ser comutado do  $n$ -th porta de entrada para a porta de saída. Observe que  $s'_n(w)$  contém uma porção do spectrum de frequência que é comutado da entrada para saída e não sofre nenhum bloqueio. Assim, o sinal na saída que não recebe interferência de  $r'_n(w)$  nem do crosstalk gerado pelo WSS pode ser calculado como:

$$y^S(w) = \sum_{n=1}^N g_n(w) s'_n(w) \quad (5)$$

Ou em notação de matriz:

$$y^S(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot \underline{\mathbf{S}}'(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot [(\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w)] \quad (6)$$

## 2.3 Cálculo do sinal com interferência na saída

O sinal total na entrada (sinal mais sinal de ruído) é  $s_n(w) + r_n(w)$ . Assim, o sinal de saída com interferência gerada pelo crosstalk do WSS e ruído das portas de entrada podem ser calculadas por:

$$y^{total}(w) = \sum_{n=1}^N g_n(w) [s_n(w) + r_n(w)] \quad (7)$$

Que pode ser escrito na notação de matriz como:

$$y^{total}(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot [\underline{\mathbf{S}}(w) + \underline{\mathbf{R}}(w)] \quad (8)$$

Sendo  $\underline{\mathbf{R}}(w) = [r_1(w), \dots, r_N(w)]^T$ .

## 2.4 Ruído saída e interferência de crosstalk total

Como foi descrito anteriormente  $y^{total}(w)$  e  $y^S(w)$  são, respectivamente, o sinal com interferência e sem interferência de ruído e crosstalk. Portanto, o total de ruído e interferência de crosstalk  $y^I(w)$  verificado na saída do WSS pode ser calculada como:

$$y^I(w) = y^{total}(w) - y^S(w) \quad (9)$$

Assim,

$$y^I(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) [\underline{\mathbf{S}}(w) + \underline{\mathbf{R}}(w) - (\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w)] \quad (10)$$

Resumindo:

$y^S(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot [(\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w)].$	(Signal)
$y^I(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot [\underline{\mathbf{S}}(w) + \underline{\mathbf{R}}(w) - (\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w)]$	(Noise and Xtalk)

(11)

### 3 Formulação Geral para WSS

#### 3.1 Premissas

O WSS considerado está representado na Figure 2. O WSS considerado tem 1 porta de entrada e N portas de saída. Há K slots de frequência permitidos em cada porta de entrada/saída. Cada slot de frequência tem um comprimento de onda permitido de  $\Delta w$  e frequências centrais de  $w_1; w_2; \dots; w_k$ . A frequência é representada pela variável independente  $w$

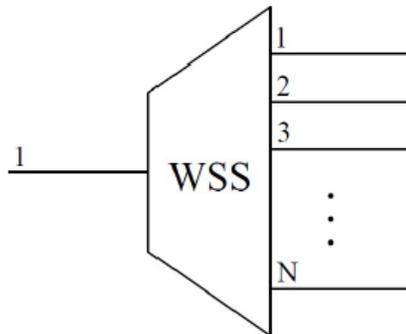


Figura 2: WSS N1xN

A matriz de comutação do WSS  $\underline{\mathbf{B}} = \{b_{n,k}\}$  é definida por:

Considere  $f_n(w)$  como sendo função transferência entre a entrada e a  $n$ -th saída do WSS. O vetor de transferência pode ser descrito como  $\underline{\mathbf{F}}(w) = [f_1(w), \dots, f_N(w)]^T$  composto por  $N$  funções-transferência.

Suponha que na porta de entrada do WSS há um sinal principal  $s(w)$  (que pode ou não conter interferência) e um sinal adicional de ruído  $r(w)$  (que pode ser oriundo de diferentes fontes incluindo ruído ASE ou interferência por crosstalk). Além disso, assuma que o sinal total da porta de entrada do WSS pode ser escrito como  $s(w) + r(w)$ .

#### 3.2 Cálculo do sinal sem interferência na saída

Algumas partes do spectrum  $s(w)$  são comutadas para a saída do WSS e a outras são bloqueadas. Uma forma de escrever o sinal  $s'_n(w)$  composto apenas pelas partes do spectrum  $s(w)$  que são comutadas para  $n$ -th saída do WSS é:

$$s'_n(w) = s(w) \sum_{k=1}^K b_{n,k} \pi(w - w_k) \quad (13)$$

Sendo a função  $\pi(w)$  definida por (3). Definindo  $\underline{\mathbf{\Pi}}(w) = [\pi(w - w_1), \dots, \pi(w - w_K)]^T$  e  $\underline{\mathbf{S}}'(w) = [s'_1(w), \dots, s'_N(w)]^T$  pode-se escrever (13) utilizando notação de matriz como:

$$\underline{\mathbf{S}}'(w) = [\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)] s(w) \quad (14)$$

O crosstalk em um WSS é gerado pela imperfeição no bloqueio do spectrum de frequência que não deveria ser comutado da porta de entrada para a  $n$ -th porta de saída. Observe que  $s'_n(w)$  contém uma porção do spectrum de frequência que é comutado da entrada para a  $n$ -th saída e não sofre nenhum bloqueio. Assim, o sinal  $y_n^S(w)$  na  $n$ -th porta de saída que não recebe interferência de  $r(w)$  nem do crosstalk gerado pelo WSS pode ser calculado como:

$$y_n^S(w) = f_n(w) s'_n(w) \quad (15)$$

Definindo  $\underline{\mathbf{Y}}^S(w) = [y_1^S(w), \dots, y_N^S(w)]^T$  pode-se escrever (15) em notação de matriz como:

$$\underline{\mathbf{Y}}^S(w) = \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes \underline{\mathbf{S}}'(w) = s(w) \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes [(\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w))] \quad (16)$$

Note que  $s(w)$  é um escalar. Então pode ser colocado à esquerda da equação.

#### 3.3 Cálculo da interferência do sinal na saída

O sinal total de entrada (sinal mais ruído) é dado por  $s(w) + r(w)$ . Assim, o sinal de interferência gerada pelo crosstalk do WSS e o sinal de ruído da porta de entrada do WSS pode ser calculado por:

$$y_n^{total}(w) = [s(w) + r(w)] f_n(w) \quad (17)$$

Que pode ser escrito na notação de matriz como:

$$\underline{\mathbf{Y}}^{total}(w) = \underline{\mathbf{F}}(w)[s(w) + r(w)] \quad (18)$$

Sendo  $\underline{\mathbf{Y}}^{total}(w) = [y_1^{total}(w), \dots, y_N^{total}(w)]^T$ .

### 3.4 Total de ruído na saída e interferência de crosstalk

Como foi discutido,  $y_n^{total}(w)$  e  $y_n^s(w)$  são, respectivamente, os sinais da  $n$ -th porta de saída com e sem interferência gerada pelo ruído e crosstalk  $y_n^I(w)$  verificada na  $n$ -th porta de saída do WSS pode ser calculada por:

$$y_n^I(w) = y_n^{total}(w) - y_n^s(w) \quad (19)$$

Que pode ser escrita em notação de matriz como:

$$\underline{\mathbf{Y}}^I(w) = \underline{\mathbf{Y}}^{total}(w) - \underline{\mathbf{Y}}^s(w) = \underline{\mathbf{F}}(w)[s(w) + r(w)] - s(w) \quad (20)$$

Que pode ser reescrita como:

$$\underline{\mathbf{Y}}^I(w) = s(w)[\underline{\mathbf{F}}(w) - \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes (\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w))] + r(w) \underline{\mathbf{F}}(w) \quad (21)$$

Resumindo:

$\underline{\mathbf{Y}}^S(w) = s(w) \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes [(\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w))]$	(Signal)
$\underline{\mathbf{Y}}^I(w) = s(w) \underline{\mathbf{F}}(w) - \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes (\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) + r(w) \underline{\mathbf{F}}(w)$	(Noise and Xtalk)

(22)

## 4 Formulação para arquitetura de nó broadcast and select

### 4.1 Premissas

Nesta seção serão aplicados os resultados obtidos em (11) para estabelecer o modelo analítico para o nó com arquitetura broadcast and select. Essa arquitetura é mostrada na Figure 3. No nó há  $N$  fibras de entrada são indexadas com  $i$  enquanto as fibras de saída são indexadas com  $j$ .

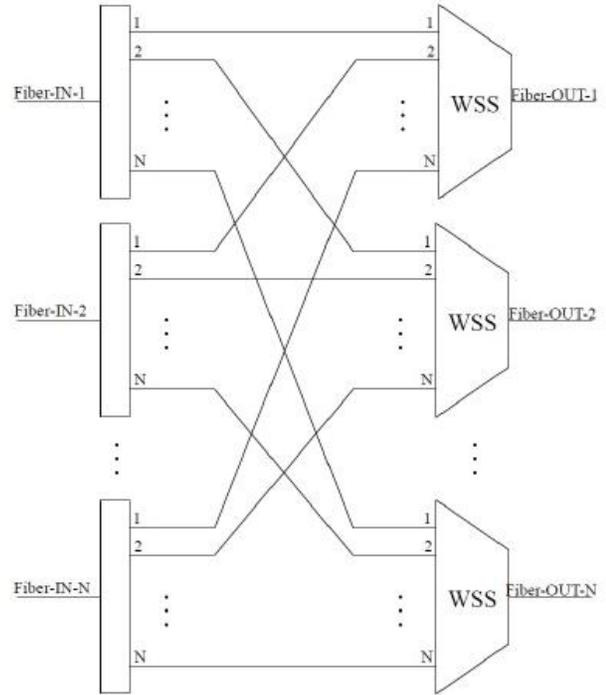


Figura 3: Arquitetura de nó broadcast and select

Suponha que, na  $i$ -th fibra da porta de entrada, há um sinal principal  $s_i^{fbr}(w)$  (que pode ou não ser um sinal principal com interferência) e um sinal adicional de ruído  $r_i^{fbr}(w)$  (que pode incluir várias fontes diferentes como o ruído ASE ou interferência de crosstalk). Além disso, assumamos que o sinal total na  $i$ -th porta de entrada pode ser escrita como  $s_i^{fbr}(w) + r_i^{fbr}(w)$ . Considere que o splitter localizado na  $i$ -th fibra de entrada tem uma perda de  $l_i^{sp}$ .

### 4.2 Formulação

O sinal  $y_j^S(w)$  na  $j$ -th saída do WSS pode ser descrito em função de um vetor de transferência  $\underline{\mathbf{G}}_j^T(w)$ , uma matriz de comutação  $\underline{\mathbf{A}}_j$ , um vetor de perdas  $\underline{\mathbf{L}}^{sp}$  e um vetor de sinais  $\underline{\mathbf{S}}^{fbr}$  da seguinte forma:

$$y_j^S(w) = \frac{1}{N} \underline{\mathbf{G}}_j^T(w) \cdot \left\{ [\underline{\mathbf{A}}_j \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)] \otimes [\underline{\mathbf{L}}^{sp} \otimes \underline{\mathbf{S}}^{fbr}] \right\} \quad (23)$$

O ruído e o crosstalk podem ser descritos em função da quantidade  $N$  de portas do WSS, uma matriz de comutação  $\underline{\mathbf{A}}_j$ , um vetor de perdas  $\underline{\mathbf{L}}^{sp}$  e o vetor de ruído adicional  $\underline{\mathbf{R}}^{fbr}$  da seguinte forma:

$$y_j^i(w) = \frac{1}{N} \underline{\mathbf{G}}_j^T(w) \cdot \left[ \underline{\mathbf{L}}^{sp} \otimes \underline{\mathbf{S}}^{fbr} + \underline{\mathbf{L}}^{sp} \otimes \underline{\mathbf{R}}^{fbr} - (\underline{\mathbf{A}}_j \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes (\underline{\mathbf{L}}^{sp} \otimes \underline{\mathbf{S}}^{fbr}) \right] \quad (24)$$

### 5 Formulação para arquitetura de nó switch and select

Nesta seção serão aplicados os resultados obtidos em (11) e (22) para estabelecer o modelo analítico para o nó com arquitetura switch and select. Essa arquitetura é mostrada na Figure 3. No nó há  $N_{bras}$  de entrada e  $N_{bras}$  de saída. As  $bras$  de entrada são indexadas com  $i$  enquanto as de saída são indexadas com  $j$ .

Pode-se calcular o sinal do  $j$ -th WSS  $N \times 1$  em função de uma matriz de comutação  $\underline{\mathbf{A}}_j$  e pelas matrizes  $\underline{\mathbf{M}}^T$  e  $\underline{\mathbf{C}}^T$  que podem ser calculadas, respectivamente, por  $\underline{\mathbf{M}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j$  e  $\underline{\mathbf{C}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j$ , como:

$$y_j^S(w) = \underline{\mathbf{G}}_j^T(w) \left[ (\underline{\mathbf{A}}_j \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes (\underline{\mathbf{M}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j) \right] \quad (25)$$

E a interferência pode ser calculada como:

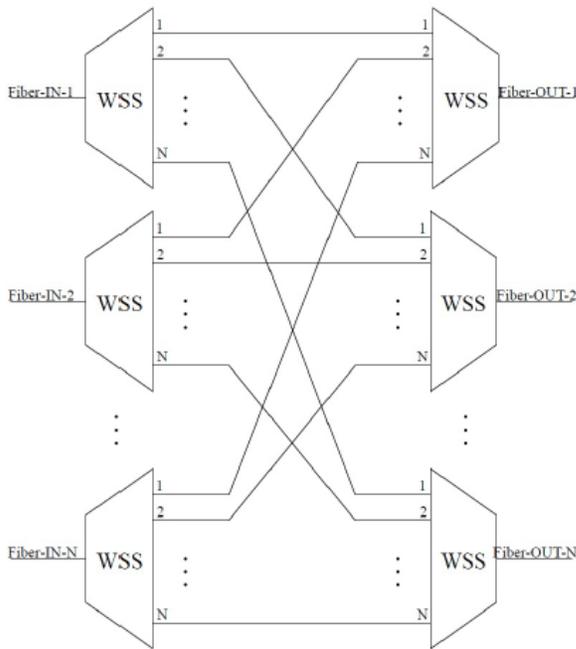


Figura 4: Arquitetura de nó switch and select

$$y_j^S(w) = \underline{\mathbf{G}}_j^T(w) \left[ \underline{\mathbf{M}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j + \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j - (\underline{\mathbf{A}}_j \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes (\underline{\mathbf{M}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j) \right] \quad (26)$$

## 6 Implementação da Modelagem

Esta seção irá comentar a respeito do programa desenvolvido para ser utilizado em simulações.

### 6.1 Premissas

Para representação dos valores foram utilizados tabelas csv. Entre elas algumas devem ser preenchidas antes da execução do programa, são elas: Tabela com sianis de entrada dos WSSs, tabelas referentes 6 às funções transferência do primeiro e segundo layer e tabela referente a topologia do nó.

A partir dessas tabelas o programa é capaz de calcular os sianis de saída do layer 1 e alocar, de acordo com a topologia, como sinal de entrada do layer 2 para que possa ser calculado o sinal de saída do layer 2.

Com esses resultados é possível retirar informações sobre o ruído de acordo com a modelagem demonstrada nas seções anteriores.