Universitat Oberta de Catalunya uoc.edu

Modelatge multimodal d'una impedància paral·lela als strips en una línia three-line-microstrip

Alejandro Martínez Martínez
Grau en Enginyeria de Tecnologies i Serveis de Telecomunicacions
Disseny de Sistemes Electrònics

Consultor: Carlos Gonzalo Moreno Soriano
Professor responsable: Germán Cobo Rodríguez

15/06/2020

Aquesta obra està subjecta a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 3.0 Espanya de Creative Commons

Agraïments

Als amics, i en especial a un que ens ha deixat

Als meus pares per ajudar-me quan ho he necessitat

A la Silvia per aguantar-me en els dies dolents i donar-me suport en tot moment

A la Clara per ser la llum de la nostra vida

FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	*Modelatge multimodal d'una impedància paral·lela als strips en una línia three-line-microstrip*
Nom de l'autor:	*Alejandro Martínez Martínez*
Nom del consultor/a:	*Carlos Gonzalo Moreno Soriano*
Nom del PRA:	*Germán Cobo Rodríguez*
Data de lliurament (mm/aaaa):	*15/06/2020*
Titulació o programa:	*Grau en Enginyeria de Tecnologies i Serveis de Telecomunicacions*
Àrea del Treball Final:	*Disseny de sistemes Electrònics*
Idioma del treball:	*Català*
Paraules clau	*Microstrip*

Resum del Treball (màxim 250 paraules): *Amb la finalitat, context d'aplicació, metodologia, resultats i conclusions del treball*

Una línia de transmissió és un sistema destinat a guiar o dirigir energia electromagnètica. Les línies de transmissió són essencials en qualsevol sistema de telecomunicació, ja que transporten l'energia electromagnètica entre dos parts d'un sistema.

En aquest treball ens centrarem en les línies de transmissió microstrip, concretament en les línies de transmissió three-line-microstrip. Les línies three-line-microstrip estan formades per tres conductors (strips), situats entre si de forma paral·lela i a sobre d'un dielèctric amb un pla de massa a la capa inferior. Aquesta línia de transmissió anomenada multimodal és capaç de transmetre tres tipus d'ones electromagnètiques (modes) de propagació a la vegada: OO,EE,OE.

L'objectiu final del TFG serà la validació d'un model circuital equivalent a una transició, concretament s'ha inserit una impedància paral·lela al segon i tercer strip de la línia de transmissió utilitzant un anàlisi multimodal.

La validació es realitzarà comparant els resultats de la simulació del model circuital equivalent obtingut de forma teòrica amb els resultats obtinguts en la simulació electromagnètica del nostre circuit.

Abstract (in English, 250 words or less):

A transmission line is a system destinated to guide or lead electromagnetic energy. The transmission lines are essential in any telecommunications systems, due transport the electromagnetic energy between to parts of the system.

In this work we will focus on the microstrip transmission lines, specifically in the three-line-microstrip transmission lines. The three-line-microstrip lines are formed by three strips that they are situated in parallel among them and on top of a dielectric with ground plane in the lower layer. This transmission lines named multimodal is able to transmit three propagation electromagnetics waves types (modes) at the same time: OO, EE, OE.

The final goal of this work will be the circuit model validation equivalent to a transition, specifically an impedance parallel to the second and third strip of the transmission line has been inserted using a multimodal analysis.
the validation will be performed by comparing the circuit simulation results of the equivalent circuit model obtained theoretically with the results obtain in the electromagnetic simulation of our circuit

Índex

1. INTRODUCCIÓ 1
1.1 Context i justificació del Treball 1
1.2 Objectius del Treball 1
1.3 Enfocament i mètode seguit 2
1.4 Planificació del Treball 2
1.5 Breu sumari dels productes obtinguts 4
1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria 4

2. LES LÍNIES DE TRANSMISSIÓ: THREE LINE MICROSTRIP 6
2.1. Introducció 6
2.2 La línia de transmissió microstrip 8
2.3 La línia de transmissió three-line-microstrip 9

3. PARÀMETRES DE DISPERSIÓ (S). DEFINICIÓ I MÈTODE DE CÀLCUL 12
3.1 Introducció 12
3.2 Paràmetres de dispersió (S) 13
3.3 Paràmetres de dispersió Modals 15
3.4 Propietats de la matriu de paràmetres S 18
3.5 Càlcul dels paràmetres de dispersió (S). 18
Mètode de càlcul de tensions i corrents 18

4. MODEL CIRCUITAL EQUIVALENT PER A LA TRANSICIÓ D'UNA IMPEDÀNCIES PARAL·LEL AL SEGON I TERCER STRIP 23
4.1 Introducció 23
4.2 Transició d'una impedància paral·lela al segon i al tercer strip en una línia de transmissió three-line-microstrip. 24
4.3 Anàlisi Multimodal de la transició d'una impedància paral·lela al segon i tercer strip en una línia de transmissió three-line-microstrip. 25
4.4 Model circuital equivalent per a la transició d'una impedància paral·lela al segon i al tercer strip. 28
4.5 Validació del model circuital per a la transició d'una impedància paral·lela al segon i tercer strip en una línia de transmissió three-line-microstrip. 36

5. CONCLUSIONS 54

6. BIBLIOGRAFIA 56

Llista de figures

Figura 1: Línia coplanar amb pla de massa inferior (línia three-line-microstrip) 7
Figura 2: Línia de transmissió microstrip 7
Figura 3: Definició de tensió i corrent modal 8
Figura 4: Modelatge circuital de la línia de transmissió microstrip 8
Figura 5: Definició de les tensions i corrent pel mode EE 9
Figura 6: Definició de les tensions i corrent pel mode OO 9
Figura 7: Definició de les tensions i corrent pel mode OE 10
Figura 8: Modelatge modal de la línia three-line-microstrip 11
Figura 9: Modelatge físic de la línia three-line-microstrip 11
Figura 10: Circuit de microones genèric de N ports 14
Figura 11: Circuit Multimodal de Microones 16
Figura 12: Circuit de microones de N ports 19
Figura 13: Circuit de microones carregats amb la seva impedància de referència 20
Figura 14: Tram de línia three-line-microstrip amb la transició d'una impedàncies paral·leles entre el segon i el tercer strip 24
Figura 15: Definició de les tensions i corrents pel mode EE 25
Figura 16: Definició de les tensions i corrents pel mode OO 25
Figura 17: Definició de les tensions i corrents pel mode OE 25
Figura 18: Model multimodal equivalent de la transició three-line-microstrip amb una impedància en paral·lel 29
Figura 19: (a) Línia three-line-microstrip amb la transició d'una impedàncies paral·leles al segon i tercer strip; (b) Línia microstrip amb transició a three-line-microstrip i transició de dues impedàncies paral·leles als strips 36
Figura 20: Dimensions físiques de la línia en perfil 37
Figura 21: Dimensions físiques de la línia en planta 38
Figura 22: Línia three-microstrip amb impedància zero entre segon i tercer strip 39
Figura 23: Paràmetres i model circuital pel mode EE en la línia three-line-microstrip 40
Figura 24: Paràmetres i model circuital pel mode OO en la línia three-line-microstrip 41
Figura 25: Paràmetres i model circuital pel mode OO en la línia three-line-microstrip 41
Figura 26: Model circuital de la transició amb el simulador ADS 43
Figura 27: Model circuital de la transició amb el simulador ADS 43

Figura 28: Model circuital de la transició amb el simulador ADS..... 44
Figura 29: Paràmetres S_{11} i S_{12}..... 44
Figura 30: Paràmetres S22 i S21..... 45
Figura 31: Dimensions físiques de la línia en planta 46
Figura 32: Línia d'estudi amb impedància zero entre segon i tercer strip..... 47
Figura 33: Paràmetres i model circuital pel mode Microstrip..... 49
Figura 34: Paràmetres i model circuital mode EE en la part de línia three-microstrip..... 49
Figura 35: Paràmetres i model circuital mode OO en la part de línia three-microstrip 49
Figura 36: Paràmetres i model circuital mode OO en la part de línia three-microstrip 50
Figura 37: Matriu de paràmetres S de la transició microstrip 50
Figura 38: Matriu paràmetres S d'una transició impedància en línia three-microstrip..... 50
..... 51
Figura 39: Model circuital de la transició microstrip i de la resistència en la línia three-microstrip amb el simulador ADS..... 51
Figura 40: Model circuital de la transició amb el simulador ADS..... 51
Figura 41: Model circuital de la transició amb el simulador ADS..... 52
Figura 42: Paràmetres S11 i S12..... 52
Figura 43: Paràmetres S22 i S21..... 53

CAPÍTOL 1:

INTRODUCCIÓ

1.1 Context i justificació del Treball

Aquest treball final de Grau té com objecte aprofundir en una temàtica concreta estudiada al llarg del Grau. En aquest sentit en l'assignatura de circuits de microones es va estudiar les guies d'on i com modelitzar aquestes guies d'ona mitjançant línies de transmissió, incloent discontinuïtats i obstacles.

En aquest treball s'analitza la conversió modal originada en una transició construïda en una línia de transmissió three-line-microstrip. Concretament es vol validar mitjançant un model circuital equivalent la transició d'una impedància paral·lela al segon i tercer strip en una línia de transmissió three-line-microstrip.

1.2 Objectius del Treball

L'objectiu principal i final del treball és obtenir i validar, un model circuital que permeti analitzar la conversió modal de la transició objecte d'estudi (impedància paral·lela al segon i tercer strip). Tot i tenir un objectiu final concret, dintre del treball hem marcat objectius o fites que ens permetran arribar al nostre objectiu final.

Els objectius específics del treball són els següents:

1. Estudi i funcionament de les línies de transmissió microstrip i més concretament de la línia de transmissió three-line-microstrip.
2. Implementació de la transició de l'estudi.

3. Definició dels paràmetres de dispersió (S) per a la línia de transmissió d'estudi a partir de càlcul de les tensions i corrents del nostre circuit.
4. Realització del l'anàlisi Multimodal de la transició en una línia de transmissió three-line-microstrip.
5. Deducció i validació del model circuital multimodal equivalent de la transició en la línia de transmissió three-line-microstrip

1.3 Enfocament i mètode seguit

Aquest treball final de grau està orientat a la deducció i posterior validació d'un model circuital equivalent a una transició en el si d'una línia de transmissió three-line-microstrip. Concretament s'insereix una resistència al mig de la línia three-microstrip i paral·lela al segon i tercer strip.

Per tant es realitzarà un anàlisi de la transició per posteriorment dissenyar i simular un circuit mitjançant el programar de simulació ADS. Amb aquest software realitzarem una simulació electromagnètica i una simulació circuital. El projecte no només tractar d'observar l'afectació que té en els modes de propagació la inserció d'una resistència sinó també fer vàlid i rigorós el mètode utilitzat i els paràmetres calculats de forma teòrica.

1.4 Planificació del Treball

Els recursos utilitzats per la realització del Treball Final de Grau els podem clasificar entre els recursos humans i el recursos materials.

Recursos Humans: Els recursos humans utilitzats els podem dividir en dos parts. Una part que és l'encarregada de realitzar tots els càlculs, anàlisi i simulació de la transició. I una altra part l'encarregada de la tasca administrativa, es a dir de l'elaboració de la memòria i de la presentació del treball. Ambdues tasques han estat realitzades per l'autor del treball.

Recursos Materials: Els recursos materials utilitzats han estat un ordinador portàtil amb webcam. Els programes Advanced Designer System, Microsoft Word, Microsoft Power Point i diversos materials tan bibliogràfics com d'assignatures, concretament s'ha utilitzat materials didàctics de l'assignatura de Circuits de microones.

1.4.1 Tasques a realitzar

Les tasques realitzades en el TFG les podem agrupar en tres àrees diferenciades:

- El producte final que és el resultat de tots els objectius previstos. En aquest sentit el producte final és el resultat del anàlisi de la transició per l'obtenció dels resultats previstos i posterior simulació i comparació dels resultats obtinguts.

- La memòria del treball on es detallarà tot el mètode utilitzat. Es a di, tots els càlculs realitzats per tal d'arribar a la implementació del circuit equivalent i on s'insereixen grafisme dels circuits implementats i dels resultats obtinguts.

- La presentació del treball final en format de diapositives i amb una veu en off de l'explicació dels elements més destacats de cadascuna d'elles.

1.4.2 Planificació del treball

SEMANA			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ACTIVITAT	INICI	FINAL	24/02/2020	02/03/2020	09/03/2020	16/03/2020	23/03/2020	30/03/2020	06/04/2020	13/04/2020	20/04/2020	27/04/2020	04/05/2020	11/05/2020	18/05/2020	25/05/2020	01/06/2020	08/06/2020	15/06/2020	22/06/2020	29/06/2020
PAC1	24/02/2020	09/03/2020	PAC 1																		
RECULL	09/03/2020	16/03/2020				PAC 2															
LINE-THREELINE	16/03/2020	20/03/2020				PAC 2															
PARÀMETRES	20/03/2020	26/03/2020				PAC 2															
TRANSICIÓ ESTUDI	26/03/2020	28/03/2020				PAC 2															
ANÀLISI	28/03/2020	15/04/2020				PAC 2				PAC 3											
DEDUCCIÓ	15/04/2020	29/04/2020								PAC 3											
VALIDACIÓ	29/04/2020	13/05/2020								PAC 3					PAC 4						
RESULTATS	13/05/2020	27/05/2020													PAC 4						
FUTUR	27/05/2020	31/05/2020													PAC 4						
REVISIÓ	27/05/2020	10/06/2020													PAC 4						
POWER POINT	10/06/2020	14/06/2020													PAC 4						
EXPOSICIO	10/06/2020	23/06/2020													PAC 4						

- **RECULL:** Recull informació per realitzar el projecte.
- **LINE-THREE LINE:** Estudi de la línia de transmissió que utilitzarem després en l'estudi de la transició.
- **PARÀMETRES:** Estudi dels paràmetres S. Definició.
- **TRANSICIÓ ESTUDI:** La nostra transició. Dibuix
- **ANÀLISI:** Deducció dels paràmetres S de la nostra transició. Càlcul matemàtic.
- **DEDUCCIÓ:** Obtenció del model circuital equivalent.
- **VALIDACIÓ:** Realització dels circuits que utilitzarem per validar la nostra transició.
- **RESULTATS:** Obtenció dels resultats a partir de la simulació del nostres circuits i comparació dels resultats obtinguts en el model circuit i el model electromagnètic.
- **FUTUR:** Possibles camps futurs a estudiar i propostes futures.
- **REVISIÓ:** Observació dels resultats, observació de problemes i resultats, revisió i realització final del treball.
- **POWER POINT:** Fer power point.
- **EXPOSICIÓ:** Preparació de l'exposició i preguntes.

1.5 Breu sumari dels productes obtinguts

El present treball final de grau consisteix és realitzar l'estudi d'una transició (impedància) en una línia de transmissió three-line-microstrip. En els diferents apartats s'obté un circuit equivalent a la transició i és valida mitjançant els resultats obtinguts amb la simulació circuital i electromagnètica de la transició.

1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria

S'ha dividit el TFG en els següents capítols:

Capítol 2: LES LÍNIES DE TRANSMISSIÓ: THREE LINE MICROSTRIP

S'explicarà que són les línies de transmissió microstrip. Conceptes. Línies de transmissió microstrip i línies de transmissió three-line-microstrip.

Capítol 3: PARÀMETRES DE DISPERSIÓ (S). DEFINICIÓ I MÈTODE DE CÀLCUL

Anàlisi dels paràmetres de dispersió (S), paràmetres de dispersió modals, mètode de càlcul. Conceptes generals.

Capítol 4: MODEL CIRCUITAL EQUIVALENT PER A LA TRANSICIÓ D'UNA IMPEDÀNCIES PARAL·LEL AL SEGON I TERCER STRIP

Es realitzarà l'estudi de la nostra transició. Aquesta part es dividirà en tres blocs fonamentals que seran l'eix central del nostre projecte.

- Anàlisi Multimodal de la transició estudiada en una línia de transmissió three-line-microstrip.
- Realització del model circuital equivalent per a la transició d'estudi.
- Validació del model circuital multimodal per a la transició estudiada.

CAPÍTOL 2

LES LÍNIES DE TRANSMISSIÓ: THREE LINE MICROSTRIP

2.1. Introducció

Una línia de transmissió constitueix bàsicament un sistema destinat a guiar o dirigir energia electromagnètica. Les línies de transmissió constitueixen un element clau en qualsevol sistema de telecomunicació ja que s'ocupa de transportar l'energia electromagnètica entre dos parts d'un sistema. Els sistemes de telecomunicacions i en particular els de radiocomunicació utilitzen diferents tipus de línies de transmissió segons la banda de freqüència en la qual es treballa [1].

La transmissió de les ones electromagnètiques es fonamenten en les equacions de Maxwell i en el medi pel qual es propaguen aquestes ones. Per aquest motiu tots els camps que es propaguen al llarg d'una línia de transmissió ho fan seguint unes característiques determinades.

Hi ha diferents línies de transmissió, unes en que només es possible la propagació de un mode de propagació i d'altres línies de transmissió on són possibles la propagació de dos o mes modes de propagació. El mode de propagació és el tipus de propagació electromagnètica que una línia de transmissió posseeix.

En aquest sentit es parla de línia de transmissió monomodal, quan en el marge de freqüències d'estudi només es propaga un sol mode (una única propagació de camp electromagnètic), en canvi si en el marge de freqüències d'estudi es propaguen dos o

més modes (diverses propagacions de camp electromagnètic) parlarem d'una línia de transmissió multimodal.

Així com definim les línies de transmissió segons el mode de propagació, també les podem definir segons la seva composició. Les línies de transmissió coplanar són línies de transmissió formades per tres línies de transmissió a sobre d'un substrat dielèctric.

Els modes de propagació venen determinats per una tensió i un corrent, que es igual al llarg de total la línia de transmissió. Les línies de transmissió coplanars tenen dos modes de propagació: el mode de propagació par i el mode de propagació senar.

El nostre estudi es centrarà en un altra tipus de línia de transmissió, les línies de transmissió microstrip. La diferencia entre les línies de transmissió coplanar i les línies de transmissió microstrip es que les línies de transmissió microstrip tenen un pla de massa inferior. El fet de posar un pla de massa inferior fa que els modes de propagació no siguin dos, (mode parell i mode senar) sinó tres modes de transmissió, que com explicarem mes endavant seran els modes de transmissió EE, OO i OE, això farà que les tensions i corrents de cada mode siguin diferents i estiguin definides de forma diferent [2]-[5].

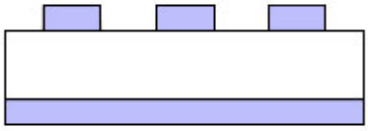


Figura 1: Línia coplanar amb pla de massa inferior (línia three-line-microstrip)

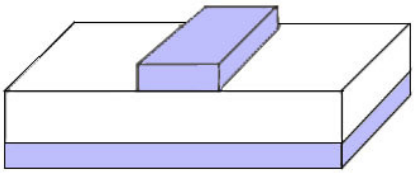


Figura 2: Línia de transmissió microstrip

2.2 La línia de transmissió microstrip

Una línia de transmissió microstrip està formada per un conductor (strip) sobreposat a un dielèctric i on trobem a la part inferior un pla de massa. En les línies de transmissió microstrip i en el marge de freqüències d'estudi només es propaga un sol mode, per tant parlarem d'una línia de transmissió monomodal. Aquest mode de propagació s'anomena mode microstrip.

En la **figura 3** podem observar com funciona la línia de transmissió microstrip i com circula la tensió i el corrent al llarg del strip. En aquest mode, la tensió ($V_{\mu s}$) la trobem entre el conductor i el pla de massa inferior; mentre que el corrent ($I_{\mu s}$) circula al llarg de conductor i retornant pel pla de massa inferior.

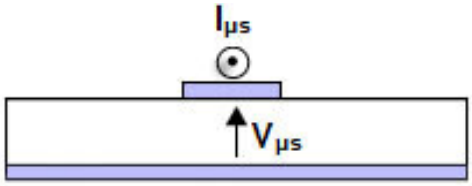


Figura 3: Definició de tensió i corrent modal

Si definim la nostra línia de transmissió des del punt de vista d'un circuit (figura 4) podem dibuixar la línia microstrip com una línia de transmissió definida pels paràmetres d'una impedància característica ($Z_{O\mu s}$) i d'una constant de propagació ($\gamma_{\mu s}$) i que és capaç de propagar la tensió del mode microstrip ($V_{\mu s}$) i el corrent del mode microstrip ($I_{\mu s}$).

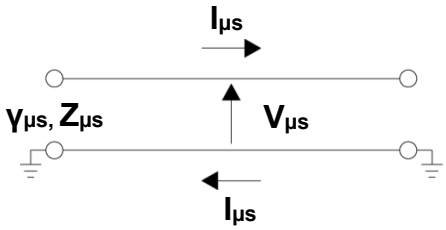


Figura 4: Modelatge circuital de la línia de transmissió microstrip

2.3 La línia de transmissió three-line-microstrip

Les línies de transmissió three-line-microstrip estan formades per tres conductors (strips) situats entre si de forma paral·lela i a sobre d'un dielèctric amb un pla de massa inferior. Aquest tipus de línia de transmissió i en la seva freqüència d'estudi pot transportar tres tipus d'ones electromagnètiques diferents, el que anomenen modes de transmissió. Per tant estarem parlant d'una línia de transmissió multimodal. Les línies de transmissió three-line-microstrip propaguen els següents modes de transmissió: mode EE **(figura 5)**, mode OO **(figura 6)** i mode OE **(figura 7)** [4],[5].

En la **figura 5** observem la configuració de les corrents i tensions en el mode EE; la tensió V_{ee} ve definida i circula en cadascun dels strip entre el conductor i el pla de massa inferior i el corrent $I_{ee}/3$ circula per cadascun dels tres conductors i retorna pel pla de massa inferior.

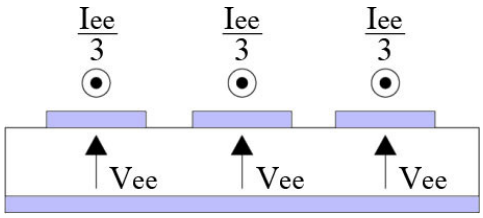


Figura 5: Definició de les tensions i corrent pel mode EE

En la **figura 6** observem la configuració de les corrents i tensions en el mode OO; la tensió $V_{oo}/3$, definida en els strips exteriors, va entre el conductor i en el pla de massa inferior mentre que la tensió ($2V_{oo}/3$) del strip central entre el pla de massa inferior i el conductor. Mentre que el corrent $I_{oo}/2$, circula per cadascun dels conductor dels extrems i retorna pel conductor central ($2\ I_{oo}/3$).

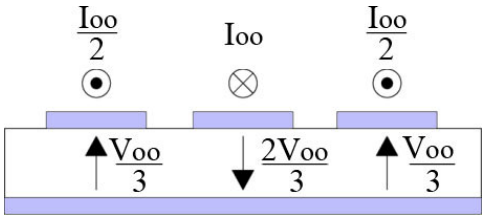


Figura 6: Definició de les tensions i corrent pel mode OO

En la **figura 7** observem la configuració de les corrents i tensions en el mode OE; la tensió $V_{oe}/2$, definida en els strips exteriors, va entre el conductor i en el pla de massa inferior en un d'ells i del pla de massa inferior al conductor en l'altra (el conductor central no te definida cap tensió en el mode). Mentre que el corrent $I_{oe}/2$, circula per cadascun per un del conductors dels extrems i retorna pel l'altre conductor del extrem.

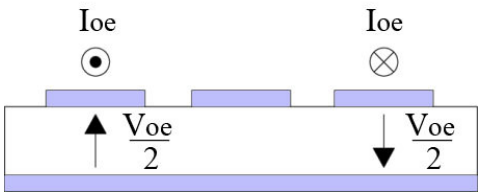


Figura 7: Definició de les tensions i corrent pel mode OE

Un cop tenim el comportament de les tensions i corrents de la línia de transmissió en cada mode EE,OO,OE haurem de veure quin model circuital equivalent utilitzarem. Des d'aquest punt de vista una línia three-line-microstrip es pot descriure de dues formes diferents.

Per un costat es pot realitzar una interpretació modal **(Figura 8)** del nostre circuit. En aquest cas les tres línies de transmissió seran independents les unes amb les altres i no hi haurà interacció entre els diferents modes a no ser que ens trobem amb una transició, per tant cada línia de transmissió propagarà un mode, hi haurà una línia pel mode OO una pel mode EE i una altra pel mode OE. Per conseqüent al propagar-se de forma independent cada línia propagarà la seva tensió del mode, anomenada tensió modal, (V_{ee}, V_{oo}, V_{oe}) i el seu corrent de cada mode, anomenat corrent modal, (I_{ee}, I_{oo}, I_{oe}). Així mateix cada línia vindrà determinada per una constant de propagació (γ_{ee}, γ_{oo}, γ_{oe}) i una impedància característica (Z_{Oee}, Z_{Ooo}, Z_{Ooe}).

Per una altra part es por realitzar una interpretació física **(figura 9)** de la línia de transmissió. On a cadascuna de les línies de transmissió es propagarà una part del seu mode de propagació d'acord amb la definició de les tensions i corrents establerta per a aquell mode (**figura 5, figura 6, figura 7)** [4],[5].

Com veurem posteriorment aquesta serà la lectura que utilitzarem per desenvolupar la nostra transició, es a dir analitzarem la transició del nostre circuit des d'un punt de vista del modelatge físic i així obtenir un model circuital que utilitzarem posteriorment a la nostra transició. El modelatge modal l'utilitzarem a l'hora de dibuixar les línies de transmissió en el simulador ADS.

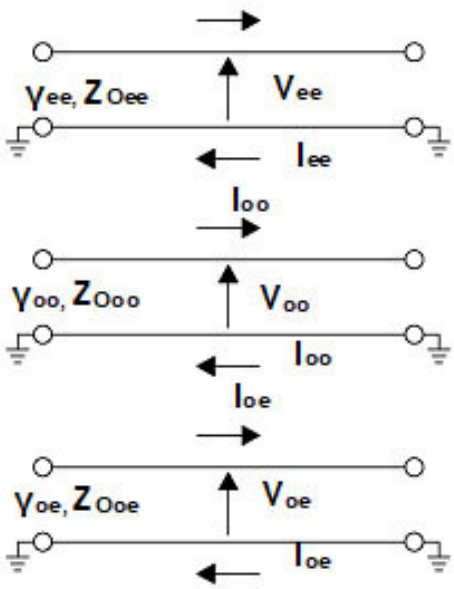


Figura 8: Modelatge modal de la línia three-line-microstrip

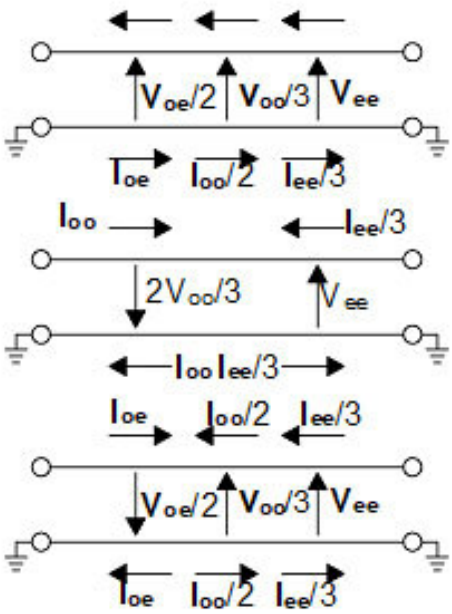


Figura 9: Modelatge físic de la línia three-line-microstrip

CAPÍTOL 3:

PARÀMETRES DE DISPERSIÓ (S). DEFINICIÓ I MÈTODE DE CÀLCUL

3.1 Introducció

En aquest apartat introduirem els paràmetres de dispersió també coneguts com paràmetres S i veure com caracteritzem una xarxa de microones a partir de la seva matriu de dispersió.

Parlarem de conceptes com ones normalitzades i paràmetres S, així com dels paràmetres S modals {Sm}, que són els paràmetres que calcularem a partir del modelatge físic de la línia three-line-microstrip i que posteriorment utilitzarem per la validació del model mitjançant proves realitzades en el simulador ADS.

El càlcul correcte dels paràmetres S es fonamental per tal de no cometre errors que posteriorment invalidin el nostre model i per tant la obtenció d'aquesta matriu permetrà posteriorment deduir un model circuital equivalent amb el que realitzarem l'anàlisi de forma, rigorosa de la interacció modal.

3.2 Paràmetres de dispersió (S)

Tot circuit pot estar integrat per elements passius (resistències, bobines, condensadors), dispositius actius (díodes, transistors) i línies de transmissions. Les línies de transmissió que connecten un circuit de microones al exterior s'anomena port i per la caracterització del circuit s'escull un pla de referència en cadascuna de les citades línies on es defineixen magnituds de tensió i corrent. [6]

Existeixen diferents formes de caracteritzar un circuit de microones. Podem modelar el circuit, per exemple, a partir de la seva matriu de paràmetres [Z] o partir de la matriu de paràmetres [Y]. La dificultat d'obtenir els citats paràmetres, es a dir la mesura de les tensions i corrents, en un circuit a altes freqüències provoca que en moltes ocasions aquest tipus de caracterització no sigui la mes idònia.

Una descripció més adient per un circuit de microones seria la caracterització a partir de la seva matriu de paràmetres de dispersió [S] (**figura 10**); on es relacionen les ones incidents, les ones reflexades i les ones transmitides a cada port.

Com veurem al llarg d'aquest punt la matriu de paràmetres S és representada per una matriu que creix exponencialment amb el número de ports (en el nostre cas tindrem tres ports d'entrada i tres de sortida, total 36 elements), per tant es podrà resoldre matemàticament ja que obeeix a l'àlgebra de matrius. Es a dir en el nostre cas podrem relacionar les interaccions existents entre les tensions i corrents en els tres modes de propagació (mode EE, mode oo, mode OE).

Per tant els paràmetres S ens serviran per caracteritzar el modelatge físic dels tres modes de propagació de la línia three-line-microstrip i obtenir una matriu de paràmetres S que validarem i ens caracteritzarà la transició d'estudi.

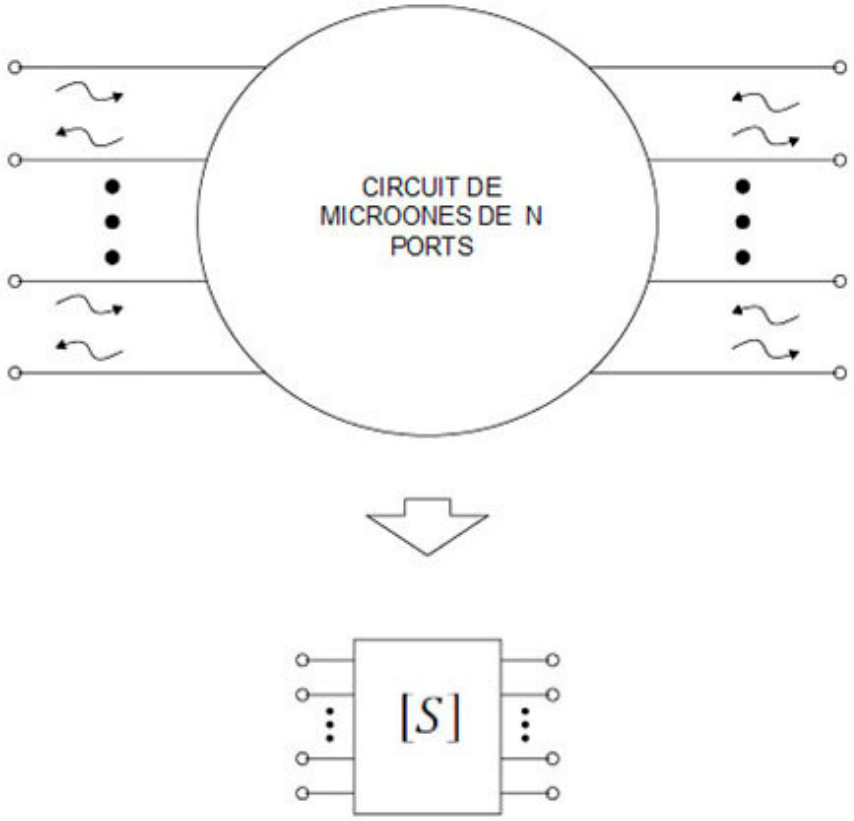


Figura 10: Circuit de microones genèric de N ports

Donat el circuit de microones genèric de N ports com el de la **figura 10.** Definim la matriu de paràmetres S (matriu de dispersió) del circuit com:

b = S · a

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & & & \vdots \\ & & \ddots & & \\ \vdots & & & S_{n-1n-1} & S_{n-1n} \\ S_{n1} & \cdots & & S_{nn-1} & S_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$$

On:

$a_i = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{Z_{o_i}}} \left(V_i + Z_{o_i} \cdot I_i \right)$ ona normalitzada respecte de tensió incident

$b_i = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{Z_{o_i}}} \left(V_i - Z_{o_i} \cdot I_i \right)$ ona normalitzada respecte de tensió reflexada

Y on Z_{o_i} és una impedància arbitraria que correspon a la impedància de referència.

En definitiva els paràmetres S ens informen de les relacions de camins que recorren les ones incidents per arribar a un punt de sortida on, per tant aquestes ones podran sortir pel mateix port per on entren o per qualsevol dels altres ports:

- S_{ii} correspon als paràmetres de reflexió de cada port.
- S_{ij} correspon als paràmetres de transmissió entre els diferents ports.

3.3 Paràmetres de dispersió Modals

El nostre cas d'estudi seria un circuit multimodal de microones de sis (6) ports, on en cada un dels ports d'entrada es propagarà els modes EE, OO i OE (**figura 11**) segons el modelatge físic de la línia three-line-microstrip.

Aquest circuit es podrà caracteritzar completament mitjançant la seva matriu de paràmetres S. Aquesta matriu de paràmetres S relaciona les ones de sortida o de reflexió amb les ones d'entrada o ones incidents.

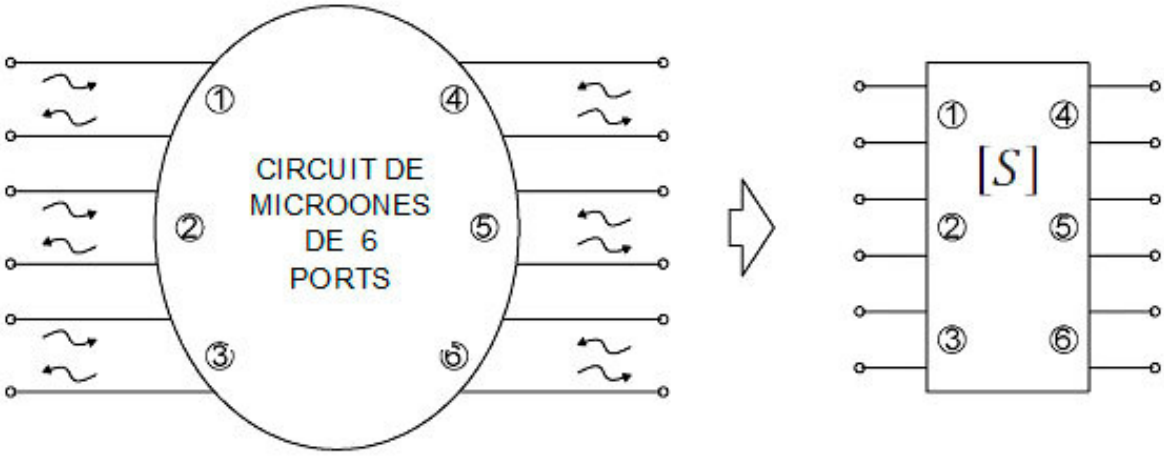


Figura 11: Circuit Multimodal de Microones

Aquesta relació s'efectua de la següent manera:

$$b=S\cdot a$$

On:

$$[b]=\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} \quad y \quad [a]=\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}$$

En el nostre cas ens interessarà el comportament modal del circuit motiu d'estudi, o el que és el mateix, estarem interessats en saber com es propaguen cadascú dels modes i com es relacionen entre ells. Però els paràmetres S no són capaços de proporcionar tota aquesta informació, motiu pel qual necessitarem una configuració alternativa de caracterització del circuit.

Per tant definirem els paràmetres S modals de la següent forma:

$$[b_M] = [S_M] \cdot [a_M]$$

On:

$$[b_M] = \begin{bmatrix} b_{ee_1} \\ b_{oo_1} \\ b_{oe_1} \\ b_{ee_2} \\ b_{oo_2} \\ b_{oe_2} \end{bmatrix} \quad y \quad [a_M] = \begin{bmatrix} a_{ee_1} \\ a_{oo_1} \\ a_{oe_1} \\ a_{ee_2} \\ a_{oo_2} \\ a_{oe_2} \end{bmatrix}$$

Amb aquest circuit el que estem fent es caracteritzar i relacionar els paràmetres S amb les ones d'entrada i de sortida del nostre circuit es a dir relacionen les ones modals d'entrada b_m amb les ones modals de sortida a_m.

Amb aquesta matriu tindrem informació clara de com es propaguen els modes i com es relacionen entre ells en la nostra transició d'estudi, i que ha estat caracteritzada amb la matriu de paràmetres S. Aquesta matriu caracteritza el nostre model circuital equivalent per a la transició d'una impedància en paral·lel entre el segon i el tercer strip de la línia de transmissió three-line-microstrip.

3.4 Propietats de la matriu de paràmetres S

En els circuits de microones expressat com una matriu de paràmetres S té les següents propietats:

- Si el circuit és passiu (no te guany) el mòdul de tots els elements de la matriu S es menor o igual a 1.

- Si la xarxa que descriu la matriu és recíproca (no té elements que funcionen de mode diferent en funció del sentit de propagació), la matriu de paràmetres S és simètrica o lo que és el mateix, la matriu S es igual a la seva matriu transposada.

$$S_{ij} = S_{ji}$$

- Si la xarxa es passiva i sense pèrdues, la seva matriu es unitària i la matriu inversa de S es igual a la matriu transposada.

- Si es un circuit passiu i sense pèrdues la potència d'entrada és igual a la potencia de sortida.

3.5 Càlcul dels paràmetres de dispersió (S). Mètode de càlcul de tensions i corrents

Existeixen diferents mètodes pel càlcul dels paràmetres de dispersió (S). Per la realització del present treball hem utilitzat el mètode de tensions i corrents i caracteritzat per les tensions/corrents dels modes de propagació EE, OO i OE, i basat en el càlcul de la matriu de paràmetres (S) columna per columna. Per cadascuna de les columnes, la metodologia emprada pel càlcul de cadascun dels paràmetres que la formen és la següent [7] [7}:

En primer lloc es calcula el paràmetre de reflexió de la columna, es a dir si estem en la columna dos es calcula el paràmetre (S_{22}) i a partir d'aquest paràmetre de reflexió es calculen tots els paràmetres de transmissió (S_{12}, S_{32}, S_{42} ...)

Aquesta metodologia queda mes clara amb l'explicació de càlcul de la matriu general amb N ports (circuit microones com el de la **(Figura 12).**

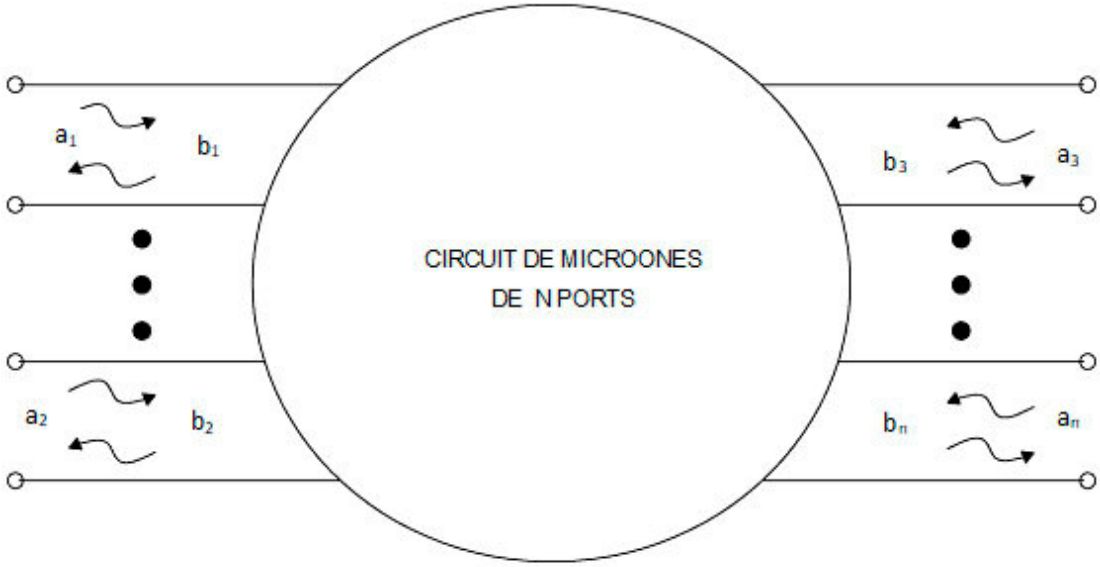


Figura 12: Circuit de microones de N ports

Per fer el càlcul dels elements de la matriu primer farem el càlcul de tots els elements de la diagonal, es a dir tots els paràmetres de reflexió, ja que els necessitarem pel posterior càlcul dels altres paràmetres de la matriu. Els paràmetres de reflexió corresponen als elements S_{ii}.

. Aquest paràmetre S_{ii} ho podem calcular a partir de la següent expressió:

$$S_{ii} = \left.\frac{a_i}{b_i}\right|_{\substack{a_k=0 \\ K\neq j}}$$

Per tant S_{ii} és: $\mathbf{S_{ii}} = \frac{a_i}{b_i}$; quant no existeixen ones incidents en tots els demés ports $a_k = 0,\ \forall k \neq i$. Per realitzar els càlculs hem de carregar tots els ports, excepte el port d'entrada, port i, amb un impedància de referència, en el nostre cas Z_o (Figura 13).

Com hem apuntat els paràmetres S_{ii} corresponen amb l diagonal de la matriu que a la seva vegada són els elements de reflexió de cada port, es a dir aquí obtindrem els elements de reflexió de cadascun dels modes de propagació ee1, ee2, oo1, oo2, oe1, oe2.

Per tant podem calcular el paràmetre de reflexió S_{ii} com:

$$S_{ii} = \left.\frac{b_i}{a_i}\right|_{\substack{a_k=0 \\ K\neq j}} = \frac{Z_{in}-Z_o}{Z_{in}+Z_o}$$

On:

$Z_{IN} = \frac{V_i}{I_i}$ és la impedància d'entrada del port i.

Z_{o_i} és la impedància de referència del port i.

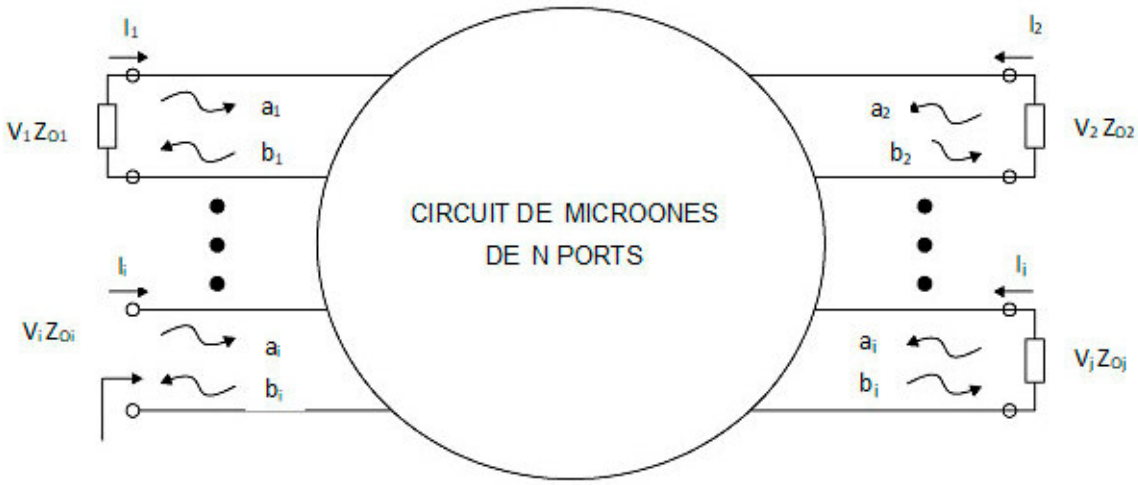


Figura 13: Circuit de microones carregats amb la seva impedància de referència

Una vegada hem calculat tots els paràmetres de reflexió, que ens serviran pel càlcul dels altres paràmetres de la matriu, calcularem tots els paràmetres de transmissió de cada columna.

El mètode que utilitzarem serà el mateix, carregarem tots els ports, excepte el port d'entrada, port i, amb un impedància de referència, en el nostre cas Z_o (**Figura 16**). Per la obtenció de la expressió que ens permeti el càlcul d'aquests paràmetres seguirem els següents passos:

$$S_{ji} = \left.\frac{b_j}{a_i}\right|_{\substack{a_k=0 \\ K\neq i}}$$

De la definició de ones normalitzades sabem que:

$$V_j = \sqrt{Z_{O_j}} * \left(a_j + b_j \right) \xrightarrow{a_j=0} V_j = \sqrt{Z_{O_j}} * b_j \rightarrow b_j = \frac{V_j}{\sqrt{Z_{O_j}}}$$

Per una altra banda sabem que:

$$V_i = \sqrt{Z_{O_i}} * (a_i + b_i)$$

De la definició del paràmetre de reflexió sabem que:

$$b_i = S_{ii} * a_i|_{\substack{a_k=0 \\ k\neq i}}$$

Per conseqüència:

$$V_i = \sqrt{Z_{O_i}} * (a_i + S_{ii} * a_i) \rightarrow a_i = \frac{V_i}{\sqrt{Z_{O_i}}(1 + S_{ii})}$$

El paràmetre $\mathbf{S_{ji}}$ serà com:

$$S_{ji} = \left.\frac{b_j}{a_i}\right|_{-\substack{a_k=0 \\ K\neq i}} = \frac{b_j = \dfrac{V_j}{\sqrt{Z_{O_j}}}}{a_i = \dfrac{V_i}{\sqrt{Z_{O_i}}(1 + S_{ii})}} \rightarrow S_{ji}$$

$$= \frac{V_j}{V_i}\sqrt{\frac{Z_{O_j}}{Z_{O_i}}} * (1 + S_{ii})$$

Si particularitzem l'expressió anterior pel cas on tots els ports tinguin la mateixa impedància de referència $\mathbf{Z_O} = \boldsymbol{Z_{O_i}} = \boldsymbol{Z_{O_j}}$ (utilitzarem al mateixa impedància al llarg de tots els càlculs), l'expressió del paràmetre S_{ij} quedarà de la següent forma:

$$S_{ji} = \frac{V_j}{V_i} * (1 + S_{ii})$$

CAPÍTOL 4:

MODEL CIRCUITAL EQUIVALENT PER A LA TRANSICIÓ D'UNA IMPEDÀNCIES PARAL·LEL AL SEGON I TERCER STRIP

4.1 Introducció

Un poc vist les línies de transmissió microstrip a nivell teòric i més concretament les línies de transmissió three-line-microstrip ens embarcarem en la validació del circuit proposat.

Primer es realitza el càlcul teòric de la transició proposada mitjançant l'anàlisi i càlcul multimodal de transició d'una resistència en paral·lel entre el segon i el tercer strip, un cop s'obtenen els paràmetres S del circuit equivalent tindrem tots els càlculs que utilitzarem posteriorment per la validació del model circuital.

L'objectiu d'aquest capítol es obtenir i deduir a partir dels elements teòrics un model circuital equivalent a la transició proposada i que serà validada mitjançant la comparació dels resultats obtinguts en la simulació del circuit físic.

El mètode utilitzat pel càlcul dels paràmetres modals de la línia three-line-microstrip amb una impedància entre el segon i tercer strip serà el mateix que han utilitzat Sabaté [2] i Rodríguez [5] entre d'altres i que dimana del Mètode de càlcul de paràmetres modals de línies de transmissió acoblades d'N+1 i del Model circuital multimodal generalitzat per a la transformació de magnituds físiques a modals en circuits de línies acoblades i que va ser generalitzada per Ribó [4] [7],[8]. Altres autors com Pajares també han utilitzat aquesta tècnica pel càlcul de línies microstrip [9].

4.2 Transició d'una impedància paral·lela al segon i al tercer strip en una línia de transmissió three-line-microstrip.

La transició d'estudi és la mostrada en la **figura 17**, on es genera una discontinuïtat amb la incorporació d'una impedància en paral·lel entre el segon i el tercer strip. Aquesta impedància té un valor genèric Z_A i que serà utilitzat al llarg del càlcul de les equacions modals i posteriorment en el càlcul i anàlisi del circuit equivalent.

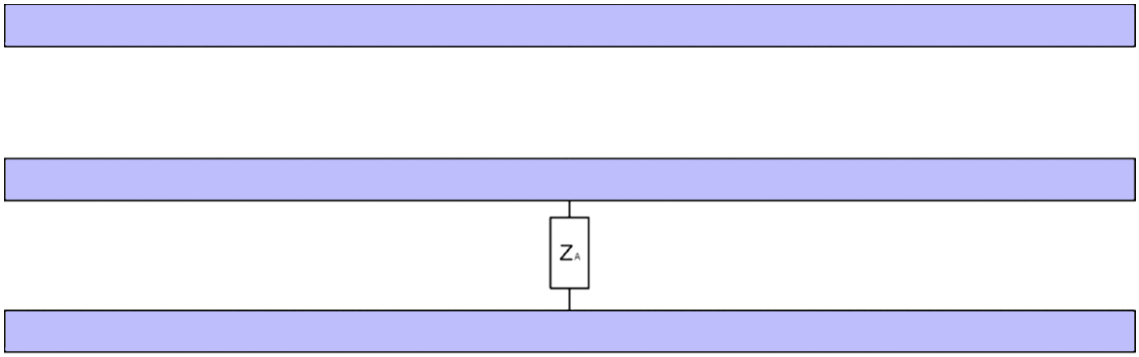


Figura 14: Tram de línia three-line-microstrip amb la transició d'una impedàncies paral·leles entre el segon i el tercer strip

4.3 Anàlisi Multimodal de la transició d'una impedància paral·lela al segon i tercer strip en una línia de transmissió three-line-microstrip.

En el capítol 2.3 es va definir les tensions i corrents modals per una línia de transmissió three-line-microstrip. Es va observar com en el cas general es propagaven de forma simultània tres modes de propagació, mode OO, mode EE i mode OE.

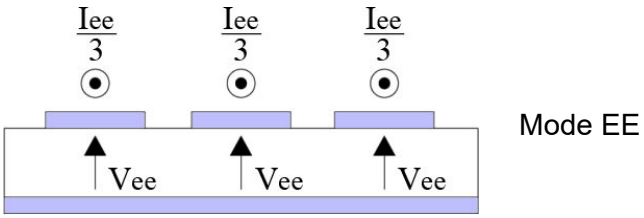


Figura 15: Definició de les tensions i corrents pel mode EE

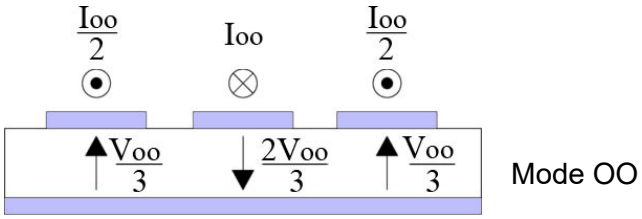


Figura 16: Definició de les tensions i corrents pel mode OO

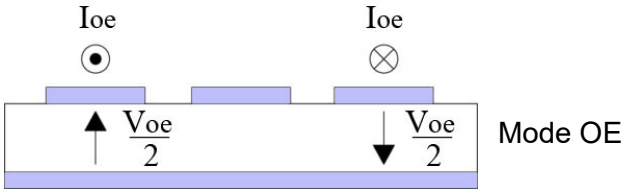


Figura 17: Definició de les tensions i corrents pel mode OE

El propòsit es introduir una asimetria i observar quina interacció causarà entre els diferents modes. En el nostre cas introduirem una impedància en paral·lel entre el segon i el tercer strip, per fer-ho haurem de considerar tots els modes de propagació i observar com es veuen afectats.

En aquest primer moment es realitzarà un anàlisi multimodal, es a dir del tres modes que interactuen en una línia three microstrip, d'on dimanaran una sèrie d'equacions que permetran veure com interaccionen els modes entre si un cop introduïda una asimetria, resistència entre el segon i tercer strip.

En la **figura 9** es va definir el modelatge físic d'una línia de transmissió. En aquest cas s'haurà de definir tres trams, un primer tram de la línia de transmissió abans de l'asimetria, un segon tram que és pròpiament l'asimetria i un tercer tram que és la línia de transmissió després de l'asimetria.

En aquest sentit definim V_{ee_1}, I_{ee_1}, V_{oo_1}, I_{oo_1}, V_{oe_1} y I_{oe_1} com les tensions i corrents dels modes EE, OO i OE del primer tram, així com V_{ee_2}, I_{ee_2}, V_{oo_2}, I_{oo_2}, V_{oe_2} y I_{oe_2} correspondran a les tensions i corrents dels modes EE, OO, OE del tercer tram (**figures 15,16,17**).

Les equacions obtingudes són les següents:

A. Equacions obtingudes a partir de les tensions modals del circuit:

(1) $$V_{ee1} + \frac{V_{oo1}}{3} + \frac{V_{oe1}}{2} = \frac{V_{oe2}}{2} + \frac{V_{oo2}}{3} + V_{ee2}$$

(2) $$V_{ee1} - 2\,\frac{V_{oo1}}{3} = -\frac{2}{3}\,V_{oo2} + V_{ee2}$$

(3) $$V_{ee1} + \frac{V_{oo1}}{3} - \frac{V_{oe1}}{2} = -\frac{V_{oe2}}{2} - \frac{V_{oo2}}{3} + V_{ee2}$$

(1) + (2) + (3): 1 $\boxed{V_{ee1} = V_{ee2}}$

substituïm en 2: 2 $\boxed{V_{oo1} = V_{oo2}}$

substituïm en 3: 3 $\boxed{V_{oe1} = V_{oe2}}$

B. Equacions obtingudes a partir de les corrents modals del circuit:

(1) $\mathrm{I_{oe1}} + \mathrm{I_{oe2}} + \frac{1}{2}(\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}}) + \frac{1}{3}(\mathrm{I_{ee1}} + \mathrm{I_{ee2}}) = 0$

(2) $\mathrm{I_A} = \frac{1}{3}(\mathrm{I_{ee1}} + \mathrm{I_{ee2}}) - (\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}})$

(3) $\mathrm{I_A} = \mathrm{I_{oe1}} + \mathrm{I_{oe2}} - \frac{1}{2}(\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}}) - \frac{1}{3}(\mathrm{I_{ee1}} + \mathrm{I_{ee2}})$

(1) + (2) - (3)

$$\mathrm{I_{oe1}} + \mathrm{I_{oe2}} + \frac{1}{2}(\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}}) + \frac{1}{3}(\mathrm{I_{ee1}} + \mathrm{I_{ee2}}) = 0$$

$$-(\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}}) + \frac{1}{3}(\mathrm{I_{ee1}} + \mathrm{I_{ee2}}) = \mathrm{I_A}$$

$$-\mathrm{I_{oe1}} - \mathrm{I_{oe2}} + \frac{1}{2}(\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}}) + \frac{1}{3}(\mathrm{I_{ee1}} + \mathrm{I_{ee2}}) = -\mathrm{I_A}$$

4 $\boxed{I_{ee1} = -I_{ee2}}$

Substitueixo R.4 en (2)

$$\mathrm{I_A} = \frac{1}{3}(\mathrm{I_{ee1}} - \mathrm{I_{ee1}}) - (\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}})$$

5 $\boxed{I_A = -(\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}})}$

Substitueixo R.4 i R.5 en (3)

$$\mathrm{I_A} = \mathrm{I_{oe1}} + \mathrm{I_{oe2}} - \frac{1}{2}(-\mathrm{I_A}) - \frac{1}{3}(\mathrm{I_{ee1}} - \mathrm{I_{ee1}})$$

6 $\boxed{\frac{1}{2}I_A = -(\mathrm{I_{oe1}} + \mathrm{I_{oe2}})}$

De R.5 = R.6 obtenim

7 $\boxed{\mathrm{I_{oo1}} + \mathrm{I_{oo2}} = -2(\mathrm{I_{oe1}} + \mathrm{I_{oe2}})}$

C. Equació obtinguda a partir de la impedància del circuit:

(1) $V_1 - V_2 = Z_A * I_A$

$$8 \quad \boxed{-V_{oo1} + \frac{1}{2}V_{oe1} = 2 * Z_A \left(\mathrm{I_{oe1}} + \mathrm{I_{oe2}} \right)}$$

A partir de les lleis de Kirchhoff hem obtingut buit (8) equacions que ens determinen la transició. Aquestes equacions han estat obtingudes un poc s'ha analitzat el nostre circuit a partir de les tensions modals, els corrents modals i la impedància Z_A introduïda en el circuit.

De les equacions aconseguides, que ens serviran posteriorment pel càlcul del circuit equivalent, hem obtingut una sèrie de conclusions que mostren que estem davant d'una configuració de circuit realitzada en paral·lel. El fet que les equacions ***1,2,3*** indiquin que les tensions modals siguin iguals abans com després de la transició ho certifica.

També cal ressaltar tal i com es dedueix del resultat de l'equació ***4,*** que en la transició estudiada el mode EE no interacciona amb cap altre mode, es a dir no depèn ni del mode OO ni del mode OE; per tant que qualsevol canvi en el mode EE no afectarà en els modes OO i OE així com que qualsevol canvi en els modes OO i OE no afectarà en el mode EE.

En aquest sentit el mes destacable és que el fet que el mode EE no interaccioni amb els altres modes, fa que a aquest mode no li afecti la variació de la impedància Z_A que utilitzem en el modelatge de la transició.

4.4 Model circuital equivalent per a la transició d'una impedància paral·lela al segon i al tercer strip.

A partir de les buit equacions obtingudes en el punt anterior obtindrem el model circuital multimodal equivalent per a la transició d'una impedància paral·lela als strips, que quedarà completament caracteritzat per la seva matriu de paràmetres S modals de la transició. (figura 18)

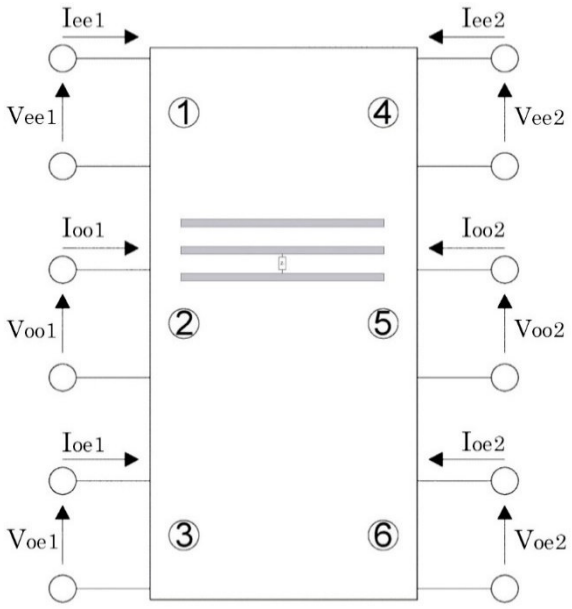


Figura 18: Model multimodal equivalent de la transició three-line-microstrip amb una impedància en paral·lel

Com hem explicat a l'inici del punt Ribó [4] [7] [8] va desenvolupar el mètode de càlcul de paràmetres modals de línies de transmissió acoblades i el model circuital multimodal generalitzat, utilitzat en el modelatge de circuits multimodals i que utilitzarem pel càlcul dels paràmetres S del nostre circuit:

Des del punt de vista modal, la transició de dues impedàncies en paral·lel es pot interpretar com un circuit de sis (6) ports (figura 18) que conté cadascú dels modes relacionats en un port diferent:

- El primer port (1) és el mode EE_1 que correspon al mode EE abans de la transició i que està format per una tensió d'entrada del mode EE (Vee_1) i per un corrent d'entrada del mode EE (Iee_1).

- El segon port (2) és el mode OO_1 que correspon al mode OO abans de la transició i que està format per una tensió d'entrada del mode EE (V_{OO1}) i per un corrent d'entrada del mode EE (Ioo_1).

- El tercer port (3) és el mode OE_1 que correspon al mode OE abans de la transició i que està format per una tensió d'entrada del mode OE (Voe_1) i per un corrent d'entrada del mode OE (Ioe_1).

- El quart port (4) és el mode EE_2 que correspon al mode EE després de la transició i que està format per una tensió d'entrada del mode EE (Vee_2) i per un corrent d'entrada del mode EE (Iee_2).

- El cinquè port (5) és el mode OO_2 que correspon al mode OO després de la transició i que està format per una tensió d'entrada del mode EE (V_{OO2}) i per un corrent d'entrada del mode EE (Ioo_2).

- El sisè port (6) és el mode OE_2 que correspon al mode OE després de la transició i que està format per una tensió d'entrada del mode OE (Voe_2) i per un corrent d'entrada del mode OE (Ioe_2).

En el capítol 3, concretament en el **punt 3.5**, detallàvem el mètode de càlcul de les tensions i corrents d'un circuit mitjançant els paràmetres de dispersió (S), i on pel càlcul dels paràmetres es carregaven tots el ports, excepte el de la ona incident, amb una impedància de referència.

A partir d'aquí calculàvem l'expressió normalitzada, obtenint les expressions següent pel càlcul dels paràmetres de reflexió i transmissió:

- Equació pel càlcul dels paràmetres de transmissió :

$$S_{ii} = \left.\frac{a_i}{b_i}\right|_{\substack{a_k=0 \\ K\neq j}} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$$

$S_{11} = \frac{Z_{in}-Z_o}{Z_{in}+Z_o}$ on $Z_{in} = \frac{V_{ee1}}{I_{ee1}}$ / $Z_o = -\frac{V_{ee2}}{I_{ee2}}$ / $V_{ee1} = V_{ee2}$ / $I_{ee1} = -I_{ee2}$

$$\mathbf{S_{11} = 0}$$

$S_{22} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$ on $Z_{in} = \frac{V_{oo1}}{I_{oo1}}$ / $Z_o = -\frac{V_{oo2}}{I_{oo2}}$ / $V_{oo1} = V_{oo2}$ → $S_{22} = \frac{I_{oo1} + I_{oo2}}{I_{oo1} - I_{oo2}}$

Substituïm les equacions R.7 i R.8 obtenim S_{22} en funció de la Z_O i Z_A

$$\boldsymbol{S_{22} = \frac{-4Z_o}{5Z_o + 8Z_A}}$$

$S_{33} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$ on $Z_{in} = \frac{V_{oe1}}{I_{oe1}}$ / $Z_o = -\frac{V_{oe2}}{I_{oe2}}$ / $V_{oe1} = V_{oe2}$ → $S_{22} = \frac{I_{oe1} + I_{oe2}}{I_{oe1} - I_{oe2}}$

Substituïm les equacions R.7 i R.8 obtenim S_{22} en funció de la Z_O i Z_A

$$\boldsymbol{S_{33} = \frac{-Z_o}{5Z_o + 8Z_A}}$$

$S_{44} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$ on $Z_{in} = \frac{V_{ee2}}{I_{ee2}}$ / $Z_o = -\frac{V_{ee1}}{I_{ee1}}$ / $V_{ee1} = V_{ee2}$ / $I_{ee1} = -I_{ee1}$

$$\boldsymbol{S_{44} = 0}$$

$S_{55} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$ on $Z_{in} = \frac{V_{oo2}}{I_{oo2}}$ / $Z_o = -\frac{V_{oo1}}{I_{oo1}}$ / $V_{oo1} = V_{oo2}$ → $S_{22} = \frac{I_{oo1} + I_{oo2}}{I_{oo1} - I_{oo2}}$

Substituïm les equacions R.7 i R.8 obtenim S_{22} en funció de la Z_O i Z_A

$$\boldsymbol{S_{55} = \frac{-4Z_o}{5Z_o + 8Z_A}}$$

$S_{66} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$ on $Z_{in} = \frac{V_{oe2}}{I_{oe2}}$ / $Z_o = -\frac{V_{oe1}}{I_{oe1}}$ / $V_{oe1} = V_{oe2}$ → $S_{22} = \frac{I_{oe1} + I_{oe2}}{I_{oe1} - I_{oe2}}$

Substituïm les equacions R.7 i R.8 obtenim S_{22} en funció de la Z_O i Z_A

$$S_{66} = \frac{-Z_o}{5Z_o + 8Z_A}$$

Un cop tenim tots els paràmetres de transmissió fem el càlcul dels paràmetres de reflexió utilitzant la següent equació:

$$S_{ji} = \frac{V_j}{V_i} * (1 + S_{ii})$$

En els paràmetres de transmissió $S_{12}, S_{13}, S_{15}, S_{16}, S_{42}, S_{43}, S_{45}, S_{46}$ interacciona el mode EE o amb el mode OO o amb el mode OE i com hem explicat anteriorment, el mode EE no interactua amb altres modes per tant els paràmetres S seran 0.

$$S_{12} = S_{13} = S_{15} = S_{16} = S_{42} = S_{43} = S_{45} = S_{46} = 0$$

$$S_{21} = S_{24} = S_{31} = S_{34} = S_{51} = S_{54} = S_{61} = S_{64} = 0$$

Els paràmetres S_{14}, S_{41} són iguals a 1 ja que $V_{ee1} = V_{ee2}$ / $I_{ee1} = -I_{ee1}$

$$S_{14/41} = \frac{V_{ee1}}{V_{ee2}} * (1 + 0) = 1$$

$$S_{14} = S_{41} = 1$$

Els paràmetres $S_{23}, S_{26}, S_{32}, S_{35}, S_{53}, S_{56}, S_{62}, S_{65}$ també seran iguals ja que interaccionen els modes OO i OE entre si. Sabent que $V_{oe1} = V_{oe2}$ i $V_{oo1} = V_{oo2}$ i utilitzant les equacions R.7 i R.8 podem diferenciar:

$$S_{23,26,53,56} = \frac{V_{oo1}}{V_{oe1}} * \left(1 + \frac{-Z_o}{5Z_o + 8Z_A}\right) = \frac{\mathbf{2Z_o}}{\mathbf{5Z_o + 8Z_A}}$$

$$S_{32,35,62,65} = \frac{V_{oe1}}{V_{oo1}} * \left(1 + \frac{-4Z_o}{5Z_o + 8Z_A}\right) = \frac{\mathbf{2Z_o}}{\mathbf{5Z_o + 8Z_A}}$$

$$\boldsymbol{S_{23} = S_{26} = S_{32} = S_{35} = S_{53} = S_{56} = S_{62} = S_{65} = \frac{2Z_o}{5Z_o + 8Z_A}}$$

Els paràmetres S_{25}, S_{52}, també seran iguals ja que només interacciona el mode OO. Sabent que $V_{oo1} = V_{oo2}$.

$$S_{25,52} = \frac{V_{oo1}}{V_{oo1}} * \left(1 + \frac{-4Z_o}{5Z_o + 8Z_A}\right) = \frac{\mathbf{ZO + 8ZA}}{\mathbf{5Z_o + 8Z_A}}$$

$$\boldsymbol{S_{25} = S_{52} = \frac{ZO + 8ZA}{5Z_o + 8Z_A}}$$

Els paràmetres S_{36}, S_{63} també seran iguals ja que només interacciona el mode OE. Sabent que $V_{oe1} = V_{oe2}$.

$$S_{36,63} = \frac{V_{oe1}}{V_{oe1}} * \left(1 + \frac{-Z_o}{5Z_o + 8Z_A}\right) = \frac{\mathbf{4ZO + 8ZA}}{\mathbf{5Z_o + 8Z_A}}$$

$$\boldsymbol{S_{23} = S_{26} = \frac{4ZO + 8ZA}{5Z_o + 8Z_A}}$$

Finalment obtenim la següent matriu de paràmetres S:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & A/f & B/f & 0 & C/f & B/f \\ 0 & B/f & D/f & 0 & B/f & E/f \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C/f & B/f & 0 & A/f & B/f \\ 0 & B/f & E/f & 0 & B/f & D/f \end{bmatrix}$$

$A = -4Z_O$ $B = 2Z_O$

$C = Z_O + 8Z_A$ $D = -Z_o$

$E = 4Z_O + 8Z_A$ $f = 5Z_O + 8Z_A$

Z_0 :impedància de referència.

Z_A : impedàncies d'estudi del circuit

El model circuital equivalent obtingut té les següents característiques:

- És matemàticament precís

- Durant el càlcul es té en compte els tres modes de propagació, tot i que en aquest cas el mode EE no interacciona amb la resta de modes.

- Separa la contribució de cadascun dels modes per ports diferents:

  - **El port 1** correspon al **mode EE_1** que es propaga amb una constant de propagació β_{ee1} i una impedància característica Z_{0ee1}.

  - **El port 2** correspon al **mode OO_1** que es propaga amb una constant de propagació β_{oo1} i una impedància característica Z_{0oo1}.

  - **El port 3** correspon al **mode OE_1** d'entrada i es propaga amb una constant de propagació β_{oe1} i una impedància característica Z_{0oe1}.

  - **El port 4** correspon al **mode EE_2** d'entrada i es propaga amb una constant de propagació β_{ee2} i una impedància característica Z_{0ee2}.

  - **El port 5** correspon al **mode OO_2** d'entrada i es propaga amb una constant de propagació β_{oo2} i una impedància característica Z_{0oo2}.

  - **El port 6** correspon al **mode OE_2** d'entrada i es propaga amb una constant de propagació β_{oe2} i una impedància característica Z_{0oe2}.

Si analitzem la matriu de paràmetres S per diferents valors de les impedàncies S s'observa que:

- Si $\mathbf{Z_A = \infty}$

Per a $\mathbf{Z_A = \infty}$ no es produeix conversió modal. En el circuit ja partim en la inexistència de conversió modal entre el mode EE i els altres modes, però en aquest cas no hi ha conversió modal entre els modes OO i OE que són els paràmetres $\mathbf{S_{23}=0}$, $\mathbf{S_{32}=0}$, $\mathbf{S_{26}=0}$, $\mathbf{S_{62}=0}$, $\mathbf{S_{35}=0}$, $\mathbf{S_{53}=0}$, $\mathbf{S_{56}=0}$, $\mathbf{S_{65}=0}$).

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Si $\mathbf{Z_A \neq \infty}$

Per a Z_A diferent que infinit es produeix conversió modal. S'observa canvi d'energia entre els modes OO i OE (com hem comentat al llarg del punt el mode EE no interactua amb els altres modes). Serveixi d'exemple el valor de $\mathbf{Z_A}$ =0.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -4/5 & 2/5 & 0 & 1/5 & 2/5 \\ 0 & 2/5 & -1/5 & 0 & 2/5 & 4/5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/5 & 2/5 & 0 & -4/5 & 2/5 \\ 0 & 2/5 & 4/5 & 0 & 2/5 & -1/5 \end{bmatrix}$$

El model circuital que hem obtingut té en consideració el tres modes de la línia three-line-microstrip i un cop tenim els diferents valors de la matriu de paràmetres S obtenim el valor de l'intercanvi d'energia entre els diferents modes de forma independent. Com a resultat més destacable cal dir que per una impedància infinita no es produeix cap intercanvi d'energia entre els diferents mode

4.5 Validació del model circuital per a la transició d'una impedància paral·lela al segon i tercer strip en una línia de transmissió three-line-microstrip.

La validació la realitzaré comparant els resultats obtinguts d'una simulació realitzada en un simulador electromagnètic (MOMENTUM) i els resultats obtinguts d'una simulació realitzada en un simulador circuital. Si ambos resultats coincideixen el model quedarà completament validat.

Per tant en aquest punt es realitzarà la validació del model circuital multimodal, deduït en l'anterior punt a partir del resultat de les equacions de tensions i corrents modals, de la transició d'una impedàncies paral·leles al segon i tercer strip en una línia de transmissió three-line-microstrip.

Per poder validar el nostre circuit primer s'ha implementat, després s'ha calculat i finalment s'ha simulat mitjançant un simulador electromagnètic. A més s'ha validat amb dos circuits diferents com els de la **figura 19 (a) i (b).**

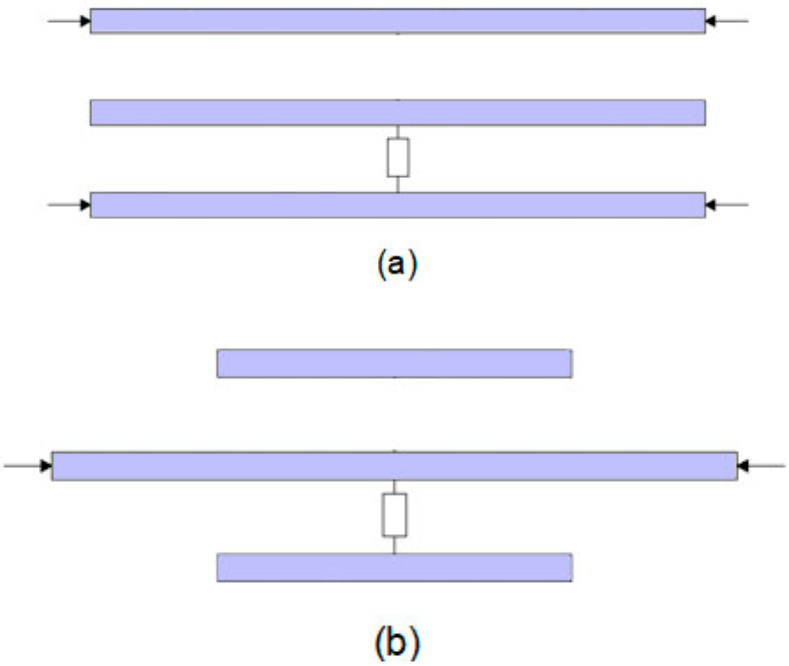


Figura 19: (a) Línia three-line-microstrip amb la transició d'una impedàncies paral·leles al segon i tercer strip; (b) Línia microstrip amb transició a three-line-microstrip i transició d'una impedància paral·lela als strips

Les dos figures anteriors són els circuits que utilitzarem fer validar el model circuital equivalent. En un primer circuit realitzarem la implementació simulació i validació d'una línia de transmissió three-line-microstrip amb la nostra transició, en aquest circuit s'excitarà el mode OE de la línia de transmissió. Posteriorment realitzarem una segona validació amb un circuit diferent, en aquest cas afegirem una línia de transmissió microstrip al primer circuit.

Per tal de simular el nostre circuit excitarem els modes de propagació tant en la simulació electromagnètica com en la circuital i observar el resultat. Si el resultat en diferents mesures de transmissió del circuit són iguals el circuit quedarà validat.[5],[8].

En el nostre cas n'excitarem el mode OE. Cal apuntar que quan es va realitzar el càlcul dels paràmetres S, que van generar el nostre circuit multimodal, es va observar que el mode EE no interaccionava amb els modes, mode OO i mode OE. Per tant es més coherent es excitar un dels modes que interaccionen entre ells i d'on veurem el resultat d'introduir una asimetria en el nostre circuit.

Primer de tot realitzarem la simulació del model electromagnètic mitjançant el simulador MOMENTUM del programa ADS, un cop tinguem els resultats els compararem amb els obtinguts el la simulació circuital.

El circuit utilitzat per la simulació electromagnètica del mode OE té les següents característiques:

- Constant dielèctrica ε_r = 2.6.
- Alçada h= 1,6mm.
- Gruix de metal·lització de coure de 35µm. (**h'** =35 µm).

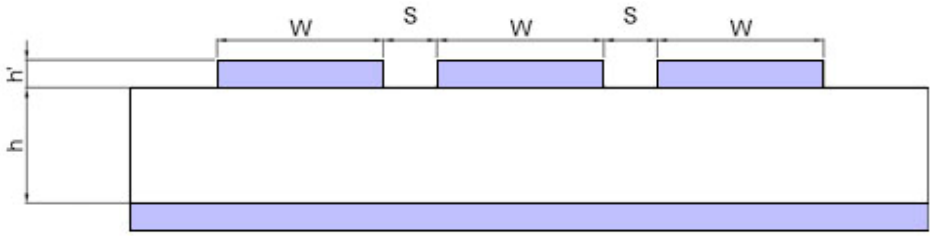


Figura 20: Dimensions físiques de la línia en perfil

- Dimensió de la línia d = 54 mm (d_1=27mm, d_2=27mm).
- Amplada dels strips W=1.4 mm, separats per 2mm.
- El gruix del gap que posem entre el segon i tercer strip es de d_2= 2mm.

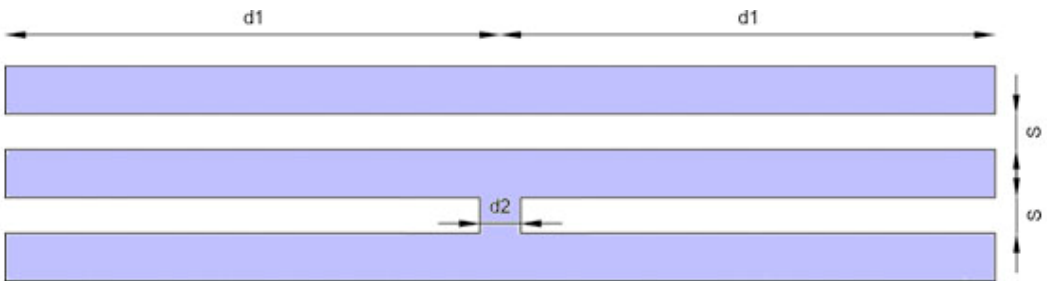


Figura 21: Dimensions físiques de la línia en planta

Com observem en la **figura 21**, hem posat un gap de 2mm entre el segon i el tercer strip. Aquesta asimetria en el nostre circuit electromagnètic correspon amb una impedància de valor 0. Per tant estarem analitzant el cas particular de Z_A= 0 del model circuital equivalent.

Aquests valors de la impedància farà que s'excitin els modes OO i OE ja que com s'ha comentat anteriorment l'estructura del circuit fa que el mode EE no interaccioni amb els altres dos modes. Això farà que el circuit proposat ens permeti validar el model del circuit de la transició en el cas mes general.

A cada costat de la línia de transmissió three-line-microstrip es col·loquen dos ports; Al principi de la línia es col·loquen els ports (P1 i P2), concretament en el primer i tercer strip; i al final de la línia es col·loquen els altres ports (P3 i P4), concretament en el primer i tercer strip amb l'objectiu de mesurar els paràmetres de transmissió (S_{11}, S_{22}, ..) i de reflexió (S_{12}, S_{21}, ..) del circuit.

La col·locació dels ports té una peculiaritat ja que si s'observa la figura 22, veiem com en el port 1 la intensitat I_{oe1} entra mentre que en el port 3 la intensitat I_{oe1} surt, això ho representarem en el circuit fent que els ports estiguin en mode diferencial, fent que el port 1 tingui polaritat normal i el port 3 reverse (associada amb el port 1).

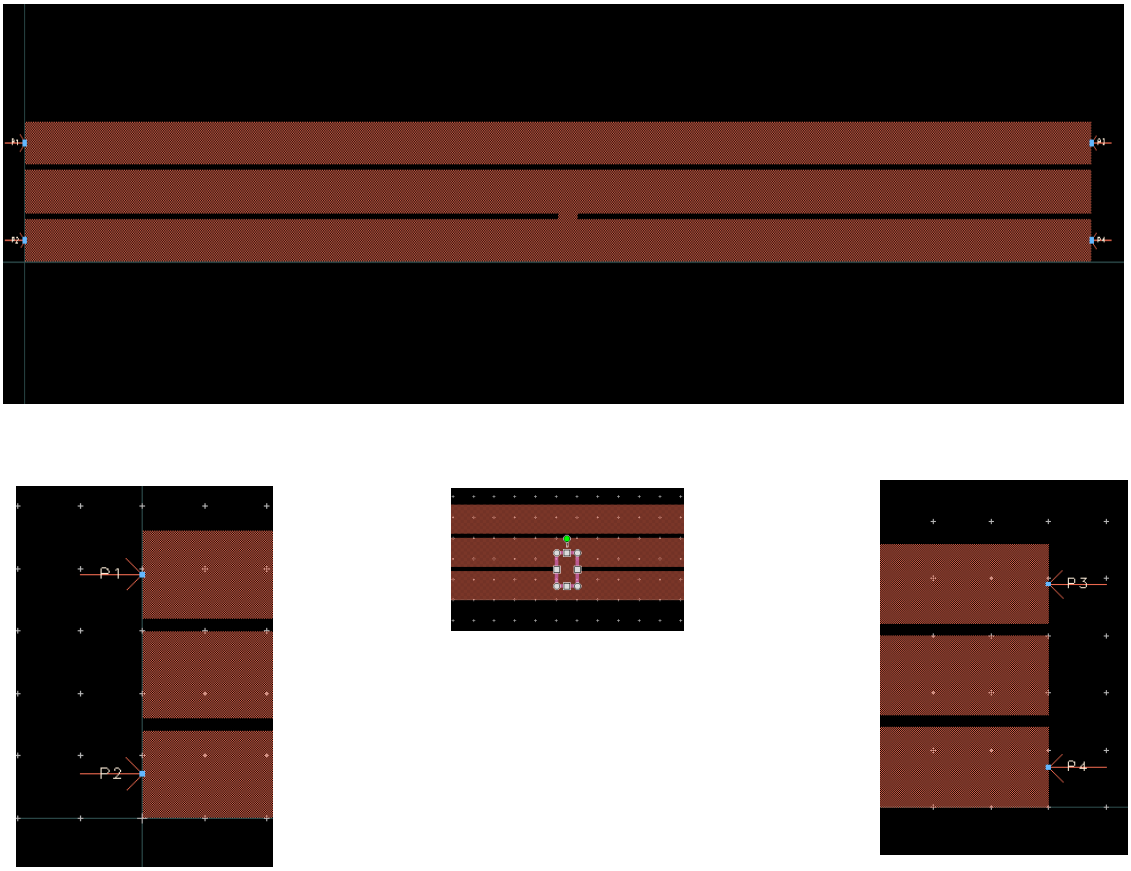


Figura 22: Línia three-microstrip amb impedància zero entre segon i tercer strip

Un cop realitzada la simulació electromagnètica realitzarem la simulació del circuit que permetrà validar el model circuital equivalent, aquesta simulació es realitzarà mitjançant el simulador circuital ADS. Seguint un procediment que detallem a continuació:

La implementació del circuit es realitza separant les tres línies de transmissió com tres línies de transmissió independents; on cadascuna d'elles té la seva impedància característica i la seva constant de propagació. Com hem comentat anteriorment només excitarem el mode de propagació OE i observarem els resultats obtinguts.

Cadascuna de les línies de transmissió propagarà un mode: mode EE, mode OO, mode OE. Per modelar cadascuna de les línies de transmissió es farà mitjançant una matriu de paràmetres S de dos ports tal com:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\gamma l} \\ e^{-\gamma l} & 0 \end{bmatrix}$$

On:

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta$$

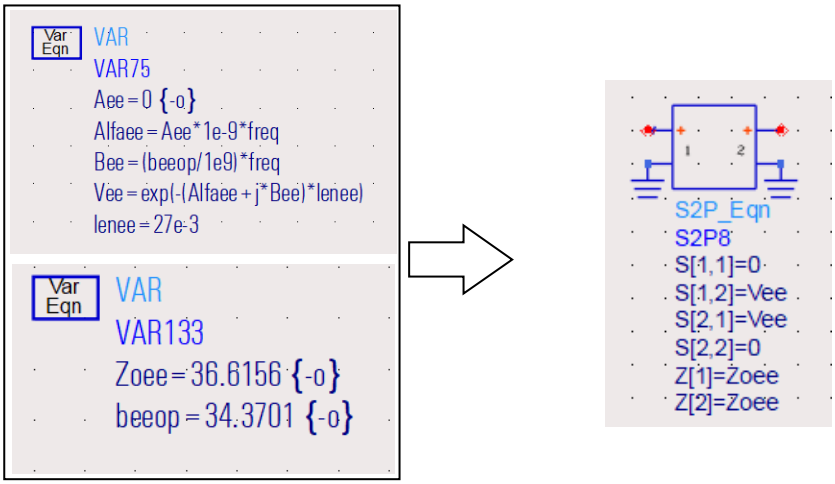
α és la atenuació de la línia de transmissió

β és la constant de propagació de la línia de transmissió

l es la longitud de la línia de transmissió (27mm). Longitud de la línia fins a la transició i la longitud després de la transicció.

Considero que les pèrdues de propagació són A_{ee}, A_{oo}, A_{oe} = 0

Els valors de la impedància característica i el de la constant de propagació i depenen de les dimensions de la línia de transmissió, de l'amplada dels strips, de la separació entre els strips, de l'alçada del sostrat.



MODE EE

Figura 23: Paràmetres i model circuital pel mode EE en la línia three-line-microstrip

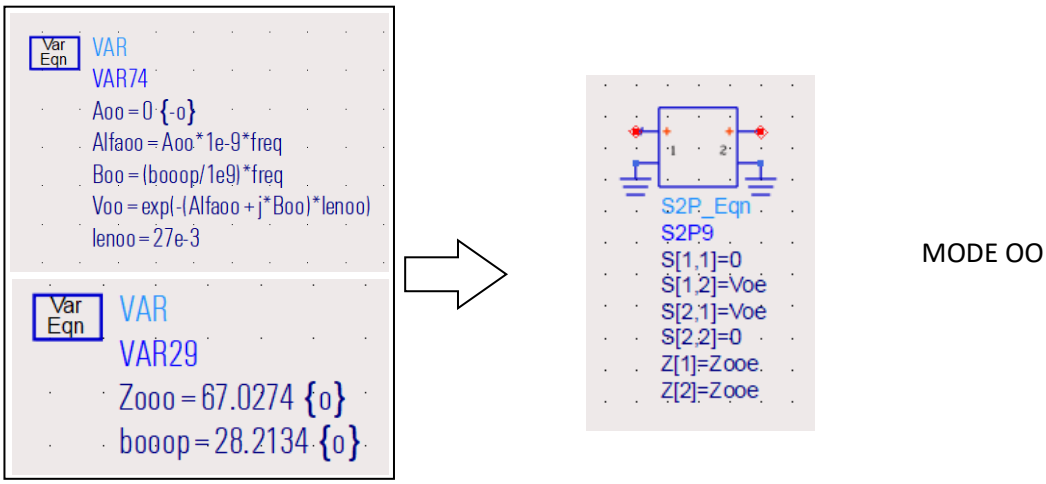


Figura 24: Paràmetres i model circuital pel mode OO en la línia three-line-microstrip

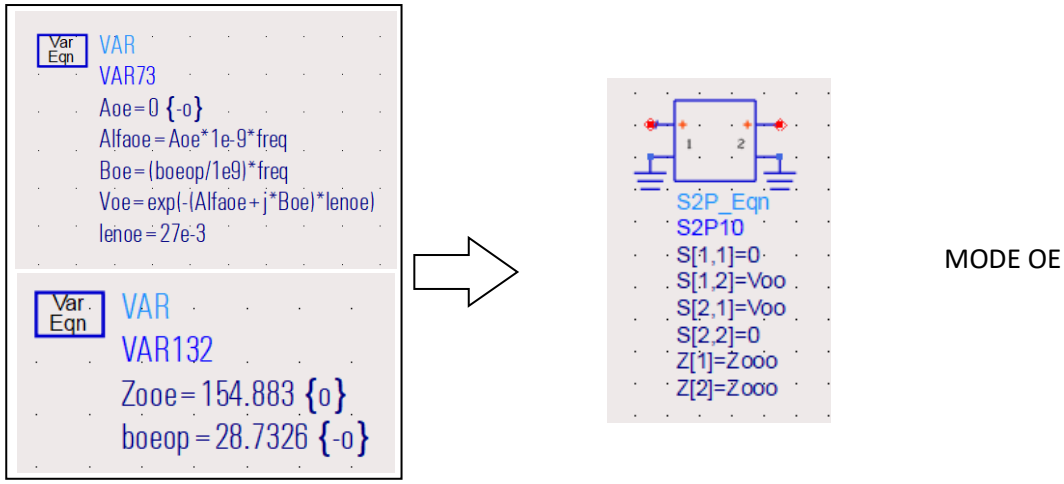


Figura 25: Paràmetres i model circuital pel mode OO en la línia three-line-microstrip

La representació de la transició es realitza mitjançant una matriu de paràmetres S de sis ports. On en els ports 1, 2 i 3 es situen els models EE,OO i OE d'entrada respectivament i en els ports 4, 5 i 6 els modes EE,OO i OE de sortida respectivament. Els paràmetres S d'aquesta matriu, són els paràmetres S calculats en el **apartat 4.3** i on substituirem el valor de Za =0 i Zo=50 en la citada matriu.

La matriu de paràmetres S modals queden de la següent forma:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -4/5 & 2/5 & 0 & 1/5 & 2/5 \\ 0 & 2/5 & -1/5 & 0 & 2/5 & 4/5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/5 & 2/5 & 0 & -4/5 & 2/5 \\ 0 & 2/5 & 4/5 & 0 & 2/5 & -1/5 \end{bmatrix}$$

De la matriu de paràmetres S modals observem com es produeix intercanvi d'energia entre els modes OO i OE ja que com es va explicar en el capítol anterior el mode EE no interaccionava amb els altres dos modes de transmissió. En aquest sentit observem com el mode EE d'entrada i sortida és S41 = 1 i S14= 1 amb independència del valor de la resistència Za; per tant la presència de GAP (resistència) no comportar cap canvi en el intercanvi d'energia del model EE ni cap interacció amb els altres modes.

El mode OO si que es veu molt afectat per la presència del GAP ja que pràcticament es reflecteix tot (S_{22}= -4/5) passant molt poc cap a la sortida (S_{52} =1/5). Mentre que el mode OE no es veu molt afectat per la presència del GAP ja que té un paràmetre de reflexió molt baix (S_{33} = -1/5) passant gairebé tot cap a la sortida, es a dir té el paràmetre de transmissió alt (S_{36} = 4/5).

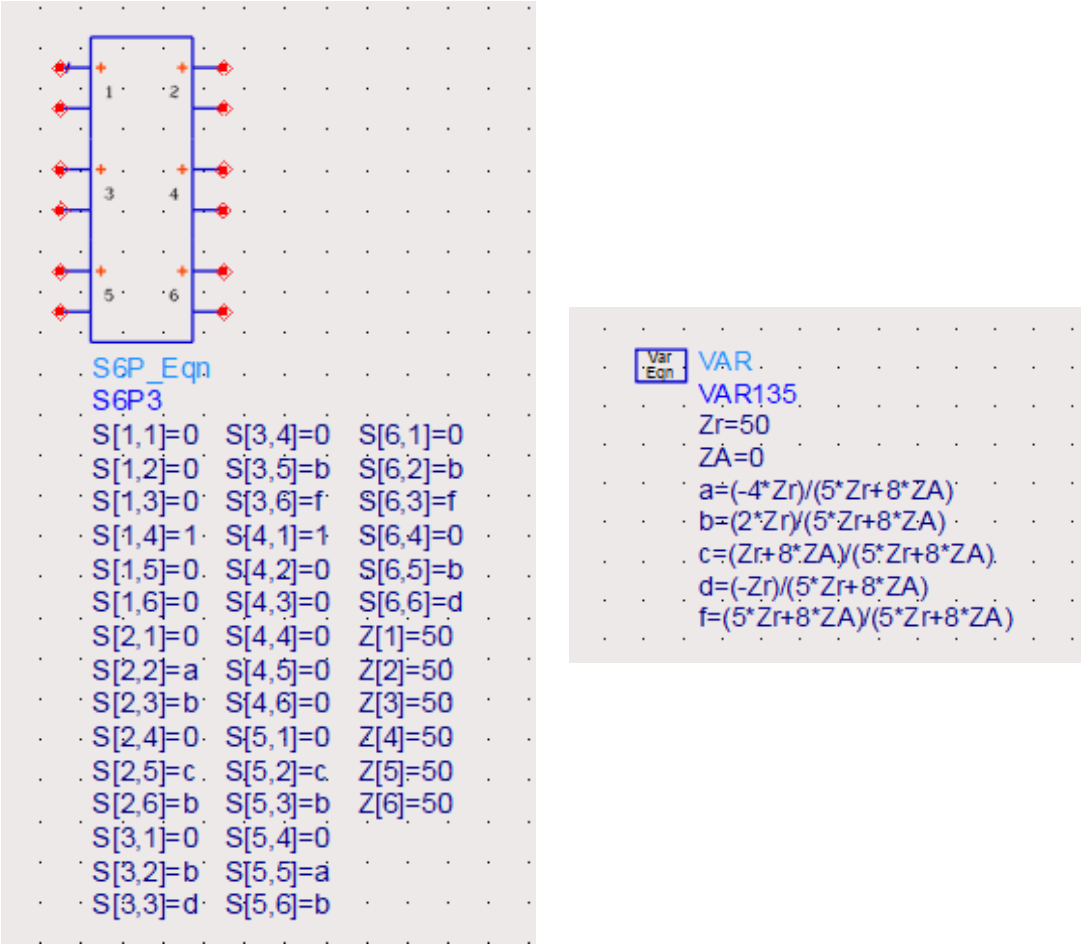


Figura 26: Model circuital de la transició amb el simulador ADS.

I circuit de simulació amb el model circuital equivalent:

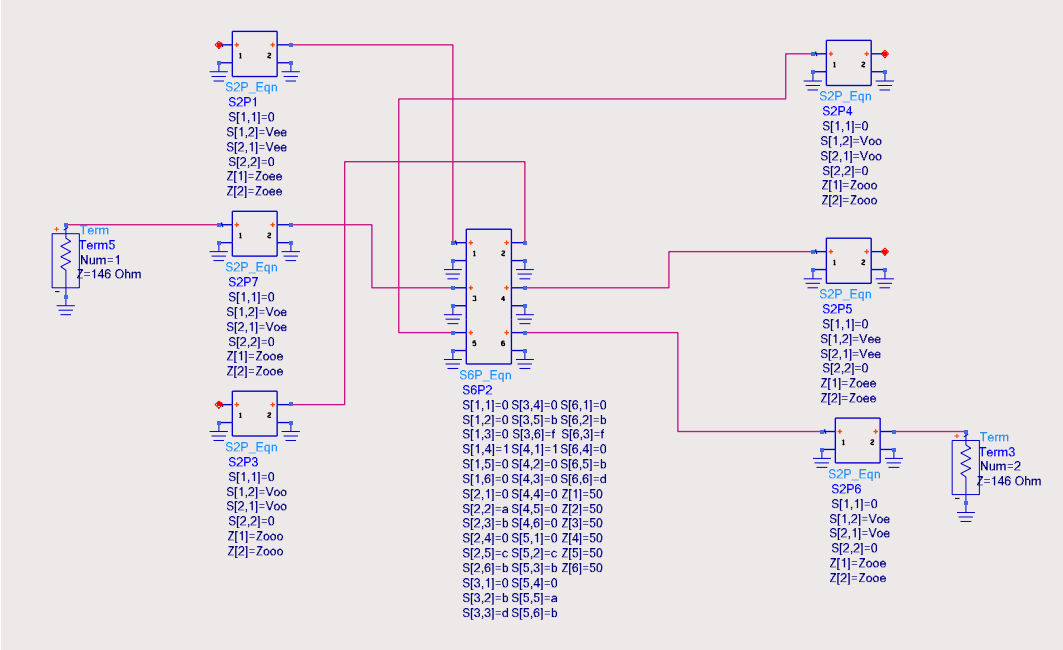


Figura 27: Model circuital de la transició amb el simulador ADS.

El circuit de simulació equivalent (de simulació electromagnètica MOMENTUM):

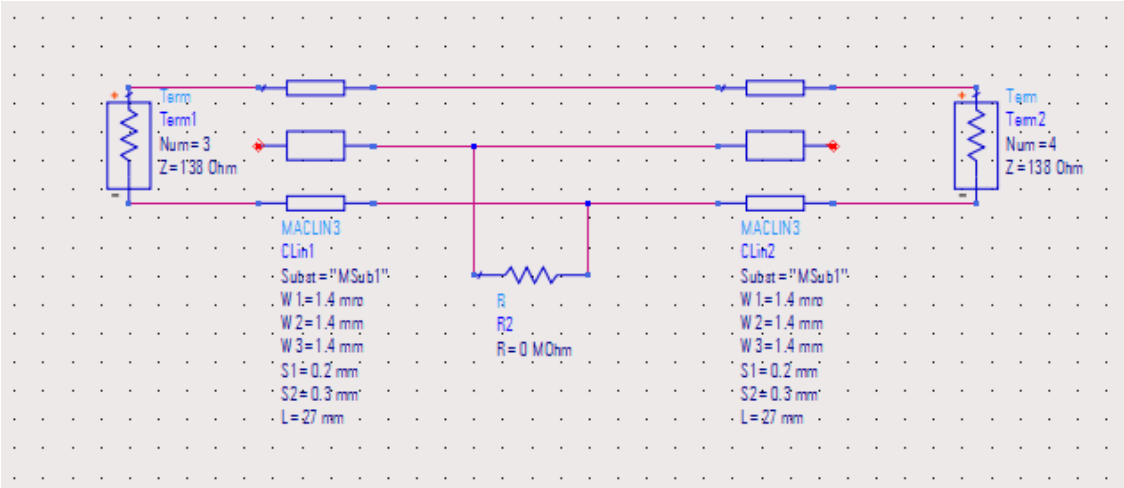


Figura 28: Model circuital de la transició amb el simulador ADS.

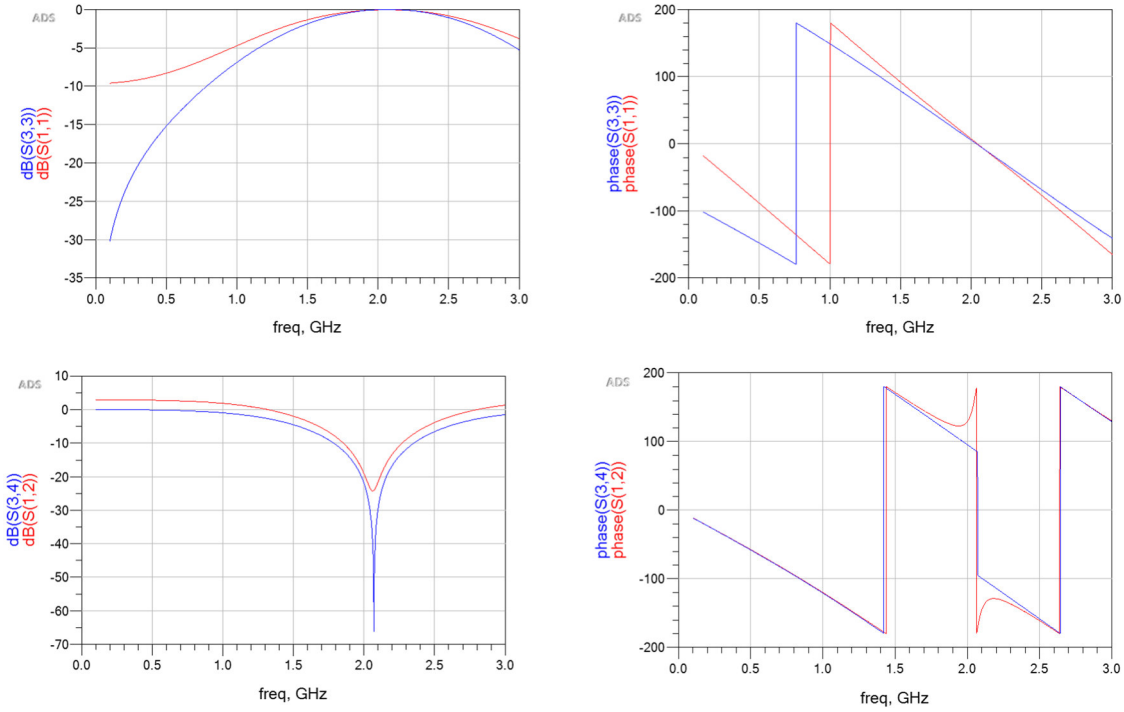


Figura 29: Paràmetres S_{11} i S_{12}.

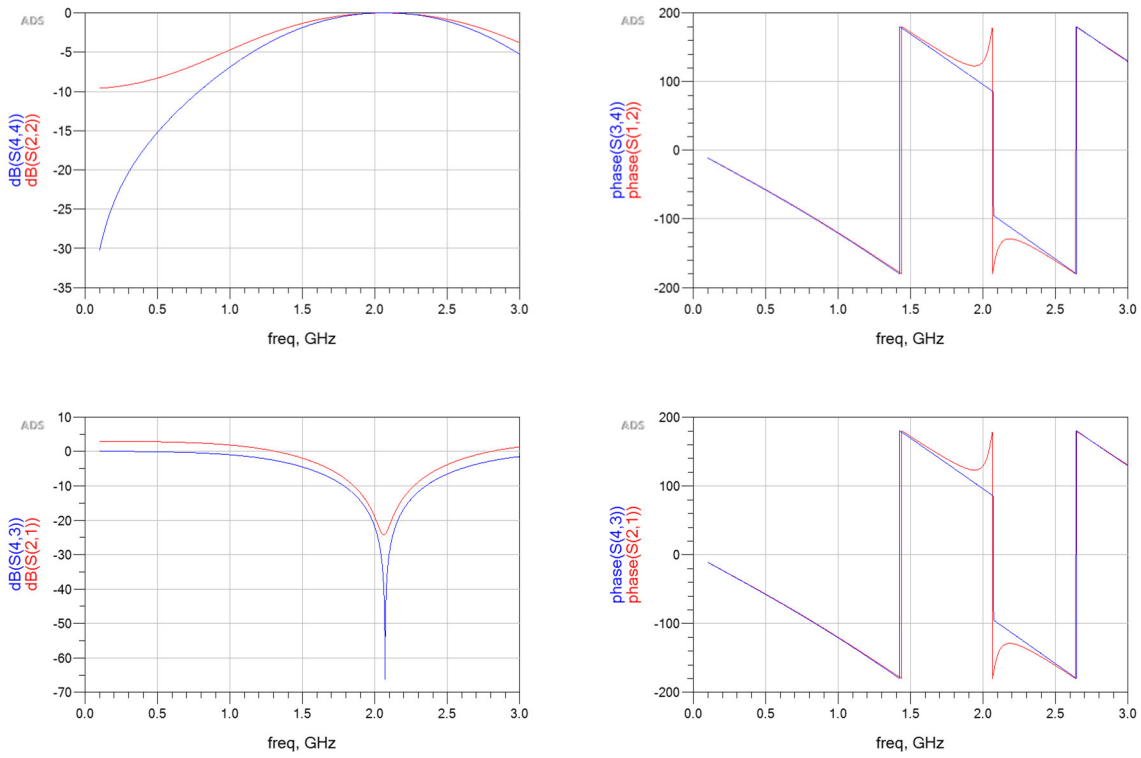


Figura 30: Paràmetres S22 i S21.

La **figura 29** mostra els resultats obtinguts al realitzar la simulació amb el MOMENTUM (línia de color blau) i de la simulació circuital utilitzant el model proposat (línia de color vermell) tant del mòdul i de la fase dels paràmetres de reflexió (S_{11}) i de transmissió (S_{12}), mentre que la **figura 30** mostra els resultats obtinguts tant del mòdul i de la fase dels paràmetres de reflexió (S_{22}) i de transmissió (S_{21}) . Els bons resultats obtinguts entre ambdós gràfiques interposades validen el model circuital.

Per veure la robustesa del nostre circuit hem dissenyat i simulat un segon circuit, igual que en la primera simulació es realitzarà amb el mateix procediment que l'anterior i que consistia en comparar els resultats obtinguts d'una simulació realitzada en un simulador electromagnètic i els resultats obtinguts d'una simulació realitzada en un simulador circuital utilitzant un circuit amb el nostre model circuital equivalent.

Per tal de simular el nostre circuit excitarem els modes de propagació tant en la simulació electromagnètica com en la circuital i observar el resultat. Si el resultat en diferents mesures de transmissió del circuit són iguals el circuit quedarà validat.[5],[8].

Aquest segon circuit incorpora una segona transició. Aquesta segona transició ja va ser estudia i els resultats validats per Rodríguez en la seva tesis doctoral [5] i per tant poden ser utilitzats de forma correcta. En aquest circuit només s'afegirà aquesta nova transició ja que l'estudiada en aquest TFG no patirà cap modificació, això no vol dir que els resultats siguin al mateixos, ja que el fet d'incidir una nova transició modifica el circuit.

Primer de tot realitzarem la simulació del model electromagnètic mitjançant el simulador MOMENTUM del programa ADS, un cop tinguem els resultats els compararem amb els obtinguts el la simulació circuital.

El circuit utilitzat per la simulació electromagnètica tindrà les mateixes característiques, únicament s'afegirà la part de la línia microstrip.

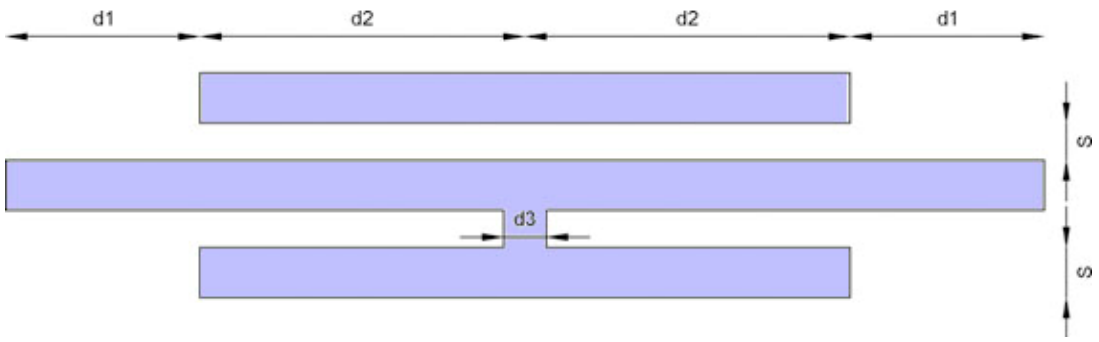


Figura 31: Dimensions físiques de la línia en planta

- Constant dielèctrica ε_r = 2.6.
- Alçada h= 1,6mm.
- Gruix de metal·lització de coure de 35µm. (**h'** =35 µm).
- Dimensió de la línia d = 74 mm (d_1=20mm, d_2=27mm).
- Amplada dels strips W=1.4 mm, separats per 2mm.
- El gruix del gap que posem entre el segon i tercer strip es de $d_{2=}$ 2mm.

Podem observar com hem deixat igual la part de la línia three-microstrip amb el gap de 2mm entre el segon i el tercer strip i que corresponia amb una impedància de valor 0 i el cas particular de Z_A= 0 del model circuital equivalent.

En aquest cas els ports es col·loquen en la linier microstrip; Al principi de la línia es col·loca el port (P1) i al final de la línia es col·loca el port (P2) i amb l'objectiu de mesurar els paràmetres de transmissió ($S_{11.}$ S_{22}, ..) i de reflexió ($S_{12,}$ $S_{21,}$ ..) del circuit.

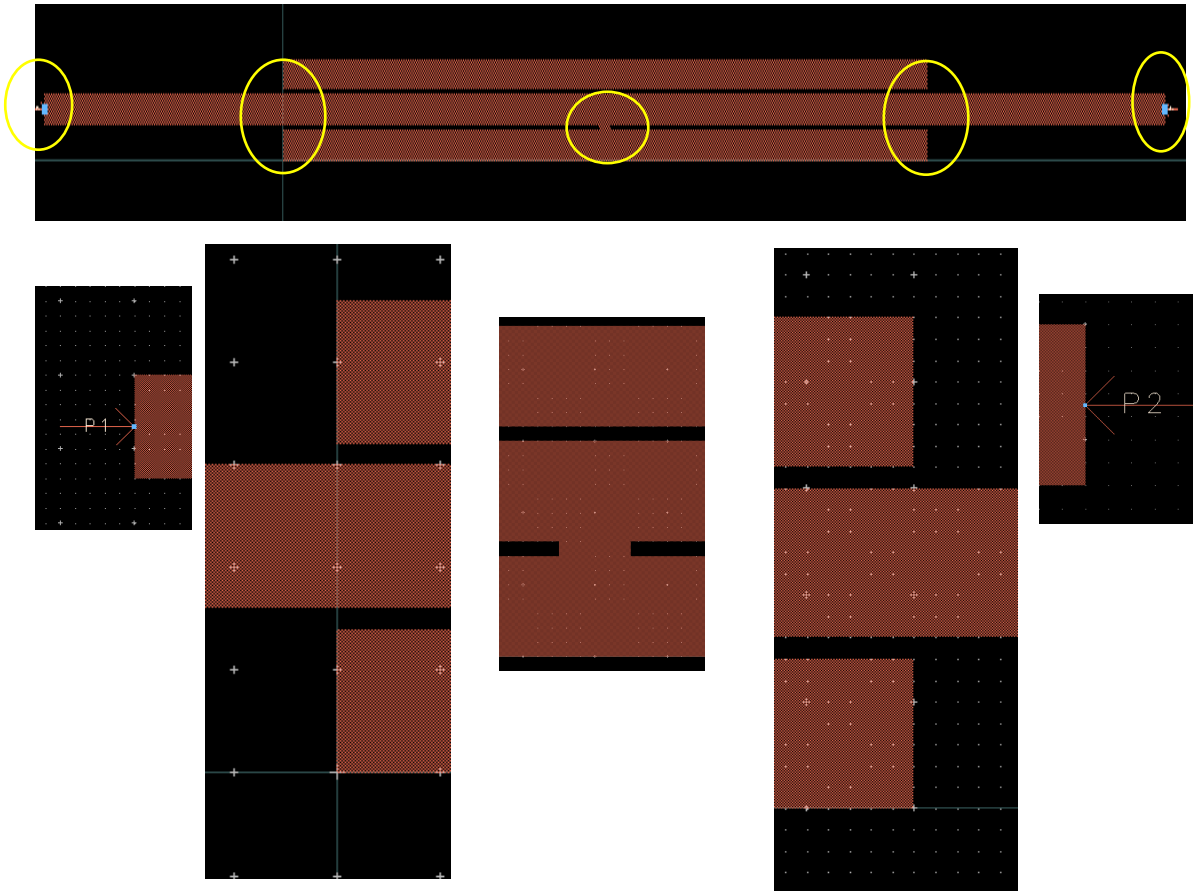


Figura 32: Línia d'estudi amb impedància zero entre segon i tercer strip

Igual que hem anteriorment ara la simulació del circuit que permetrà validar el model circuital equivalent, aquesta simulació es realitzarà mitjançant el simulador circuital ADS. Seguint un procediment que detallem a continuació:

La implementació del circuit serà diferent, primer es realitzarà la implantació de la línia microstrip, posteriorment la transició microstrip a three-line-microstrip [5] i posteriorment la nostra línia three-microstrip amb la nostra transició. Seguint la línia tornarem a implementa la transició three-line microstrip a microstrip.

El modelatge tant de la línia microstrip como de cadascun dels modes de la línia three-microstrip es farà mitjançant una matriu de paràmetres S de dos ports tal com:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\gamma l} \\ e^{-\gamma l} & 0 \end{bmatrix}$$

On:

$\gamma = \alpha + j \cdot \beta$

$\boldsymbol{\alpha}$ és la atenuació de la línia de transmissió

$\boldsymbol{\beta}$ és la constant de propagació de la línia de transmissió

$\boldsymbol{l}$ es la longitud de la línia de transmissió:

- De 27mm. Longitud de tram de línia three-microstrip, entre les dues transicions.
- De 20mm. Longitud de tram de línia microstrip.

Considero que les pèrdues de propagació són $\mathbf{A_{ee}}$, $\mathbf{A_{oo}}$, A_{oe}, $A_{Mstrip} = 0$

Els valors de la impedància característica i el de la constant de propagació i depenen de les dimensions de la línia de transmissió, de l'amplada dels strips, de la separació entre els strips, de l'alçada del sostrat.

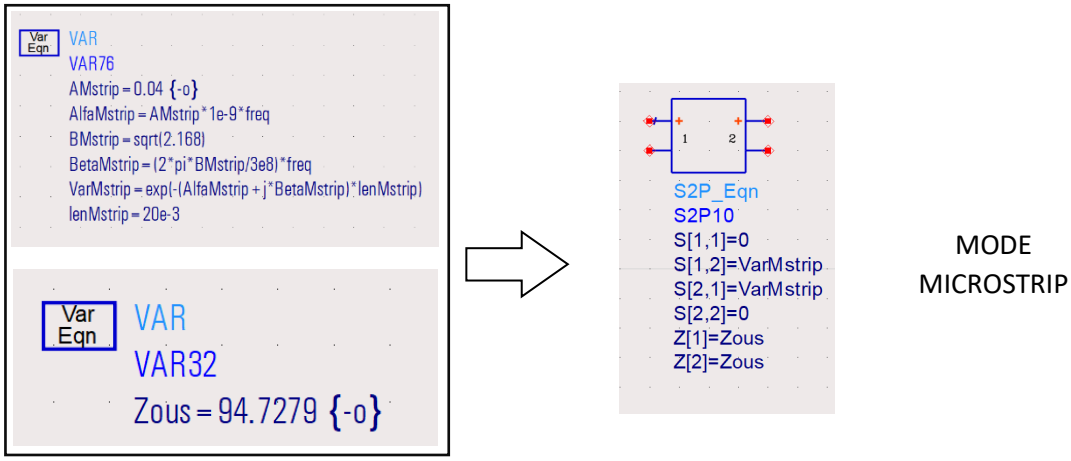


Figura 33: Paràmetres i model circuital pel mode Microstrip

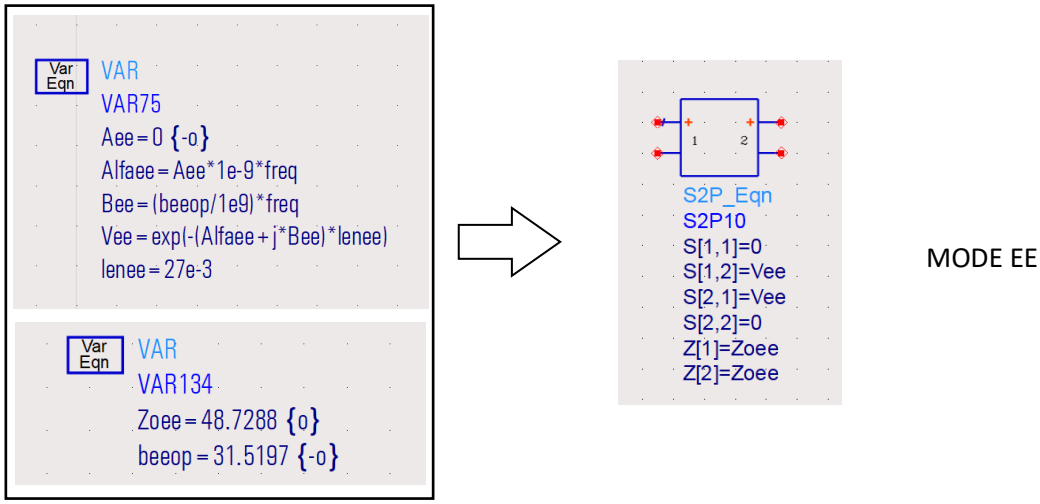


Figura 34: Paràmetres i model circuital mode EE en la part de línia three-microstrip

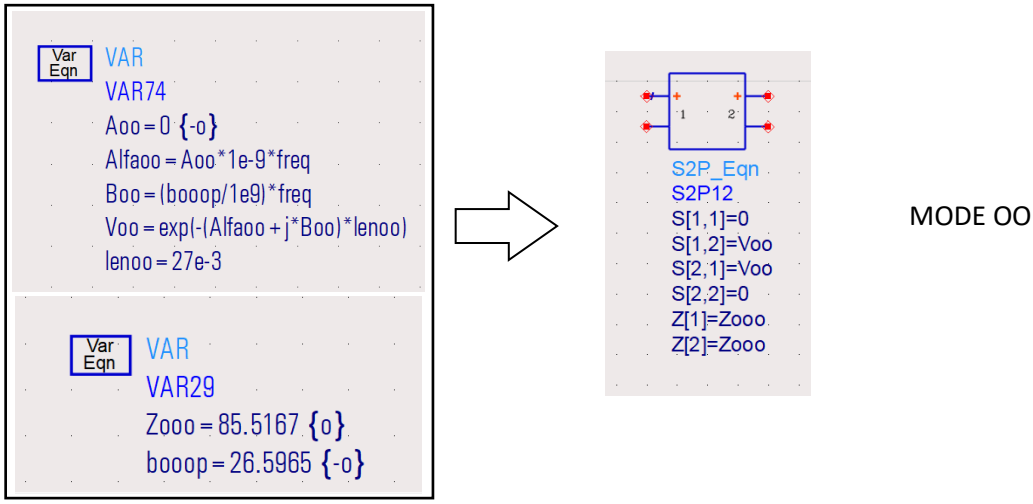


Figura 35: Paràmetres i model circuital mode OO en la part de línia three-microstrip

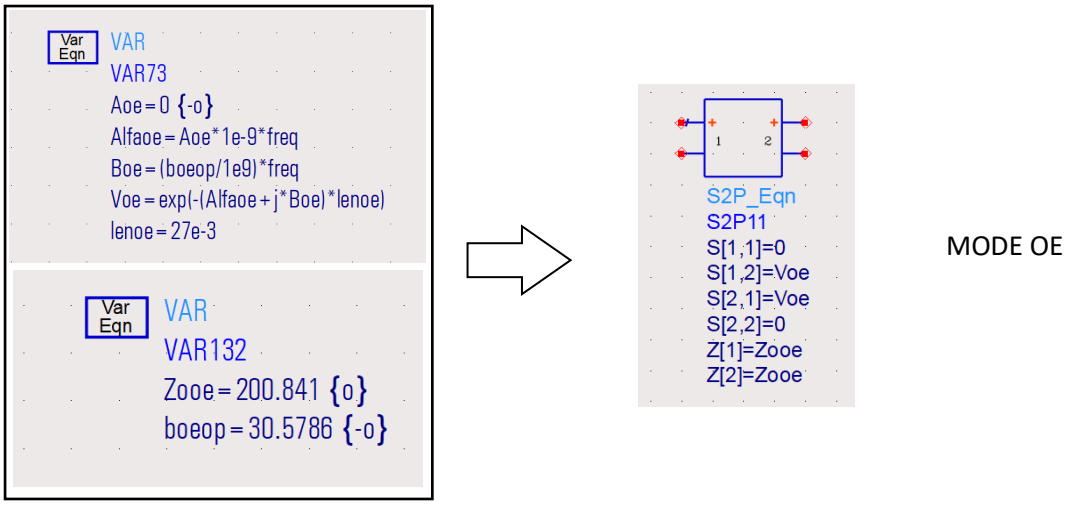


Figura 36: Paràmetres i model circuital mode OO en la part de línia three-microstrip

Les matrius de les dues transicions es realitzen amb una matriu de paràmetres S de sis ports. La matriu primera matriu que correspon a la transició de microstrip a three-microstrip tindrà un port d'entrada (microstrip) i tres ports de sortida, els corresponents als modes EE,OO i OE. Els paràmetres d'aquesta matriu ja van ser calculats [5]. La segona matriu correspon a la transició d'una línia three-microstrip amb una impedància entre els strips; el paràmetres van ser calculats en l'**apartat 4.3**, tornem a substituir el valor de Za =0 i Zo=50 en la matriu.

Les matriu de paràmetres S modals queden de la següent forma:

$$\begin{bmatrix} -1/30 & 7/30 & 9/30 & 15/30 & 12/30 & 20/30 \\ 7/30 & 1/30 & 7/30 & 15/30 & -24/12 & 0 \\ 9/30 & 7/30 & -1/30 & 15/30 & 12/30 & -20/30 \\ 15/30 & 15/30 & 15/30 & -15/30 & 0 & 0 \\ 12/30 & -24/30 & 12/30 & 0 & 6/30 & 0 \\ 20/30 & 0 & -20/30 & 0 & 0 & 10/30 \end{bmatrix}$$

Figura 37: Matriu de paràmetres S de la transició microstrip

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -4/5 & 2/5 & 0 & 1/5 & 2/5 \\ 0 & 2/5 & -1/5 & 0 & 2/5 & 4/5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/5 & 2/5 & 0 & -4/5 & 2/5 \\ 0 & 2/5 & 4/5 & 0 & 2/5 & -1/5 \end{bmatrix}$$

Figura 38: Matriu paràmetres S d'una transició impedància en línia three-microstrip

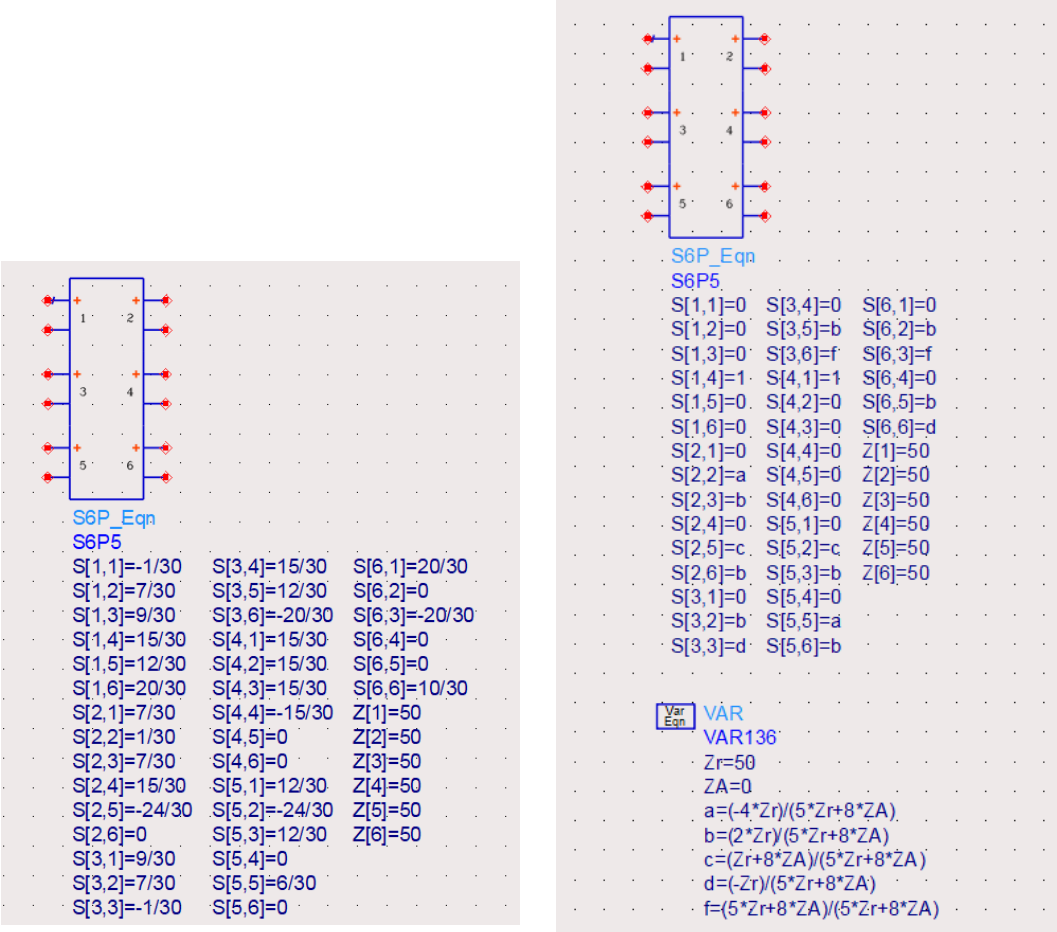


Figura 39: Model circuital de la transició microstrip i de la resistència en la línia three-microstrip amb el simulador ADS.

I circuit de simulació amb el model circuital equivalent:

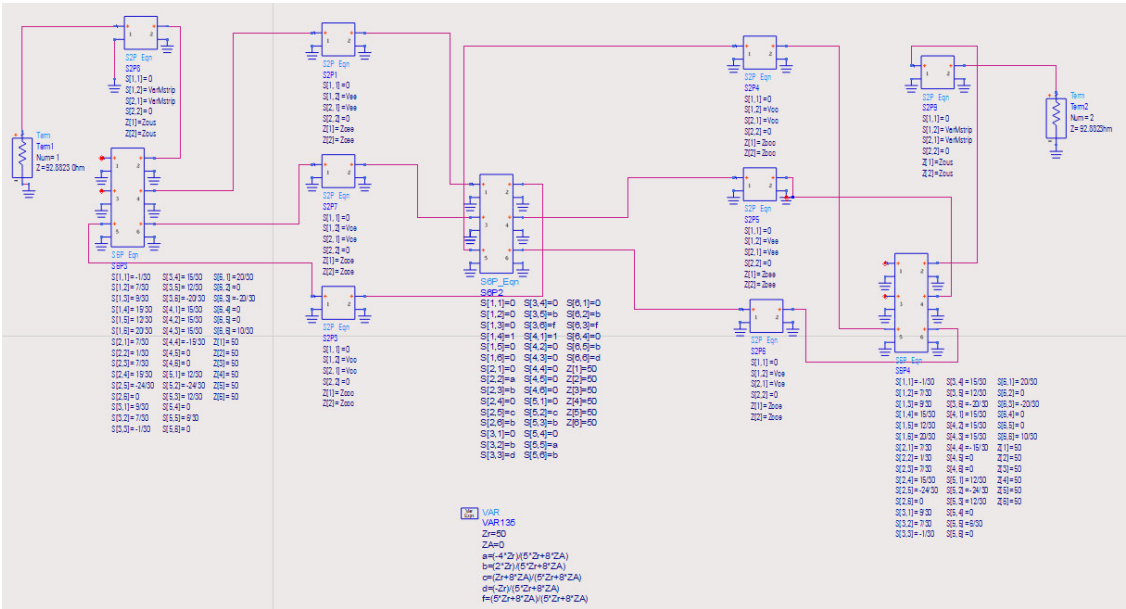


Figura 40: Model circuital de la transició amb el simulador ADS.

El circuit de simulació equivalent (de simulació electromagnètica MOMENTUM):

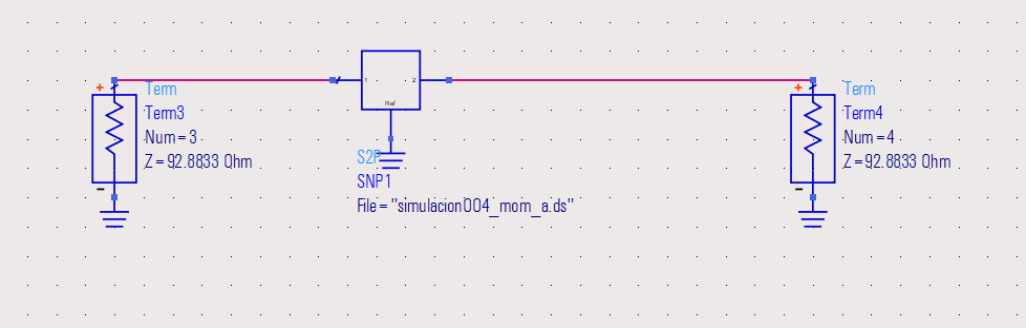


Figura 41: Model circuital de la transició amb el simulador ADS.

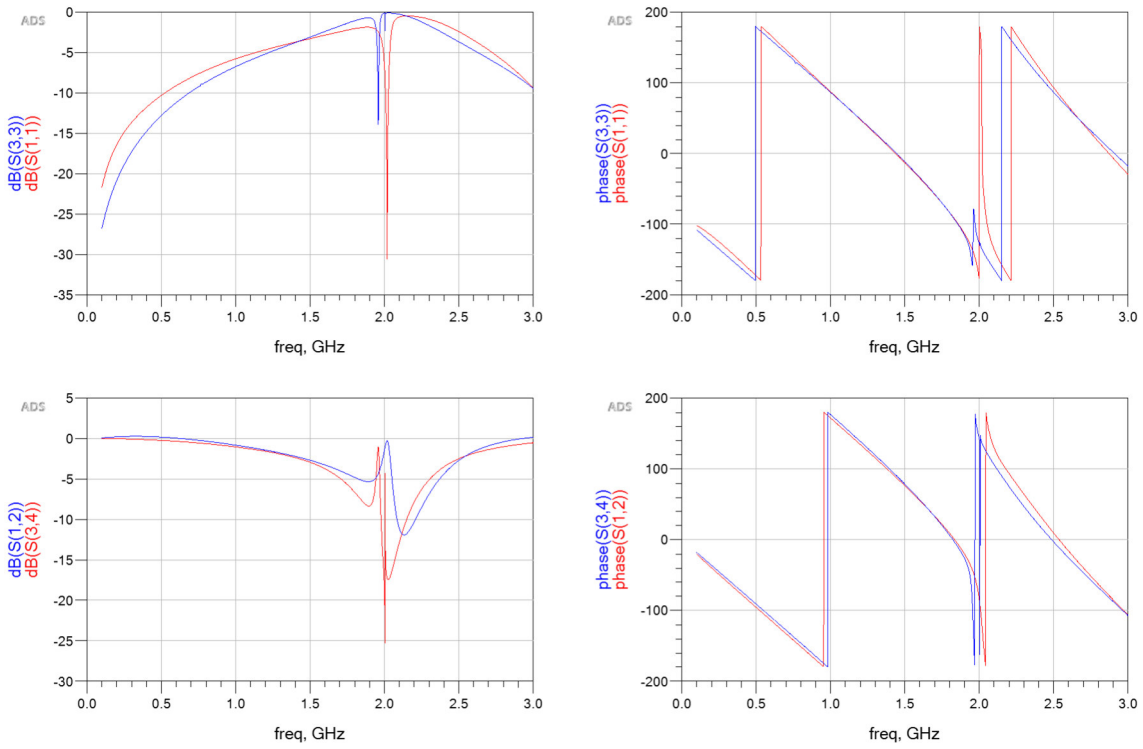


Figura 42: Paràmetres S11 i S12.

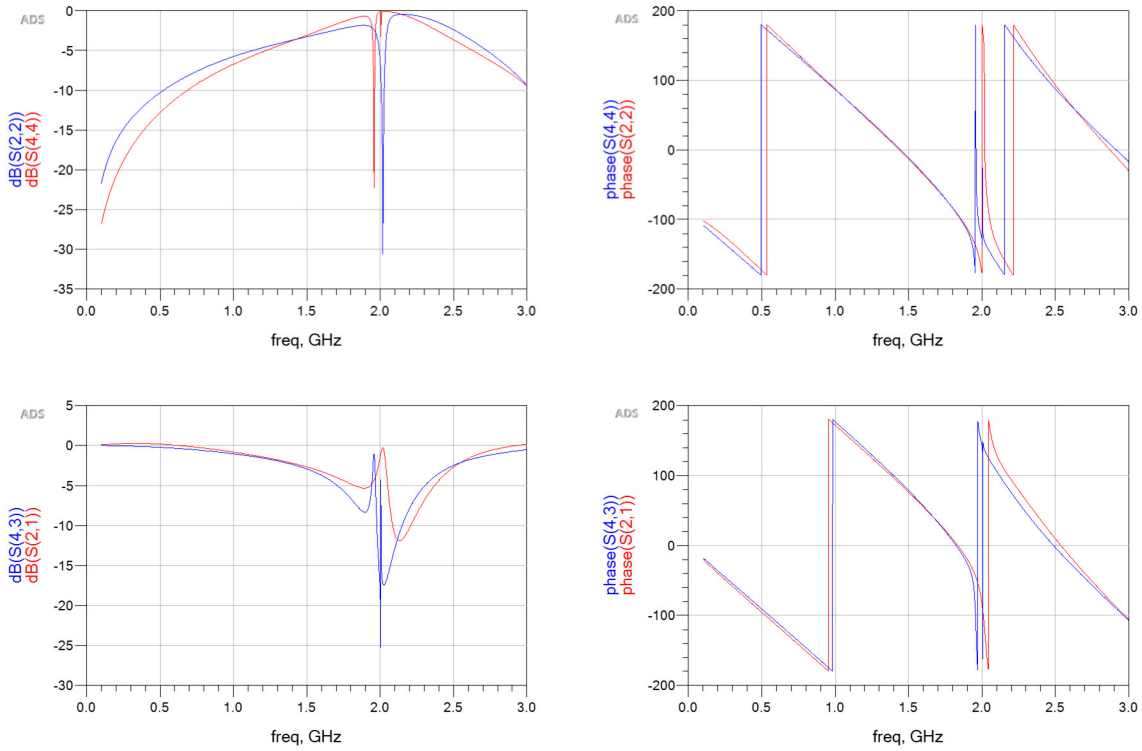


Figura 43: Paràmetres S22 i S21.

La **figura 42** mostra alhora els resultats de la simulació amb simulador MOMENTUM (línia de color blau) i de la simulació circuital utilitzant el model proposat (línia de color vermell) tant del mòdul i fase dels paràmetres de reflexió (S_{11}) i de transmissió (S_{12}). La **figura 43** igual que l'anterior mostra en dos colors els resultats obtinguts tant del mòdul i de la fase dels paràmetres de reflexió (S_{22}) i de transmissió (S_{21}). Els resultants tornen a donar bons resultats que fan que es validi la transició completament.

CAPÍTOL 5:

CONCLUSIONS

En el present treball final de Grau es volia deduir un model circuital equivalent a una transició inserida en una línia de transmissió three-line-microstrip. La rigurositat del mètode utilitzat preveia un resultat òptim o en tot cas és podria detectar en quina de les etapes s'havia fallat.

dels objectius plantejats a l'inici del treball s'ha aconseguit pràcticament tots:

- Estudiar el funcionament les línies de transmissió three-line-microstrip.
- Implementar una transició a la línia pel seu posterior estudi.
- Identificar i calcular els paràmetres de dispersió (S) de la línia de transmissió a partir de càlcul de les tensions i corrents del nostre circuit.
- Realitzar l'anàlisi Multimodal de la transició en la línia three-line-microstrip.
- Deduir i validar i el model circuital multimodal equivalent de la transició.

A Part d'aquest objectius definits en el nostre TFG, s'ha assolit un bon domini de del programa de simulació ADS. El grau de similitud dels resultat obtinguts entre la simulació electromagnètica i la simulació circuital valida el model circuital equivalent. Cal fer esment de la dificultat de tractar simulacions a altes freqüències i per tant que les gràfiques de les simulacions siguin pràcticament iguals és un bona senyal. A més el fet de realitzar una doble simulació amb circuits diferents ho corrobora.

- **LINIES FUTURES:**

Tot i que no era un objectiu es va planejar la possibilitat d'implementar físicament el circuit però finalment no es va realitzar. Aquesta part seria una bona proposta per un futur, així com realitzar altres transicions amb diferents elements inserits al llarg de la nostra transició.

CAPÍTOL 6:

BIBLIOGRAFIA

[1] Vicente M. Rodrigo, Vicente E. Boria, Pablo Soto, Fundamentos de líneas de transmisión, Universitat Politècnica de València.
[2] R.E. Collin, Field Theory of Guided Waves, IEEE Press, Second Edition, 1991.

[3] Gerard Solà y Sabaté: “Modelado de circuitos multimodales en entornos microstrip”. Proyecto Final de Carrera, UPC, 2014.

[4] Miquel Ribó i Pal: “Modelatge Multimodal de Transicions i Asimetries en Guies d’Ones Coplanars”. Tesi Doctoral, Universitat Ramon Llull.

[5] Juan Pablo Rodríguez Cepeda: “Modelatge multimodal de transicions i asimetries en línies three-line-microstrip”. Tesis Doctoral, Universitat Ramon Llull, 2010.

[6] Universidad Carlos III de Madrid. Data de consulta 20 de Març de 2020. http://ocw.uc3m.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones/microondas-y-circuitos-de-alta-frecuencia/temas/parametroS2009.pdf

[7] Miquel Ribó i Pal: “Mètode de càlcul de paràmetres modals de línies de transmissió acoblades d'N+1 conductors a partir de simulacions electromagnètiques 3D".

[8] Miquel Ribó i Pal: “Model circuital multimodal generalitzat per a la transformació de magnituds físiques a modals en circuits de línies acoblades de nombre arbitrari de conductors".

[9] Francisco Javier Pajares:” Modelatge Multimodal de Transicions en Entorn Microstrip”. Tesi Doctoral. Universitat Ramon Llull.