

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**Transmissão de Dados Via Rede  
Elétrica: Função Transferência  
utilizando Grafo de Fluxo**

por:

**Ulysses Roberto Chaves Vitor**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Marcos Tavares de Melo, Ph.D**

**Co-Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto, Ph.D**

**Recife, Julho de 2013**

**©ULYSSES VITOR, 2013.**

V845t Vitor, Ulysses Roberto Chaves.  
Transmissão de dados via rede elétrica: função transparência utilizando Grafo de Fluxo / Ulysses Roberto Chaves Vitor – Recife: O Autor, 2013.  
vii, 61f. il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Marcos Tavares de Melo, Ph.D.  
Coorientador: Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto, Ph.D.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2013.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Modelagem do Canal. 3. Comunicação em Banda Larga. 4. Transmissão de Dados em Linhas de Potência. I. Melo, Marcos Tavares de (Orientador). II. Segatto, Marcelo Eduardo Vieira (Coorientador). III. Título.

621.3 CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2013 / 270



Universidade Federal de Pernambuco  
 Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
 TESE DE DOUTORADO

## ULYSSES ROBERTO CHAVES VITOR

TÍTULO

“TRANSMISSÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA:  
 FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA UTILIZANDO GRAFO DE FLUXO”

A comissão examinadora composta pelos professores: MARCOS TAVARES DE MELO, DES/UFPE; LAÉRCIO MARTINS DE MENDONÇA, DEC/UFRN; HELDER ALVES PEREIRA, POLI/UPE; MARCELO EDUARDO VIEIRA SEGATTO, DEE/UFES; RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO, DES/UFPE e HERMANO ANDRADE CABRAL, DES/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **ULYSSES ROBERTO CHAVES VITOR** **APROVADO.**

Recife, 26 de julho de 2013.



CECILIO JOSÉ LINS PIMENTEL  
 Coordenador do PPGEE



MARCOS TAVARES DE MELO  
 Orientador e Membro Titular Interno



LAÉRCIO MARTINS DE MENDONÇA  
 Membro Titular Externo



RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO  
 Membro Titular Interno



HELDER ALVES PEREIRA  
 Membro Titular Externo



MARCELO EDUARDO VIEIRA SEGATTO  
 Membro Titular Externo



HERMANO ANDRADE CABRAL  
 Membro Titular Externo

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer ao professor Marcos Tavares de Melo pela oportunidade e apoio oferecido.

Ao professor Marcelo Eduardo Vieira Segatto pela cooperação e discussões sobre o tema.

Ao Professor Cecílio pela ajuda e bom trabalho realizado na gestão do PPGEE.

Aos colegas de Laboratório: Bruno, Francisco e Gabriel pelo ambiente agradável de trabalho que foi proporcionado por todos nós.

Aos colegas do IFPE, campus Garanhuns, especialmente a Diretora de ensino Professora Lêda Cristina Correia da Silva e o Coordenador do curso de Eletroeletrônica, Professor Augusto Cesar Lúcio de Oliveira pela compressão e ajuda nas atividades finais do semestre letivo.

À minha mãe por ter me apoiado em todos os momentos da minha vida.

Por fim, à Capes e ao CNPQ pelo suporte financeiro e ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPE.

**ULYSSES ROBERTO CHAVES VITOR**

*Universidade Federal de Pernambuco*

Resumo da Tese submetida à UFPE como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

## **Transmissão de Dados Via Rede Elétrica: Função Transferência Utilizando Grafo de Fluxo**

**Ulysses Roberto Chaves Vitor**

Orientador: Marcos Tavares de Melo, Ph.D

Co-orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Área: Fotônica

Palavras-chaves: Modelagem do Canal, Comunicação em Banda Larga e Transmissão de dados em linhas de Potência

Número de Páginas: 62

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma nova técnica para determinar a função transferência de uma rede elétrica quando exposta a frequências na faixa de quilohertz e megahertz tipicamente usadas para transmitir informação. Essa nova técnica usa a teoria de grafo de fluxo, a qual é frequentemente empregada para cálculo de ganho em amplificadores de micro-ondas, sendo aplicada para sistemas lineares. Realizaram-se medidas com cabos coaxiais, inicialmente, pois é um sistema isolado, sem interferências e com impedância característica constante e conhecida. Dessa forma, pode-se ter uma primeira avaliação da técnica. Em seguida, medições em uma rede de teste do IFPE *campus* Pesqueira foram realizadas. A função transferência obtida através de grafo de fluxo foi utilizada para modelar o canal de transmissão. Essa nova metodologia mostrou-se bastante promissora, podendo ser considerada uma ótima alternativa para a análise do canal PLC.

Abstract of Thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

## **Transmission of data through Electrical grid: Transfer Function Using Flow Graph**

**Ulysses Roberto Chaves Vitor**

Supervisor(s): MARCOS TAVARES DE MELO, Ph.D

Co-Supervisor(s): Marcelo Eduardo Vieira Segatto, PhD.

Concentration Area: PHOTONICS

Keywords: Channel Modeling, Broadband Communication, Power Line Communication.

Number of Pages: 62

**Abstract:** This paper presents a new technique to find a transfer function of a grid when exposed to frequencies in the range of kHz to MHz typically used to convey information. This new technique uses the theory of flow graph, which is often used to calculate microwave gain amplifiers, applied to linear systems. The author presents experimental measurements in coaxial cables, initially, because it is an isolated system, no interference, and characteristic impedance constant and known on. That way, you can have a first evaluation of this technique. Then measurements in a network test IFPE campus Pesqueira were performed. The transfer function obtained by flow graph was used to model the transmission channel. This new methodology proved to be very promising and may be considered a great alternative to the treatment of the PLC channel.

## Lista de Figuras

Figura 1: Modelo de Canal .....	6
Figura 2: Parâmetros de Espalhamento para uma rede de duas portas. ....	8
Figura 3: Representação de um quadripolo pelos parâmetros ABCD. ....	9
Figura 4: Rede de duas portas conectada pela fonte de tensão e carga. ....	10
Figura 5: Rede de duas Portas. ....	12
Figura 6: Eletroduto com Cabo Terra, Neutro e Fase.(Reproduzido de [19]) .....	15
Figura 7: Estrutura da rede elétrica quando vista como meio de comunicação. ....	16
Figura 8: Representação de Rede Elétrica com uma Derivação. ....	17
Figura 9: Estrutura básica do modelo de ecos. ....	18
Figura 10: (a) Definição e tensão e corrente. (b) Elemento infinitesimal de uma linha de transmissão. ....	20
Figura 11: Seção Transversal do Eletroduto. ....	21
Figura 12: Elemento Infinitesimal para multicondutores de Linhas de Transmissão. ....	24
Figura 13: Parâmetros de espalhamento em uma rede de duas portas. ....	26
Figura 14: Grafo de Fluxos em uma Rede de duas Portas. ....	27
Figura 15: Grafo de Fluxos em serie. ....	27
Figura 16: Grafo de Fluxo em Paralelo. ....	28
Figura 17: Grafo de Fluxo com Laço. ....	28
Figura 18: Ilustração para Regra da Divisão. ....	29
Figura 19: Rede de duas portas com fonte e terminação. ....	30
Figura 20: Representação de grafo de fluxo para uma rede de duas portas. ....	31
Figura 21: Grafo de Fluxo Para Calculo de Potência na Carga. ....	33
Figura 22: Grafo de Fluxo de uma Rede Elétrica de uma Fase. ....	41
Figura 23: Grafo de Fluxo para uma Rede Elétrica Trifásica. ....	41
Figura 24: Topologias com cabos coaxiais avaliadas. ....	44
Figura 25: Medição Realizada com Analisador de Redes. ....	44
Figura 26: Fluxograma Representativo do calculo do Ganho transdutivo. ....	45
Figura 27: Comparação entre o ganho transdutivo e $S_{21}$ para a Topologia 1.1. ....	46
Figura 28: Comparação entre o Ganho Transdutivo e $S_{21}$ para a Topologia 1.2. ....	47
Figura 29: Comparação entre o Ganho Transdutivo e $S_{21}$ para a Topologia 2.1. ....	47
Figura 30: Comparação entre o Ganho Transdutivo e $S_{21}$ para a Topologia 2.2. ....	47
Figura 31: Comparação entre o Ganho Transdutivo e $S_{21}$ para a Topologia 2.3. ....	48
Figura 32: Rede Elétrica de Teste no IFPE Pesqueira. ....	49
Figura 33: Foto de um Trecho da Rede Elétrica de Pesqueira. ....	49
Figura 34: Foto Lateral da Rede Elétrica de Pesqueira. ....	50
Figura 35: Medição Realizada na Rede de Testes no IFPE Pesqueira. ....	51
Figura 36: Fluxograma descritivo do programa. ....	52
Figura 37: Medição da Rede de Média Tensão Pesqueira das Fases B e C. ....	53
Figura 38: Medição da Rede de Média Tensão Pesqueira das Fases A e B. ....	54
Figura 39: Grafo de Fluxo para uma Rede de duas Portas Modelada com Parâmetros ABCD. .....	56
Figura 40: Conexão em Cascatas de duas Redes. ....	57
Figura 41: Grafo de Fluxo Para Rede de Duas Portas com Parâmetros ABCD. ....	58

**Índice de Tabelas**

Tabela 1: Percursos do Sinal na Rede.....	17
---	----

## Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Motivação .....	3
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Metodologia .....	4
1.4 Revisão Bibliográfica.....	5
1.4.1 Parâmetros de Espalhamento.....	7
1.4.2 Parâmetros ABCD.....	8
1.4.3 Parâmetros de Impedância.....	12
1.5 Organização do trabalho .....	14
2. Modelagem do Canal PLC .....	15
2.1 Introdução e Estado da Arte.....	15
2.2 Caso Particular: 2 Condutores.....	19
2.3 Caso Geral: Múltiplos condutores.....	23
2.4 Conclusões .....	24
3. Grafo de Fluxos Aplicado ao PLC .....	26
3.1 Introdução ao Grafo de Fluxo .....	26
3.1.1 Regra de Mason.....	29
3.1.2 Ganho de Potência em Função de Grafo de Fluxos.....	30
3.2 Modelagem do Canal PLC através Grafo de Fluxo .....	40
3.3 Conclusões .....	42
4. Resultados Experimentais .....	43
4.1 Introdução .....	43
4.2 Experimentos com 2 Condutores .....	43
4.2.1 Resultados e Análise .....	45
4.3 Experimentos com Múltiplos Condutores.....	48
4.3.1 IFPE Pesqueira.....	48
4.4 Conclusões .....	54
5. Conclusões, Trabalhos Futuros .....	55
5.1 Conclusão.....	55
5.2 Trabalhos Futuros .....	56
6 Trabalhos Publicados e Atividades no Doutorado.....	59
7. Referências .....	60

## 1. Introdução

De acordo com a Academia Nacional de Engenharia dos EUA (Estados Unidos da América), a eletrificação massiva das cidades foi uma grande conquista da engenharia no século XX, pelo indubitável impacto na melhoria da qualidade de vida proporcionada na sociedade. Tal conceito é compartilhado por técnicos ao redor do mundo.

A maioria das pessoas desconhece a complexidade dos sistemas de geração, transmissão e distribuição que possibilitam que a energia elétrica seja entregue, exatamente quando demandada, na quantidade requerida, pelos diversos tipos de consumidores, em diferentes instalações e locais [1].

A primeira geração dos sistemas de fornecimento de energia elétrica era composta por sistemas em corrente contínua que atendiam pequenas áreas, quarteirões de cidades como Nova York [1].

A segunda geração dos sistemas de fornecimento de energia elétrica foi implantada em corrente alternada. A geração de energia elétrica passou a ocorrer remotamente. A energia era transmitida para os centros consumidores onde eram empregados principalmente postes e cabos aéreos que prejudicavam a paisagem urbana. Em função da crescente carga nos centros urbanos e da limitação física para ampliar o número de circuitos elétricos sustentados pelos postes, as empresas de distribuição de energia elétrica passaram a empregar sistemas de cabos subterrâneos, porém, sem qualquer integração com os demais serviços públicos que utilizam o subsolo das grandes cidades (telefonia, fornecimento de água e esgoto). Tal situação perdura até hoje, na maioria dos centros urbanos no mundo [1].

A terceira geração dos sistemas de fornecimento de energia elétrica caracteriza-se principalmente pelo compartilhamento do uso do subsolo pelas prestadoras de serviço público, ou seja, a principal evolução se dá na integração do planejamento e das ações de implantação de instalações dessas empresas (especialmente utilizando túneis *multi-utilities*, o que em alguns países é exigência legal), o que resulta na redução dos investimentos e dos custos de manutenção. Entretanto, esses sistemas de fornecimento de energia elétrica, de terceira geração, que começaram a surgir na última década do século passado, ainda empregam

primordialmente tecnologia analógica na execução das funções de medição, operação e proteção [1].

Com o avanço do uso da tecnologia digital nos sistemas de fornecimento de energia elétrica, começa a surgir o que se convencionou chamar de quarta geração desses sistemas, ou seja, as chamadas “*smart grids*”, caracterizadas pelo uso intensivo de equipamentos digitais, de telecomunicações, de sensoriamento e operação remotos de instalações, e de tecnologia de informação (TI), adicionalmente às instalações físicas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica existentes.

O termo *Smart Grid* foi usado pela primeira vez em 2005 em um artigo escrito por S. Massoud Amin e Bruce F. Wollenberg, publicado na revista IEEE P&E, com o título de “*Toward A Smart Grid*” [2]. Existem várias definições para o conceito de redes inteligentes, mas todas convergem para o uso de elementos digitais e de comunicações nas redes que transportam a energia. Esses elementos possibilitam o envio de uma gama de dados e informação para os centros de controle, onde eles são tratados, auxiliando na operação e controle do sistema como um todo.

Assim, é possível estabelecer que o principal diferencial das *smart grids*, em comparação aos sistemas de segunda e terceira gerações, é o significativo aumento da quantidade e da qualidade das informações relativas ao desempenho da rede; a disponibilidade dessas informações na própria rede (trafegam fisicamente na própria rede). Essa otimização do desempenho da rede de energia elétrica reflete-se em menores custos para a energia fornecida e, conseqüentemente, em menores tarifas para os consumidores [1].

*Smart grids* consiste de três subáreas que interagem entre si. A primeira é a inteligência no sistema de fornecimento de energia elétrica, abrangendo geração, transmissão e distribuição, ou seja, a parte do sistema de fornecimento de energia elétrica que está acima do medidor [1]. A segunda subárea seria o próprio medidor, que numa *smart grid*, geralmente, mas não necessariamente, é um medidor inteligente, atuando como interface entre o fornecedor de energia elétrica e o consumidor [1]. A terceira subárea seria composta pela inteligência no consumo, ou seja, pelas indústrias inteligentes, pelas casas inteligentes, que empregariam equipamentos e eletrodomésticos inteligentes, bem como sistemas domésticos de geração de energia elétrica empregando fonte eólica, solar ou biomassa, que utilizam as informações disponíveis na rede, e a programação definida pelo consumidor, para

ligar e desligar, reduzindo o consumo ou injetando energia elétrica na rede, em resposta a tarifas ou estímulos relativos ao desempenho da rede [1].

Diversas tecnologias podem ser usadas para automatizar sistemas de distribuição de rede elétrica. Tais como *Zig bee*, antenas inteligentes, redes *wireless* em geral e a rede elétrica como meio físico de transmissão. Esta última denominada de PLC, *Power Line Communication*.

No trabalho [3] foi investigada a viabilidade do uso da tecnologia *Power Line Communications (PLC)*, de banda larga e banda estreita. Em ambos os casos é possível usar a rede elétrica como meio de transmissão, sendo o uso de banda estreita mais utilizado nas redes de acesso, devido ao menor custos dos equipamentos.

Além disso, esses resultados podem ser ainda melhorados, caso sejam utilizados acopladores para transpassar os transformadores, como demonstrado no trabalho [4], a comunicação através das redes elétricas podem alcançar áreas bem maiores de cobertura.

Portanto, o uso de rede elétrica como meio físico para transmissão de informação é uma boa opção para automatização da rede.

Nesse trabalho, é proposto um novo modelo matemático para a função transferência da rede elétrica quando enviado sinais na banda estreita e banda larga. A primeira na faixa de quilohertz e a segunda na faixa de megahertz. Medidas experimentais serão comparadas com a nova teoria empregada.

### **1.1 Motivação**

A automação de redes elétricas para monitoramento da energia elétrica é essencial no combate a perdas e avaliação da qualidade da energia consumida. Além disso, é possível realizar a tarifação remota, diminuindo custos operacionais com pessoas e erros com medições.

Para isso, como dito anteriormente, podem-se utilizar diversas tecnologias como *Wifi*, *Zigbee* e PLC.

A tecnologia PLC é uma boa alternativa para construção de redes *smart grids*. É possível conseguir taxas de transmissão de dados através da rede elétrica que possibilitem a automação e construção de redes inteligentes.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho propõe um novo método de modelagem do canal PLC utilizando a teoria de grafo de fluxo. Através dessa nova técnica é possível prever redes mais complexas as quais possuem inúmeras reflexões e inúmeras derivações. Essa técnica introduz uma nova abordagem ao problema, já comentado no trabalho [5].

Aqui, entretanto, a função transferência encontrada através da teoria de Grafo de Fluxo é comparada com medidas experimentais, dessa forma, além de sugerir uma nova teoria para a função transferência do canal [5], também valida com medidas experimentais que o novo modelo pode ser aplicado.

## 1.3 Metodologia

A princípio são realizadas medições com cabos coaxiais. O benefício do uso desses cabos é o fato de eles serem encapsulados, dessa maneira é imune a interferências externas, e possuem impedância característica constante e independente da frequência com valor de  $50 \Omega$ . Assim, poderá trabalhar com um sistema isolado e conhecido, tendo mais facilidade de comprovar a teoria.

Com cabos coaxiais, são montadas redes com uma e duas derivações. Utilizando um analisador de redes vetorial, extrair-se-ão os parâmetros de espalhamento da rede.

Nesse trabalho, será construído um programa utilizando o software *Matlab R2010a*, o qual com os parâmetros de espalhamento se extrairá a função transferência com grafos de fluxos

Após o uso de cabos coaxiais, para uma primeira comprovação da aplicação da nova teoria, medidas em redes elétricas serão feitas.

Como não se possui conhecimento prévio da impedância característica da rede, mede-se os parâmetros de impedância da rede, além dos parâmetros de espalhamento. Novamente, fazendo uso do programa construído em *Matlab*, encontra-se-a expressão em função do grafo de fluxo. Esse resultado será comparado com o resultado medido, assim é possível validar a teoria.

Por fim, serão realizadas medições em uma rede de teste no IFPE campus Pesqueira, trata-se de uma rede para treinamento de estudantes do curso técnico em eletrotécnica.

#### 1.4 Revisão Bibliográfica

Alguns trabalhos na literatura propõem modelos matemáticos para a rede elétrica quando usada para transmitir informações em banda larga [6][7]. Por outro lado, trabalhando-se em banda estreita, as aplicações são para automação em *Smart Grid*.

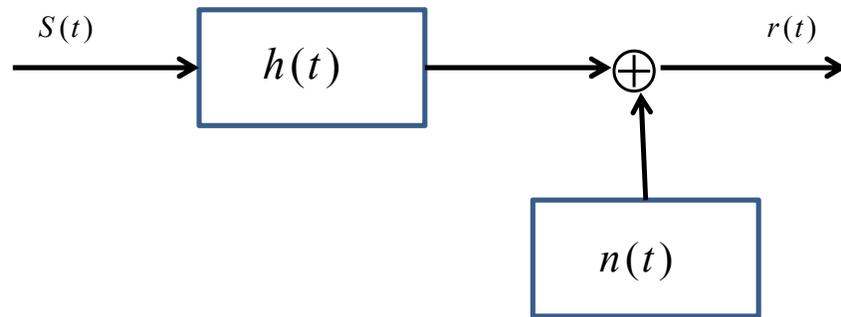
O conceito *Smart Grid* ou Rede Elétrica Inteligente incorpora tecnologias de sensoriamento, monitoramento, tecnologia da informação e telecomunicações para o melhor desempenho da rede, identificando antecipadamente suas falhas e capacitando-a a se auto-recompôr diante de ocorrências que afetem sua performance [2]. Diversas tecnologias podem ser usadas para automatizar sistemas de distribuição de rede elétrica. Tais como *Zig bee*, antenas inteligentes, redes *wireless* em geral e a rede elétrica como meio físico de transmissão. Esta última denominada de PLC, *Power Line Communication*, Comunicação através linha de potência.

Existe um grande debate sobre qual tecnologia deverá ser a melhor escolha para uso em redes inteligentes [8]. No trabalho [3] é avaliado a viabilidade do uso da tecnologia PLC, *Power Line Communication*, para aplicações *Smart Grid*.

No artigo [3] foram apresentadas simulações utilizando o *software Matlab R2010a* as quais mostraram a taxa de erro do canal. Foram considerados duas topologias que possuíam 1200 medidores eletrônicos, 1200 transformadores e 1 subestação. A conclusão desse trabalho foi que uma combinação entre tecnologias PLC de banda estreita e banda larga são eficazes para aplicações *Smart Grid*. Por conta disso, são realizados estudos sobre modelos matemáticos que demonstrem o comportamento do sinal quando injetado na rede elétrica.

Pesquisadores consideram o canal PLC, um péssimo canal e extremamente difícil de se modelar [9]. Os problemas técnicos são: variação na frequência e no tempo, função transferência dependendo da localização, topologia de rede e cargas conectadas a rede, além de diferentes tipos de ruído [10].

Basicamente, o canal PLC pode ser visto como mostrado na Figura 1 [7][11][12]:



**Figura 1: Modelo de Canal**

Onde:

- $S(t)$  - Sinal injetado na rede;
- $h(t)$  - Resposta impulsiva do canal;
- $n(t)$  - Ruído do canal;
- $r(t)$  - Sinal recebido após a passagem pelo canal.

Na Figura 1, o sinal de informação quando injetado na rede elétrica é submetido a uma função transferência. Em seguida, ruído é somado ao sinal. Assim, o sinal recebido pelo receptor pode ser expresso da seguinte forma [7][12 .]:

$$r(t) = h(t) * s(t) + n(t) \quad (1.1)$$

Assim, o comportamento do sinal no canal de comunicação PLC pode ser dividido no estudo da função transferência,  $h(t)$ , e ruído,  $n(t)$ .

Estudos sobre ruídos já foram realizados [13] [14], onde o ruído pode ser dividido nos seguintes tipos:

Ruído impulsivo: ocorre periodicamente com curta duração e alta densidade espectral de potência.

Ruído de banda estreita: espalhada por uma estreita faixa de frequência. Consiste geralmente de sinais senoidais modulados gerados por várias fontes de rádio-emissoras;

Ruído de fundo: baixa densidade espectral de potência, causada pela soma de muitas fontes baixo ruído.

No caso da função transferência, as técnicas para modelar o canal podem ser divididas em duas categorias [10]:

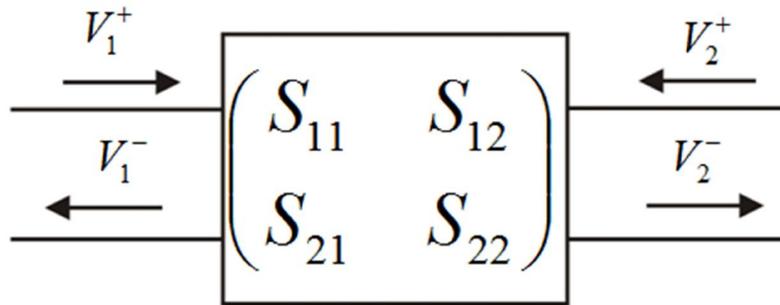
- ✓ Aproximação *Top Down*: A função transferência é computada após a medição. Um modelo empírico que utiliza parâmetros extraídos da medição. É de fácil implementação e computacionalmente eficiente, todavia é sujeito a erros de medição;
- ✓ Aproximação *Bottom Up*: Trata-se de uma aproximação analítica. Nesse caso, a função transferência é computada antes da medição, através de um modelo determinístico. Ao contrário do anterior, exige maior esforço computacional.

Nesse trabalho, optou-se por extrair os parâmetros após serem realizadas as medições na rede elétrica, para, em seguida, com os parâmetros retirados da rede encontrar a função transferência do canal. Logo, está se trabalhando com a aproximação *Top Down*.

#### 1.4.1 Parâmetros de Espalhamento

Esses parâmetros proporcionam uma completa descrição de uma rede com  $N$  portas. A matriz formada por tais parâmetros relaciona as tensões incidentes e refletidas em cada porta do dispositivo. Para alguns dispositivos e circuitos, os parâmetros  $S$  podem ser obtidos utilizando técnicas de análise de circuitos. Também podem ser obtidos utilizando um analisador de redes vetorial [15].

Considere uma rede de duas portas na Figura 2, onde  $V_1^+$  representa a onda de tensão incidente na porta 1,  $V_1^-$  representa onda refletida na porta 1,  $V_2^+$  representa onda de tensão incidente na porta 2 e  $V_2^-$  representa a onda de tensão refletida na porta 2.



**Figura 2: Parâmetros de Espalhamento para uma rede de duas portas.**

A seguir estão as equações que representam o quadripolo da Figura 2:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0}$$

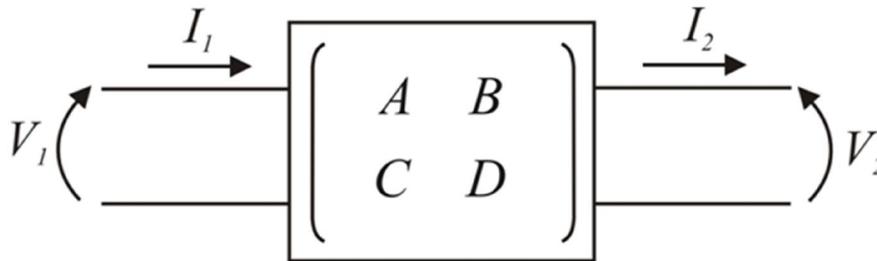
para  $k \neq j$

Os parâmetros  $S$  representam os coeficientes de reflexão e transmissão para rede de duas portas. Assim, o  $S_{11}$  é o coeficiente de reflexão da porta 1, quando a porta 2 estiver casada, de maneira similar ocorre para o  $S_{22}$ . O  $S_{21}$  é o coeficiente de transmissão da porta 2 para a porta 1, quando a porta 1 esta casada, analogamente para o  $S_{12}$ . [15].

#### 1.4.2 Parâmetros ABCD

Esses parâmetros podem ser usados para caracterizar uma rede com um numero arbitrário de portas. Na prática, contudo, muitas redes consistem de conexões em cascata de redes de duas portas. Esse é o caso da rede elétrica quando usada na transmissão de dados em banda larga. Assim, é conveniente definir uma matriz de transmissão 2 x 2, ou matriz ABCD, para cada rede de duas portas [15].

É possível encontrar a matriz ABCD resultante, pela multiplicação de cada parte da rede. Na Figura 3 pode ser visto uma rede de duas portas modelada com parâmetros ABCD.



**Figura 3: Representação de um quadripolo pelos parâmetros ABCD.**

A equação (1.3) representa a rede de duas portas da Figura 3:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Alguns artigos usam esses parâmetros para modelar o canal PLC. São calculados resistência, indutância, condutância e capacitância da rede, usando equações clássicas de linhas de transmissão [16] para o modo TEM [17]. A rede é dividida em trechos e calculada a matriz ABCD de cada trecho, por fim é feito o produto dessas matrizes e expressa a resposta em frequência do canal em função dos parâmetros finais [17].

### **Relação entre os Parâmetros S e Parâmetros ABCD**

Em muitas situações, é útil fazer a conversão de parâmetros. O analisador de redes, modelo ENA Series RF Network Analyzers, Agilent E5071B, utilizado nesse trabalho, dispõe apenas os parâmetros S; no entanto é mais fácil explicitar a resposta em frequência de uma rede utilizando os parâmetros ABCD. As equações de transformação são dadas a seguir [15]:

$$A = \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (1.4)$$

$$B = Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (1.5)$$

$$C = \frac{1}{Z_0} \frac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (1.6)$$

$$D = \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (1.7)$$

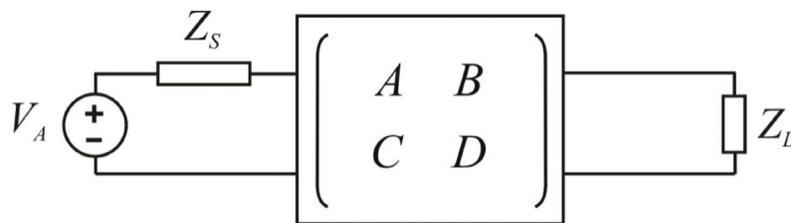
Para testes que envolvem trechos mais complexos do circuito, nos quais existem cargas ativas ou passivas ligadas à rede elétrica, pode-se usar matriz ABCD. Cada trecho da rede corresponde a uma matriz ABCD, a matriz ABCD final que representa a rede completa será o produto das matrizes para cada parte da rede.

### Função Transferência de uma Rede em função dos Parâmetros ABCD

A partir dos parâmetros ABCD, é possível encontrar a função transferência para qualquer rede de duas portas. A seguir será mostrado a resposta em frequência da rede em função desses parâmetros:

Considerando uma rede de duas portas, com fonte e carga na terminação, mostrada na Figura 4 onde [17]:

$V_A$  tensão da fonte,  $Z_S$  impedância da fonte,  $Z_L$  impedância da carga.



**Figura 4:** Rede de duas portas conectada pela fonte de tensão e carga.

Deseja-se encontrar:

$$H(f) = \frac{V_L}{V_A} \quad (1.8)$$

Lembrando de (1.3):

$$V_1 = AV_2 + BI_2, \text{ mas } V_2 = Z_L I_2, \text{ logo:}$$

$$V_1 = AZ_L I_2 + BI_2 \Rightarrow \frac{I_2}{V_1} = \frac{1}{AZ_L + B}. \text{ Finalmente, multiplicando ambos os lados}$$

por  $Z_L$ :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_L}{AZ_L + B} \quad (1.9)$$

Expressando a tensão da fonte,  $V_A$ , em função da tensão de entrada no quadripolo,  $V_1$ :

$$V_A = V_1 + Z_s I_1 \Rightarrow V_1 = V_A - Z_s I_1 \quad (1.10)$$

Explicitando  $I_1$  em função de  $V_2$  e  $Z_L$ , a partir de (1.3):

$$I_1 = CV_2 + DI_2, \text{ mas } V_2 = Z_L I_2, \text{ então}$$

$$I_1 = CV_2 + D \frac{V_2}{Z_L} \quad (1.11)$$

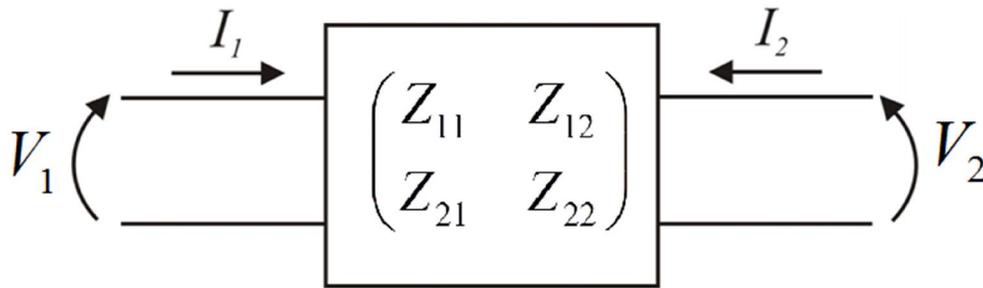
Substituindo (1.10) em (1.11), e em seguida em (1.9). Chega-se, com algumas manipulações a [18]:

$$H(f) = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_s + DZ_s} \quad (1.12)$$

Esta é a equação que expressa o comportamento de uma rede no domínio da frequência.  $H(f)$  é a função transferência da rede em função dos parâmetros de impedância. Essa expressão será usada para mostrar o comportamento no domínio da frequência da rede elétrica na faixa de 1MHz até 35MHz.

#### 1.4.3 Parâmetros de Impedância

Considerando uma rede de duas portas como mostrado na Figura 5. Desde de que a rede seja linear, o princípio de superposição pode ser aplicado [15][19].



**Figura 5: Rede de duas Portas.**

Admitindo que não existe nenhuma fonte independente, a tensão na porta 1 pode ser expressa da seguinte forma [15][19]:

$$V_1 = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2 \quad (1.13)$$

Desde de que  $V_1$  esteja em volts e  $I_1$  e  $I_2$  esteja, e, ampers, os parâmetros  $Z_{11}$  e  $Z_{12}$  são dados em ohms. Portanto esses parâmetros podem ser chamados de parâmetros de impedância. De maneira similar é possível escrever também [15][19]:

$$V_2 = Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 \quad (1.14)$$

Utilizando a representação de matrizes, têm-se:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Caso a porta 2 esteja em aberto, então  $I_2$  pode ser considerado nulo, dessa maneira, têm-se:

$$Z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad (1.16)$$

e

$$Z_{21} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad (1.17)$$

De maneira similar, para a porta 2, têm-se:

$$Z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad (1.18)$$

e

$$Z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad (1.19)$$

### **Relação entre Parâmetros Z e Parâmetros ABCD**

Em algumas situações é importante ter acesso aos parâmetros de impedância da rede sob avaliação. Assim, pode-se realizar a conversão dos parâmetros de impedância para os parâmetros ABCD, através das seguintes expressões [15]:

$$A = Z_{11} / Z_{21} \quad (1.20)$$

$$B = \frac{Z_{11} \cdot Z_{22} - Z_{12} \cdot Z_{21}}{Z_{21}} \quad (1.21)$$

$$C = 1 / Z_{21} \quad (1.22)$$

$$D = Z_{22} / Z_{21} \quad (1.23)$$

Através dos parâmetros de impedância é possível encontrar os parâmetros ABCD e com esses a função transferência do canal.

### **1.5 Organização do trabalho**

O trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo 2 trata dos modelos clássicos para o canal PLC, enfatizando os casos com dois e múltiplos condutores.

No capítulo 3, é introduzida a teoria de Grafo de Fluxos e sua aplicação a modelagem do canal PLC.

No capítulo 4 são descritas as medições realizadas com cabos coaxiais e na rede de estudo no IFPE *campus* Pesqueira.

No capítulo 5 são realizadas as conclusões e discutidos os trabalhos futuros.

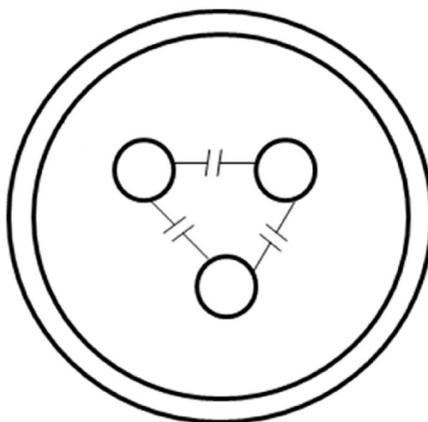
Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas os artigos publicados e submetidos durante o doutorado.

## 2. Modelagem do Canal PLC

### 2.1 Introdução e Estado da Arte

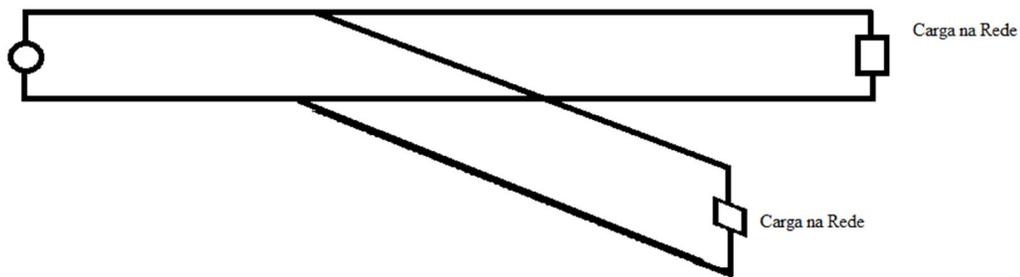
A rede de energia elétrica foi projetada para trafegar sinais de potência na frequência de 50Hz ou 60Hz. Quando utilizada para transmitir informação, utiliza-se faixa de frequência de kHz e MHz, banda estreita e banda larga. No último caso, a rede elétrica comporta-se como uma linha de transmissão, na qual as equações clássicas que regem uma linha de transmissão são utilizadas [17]. O modo o qual a informação se propaga é o TEM, transverso eletromagnético.

Uma linha de transmissão clássica pode ser considerada como um par de fios paralelos igualmente espaçados. No caso de uma rede doméstica, os fios são entrelaçados no condutor, envoltos por um eletroduto. Pode-se considerar esses fios igualmente espaçados e o eletroduto com potencial nulo [20].



**Figura 6: Eletroduto com Cabo Terra, Neutro e Fase.(Reproduzido de [19])**

Na Figura 6, os fios são considerados igualmente espaçados e as equações clássicas para linhas de transmissão são aplicadas. Quando são ligadas cargas elétricas nas derivações, como equipamentos eletrodomésticos nas tomadas, a rede pode ser vista como uma linha de transmissão com derivações com cargas nas suas terminações, como pode ser visto na Figura 7:



**Figura 7: Estrutura da rede elétrica quando vista como meio de comunicação.**

A linha possui uma derivação com uma carga acoplada, a fonte de sinal e o dispositivo receptor estão na extremidade da rede. Cada trecho da rede possui uma impedância característica própria. É possível afirmar que haverá múltiplas reflexões de sinal, gerando múltiplos percursos [21].

Na Figura 8, é representado uma rede elétrica com uma derivação. Essa rede possui três terminais: A, C e D e uma junção B. Ela consiste de três segmentos com (1), (2) e (3). Com impedâncias características distintas [13]. Onde:

$t_{1B}$	Coeficiente de Transmissão no ponto B, em (1)
$r_{1B}$	Coeficiente de Reflexão no ponto B, em (1)
$r_{3B}$	Coeficiente de Reflexão no ponto B, em (3)
$t_{3B}$	Coeficiente de Transmissão no ponto B, em (3)

Na derivação, o sinal é dividido em três partes: A primeira é refletida, a segunda segue em direção a C e a terceira é refletida no sentido de D. A terceira parte do sinal será novamente refletida em direção a B [13].

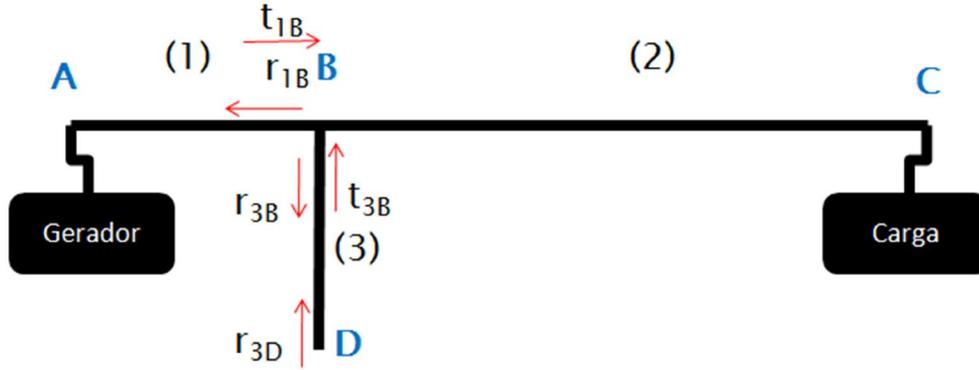


Figura 8: Representação de Rede Elétrica com uma Derivação.

A propagação dos sinais pode ser resumida como descrito na Tabela 1:

Tabela 1: Percursos do Sinal na Rede

Número	Percurso	Caminho do Sinal	Produto dos Coeficientes de Reflexão e transmissão
1	$A \rightarrow B \rightarrow C$	$L_1 + L_2$	$t_{1B}$
2	$A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C$	$L_1 + 2L_3 + L_2$	$t_{1B} \cdot r_{3D} \cdot t_{3B}$
3	$A \rightarrow B \rightarrow (D \rightarrow B)^2 \rightarrow C$	$L_1 + 4L_3 + L_2$	$t_{1B} \cdot r_{3B} \cdot (r_{3D})^2 \cdot t_{3B}$
$N$	$A \rightarrow B \rightarrow (D \rightarrow B)^{N-1} \rightarrow C$	$L_1 + 2(N-1)L_3 + L_2$	$t_{1B} \cdot r_{3D} \cdot (r_{3B} \cdot r_{3D})^{N-2} \cdot t_{3B}$

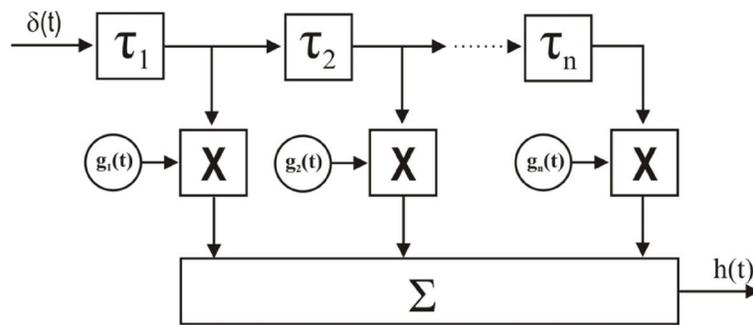
Dessa forma, a potência final do sinal, que percorre um caminho, até o receptor ou carga, é o produto das reflexões e transmissões ao longo da linha, além da atenuação do canal. Em (2.1), pode-se representar matematicamente [11][13]:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^N \tau_i \cdot \Gamma_j \cdot e^{-\alpha(f) \cdot l_i} \quad (2.1)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \tau_i &\longrightarrow i\text{-ésimo coeficiente de reflexão} \\ \Gamma_j &\longrightarrow j\text{-ésimo coeficiente de transmissão} \end{aligned}$$

Considerando mais derivações e uma rede mais complexa, pode-se considerar uma rede de múltiplos percursos, no qual em cada percurso o sinal é submetido a um atraso diferente e sofre diferentes reflexões e transmissões. Na Figura 9, é mostrada a representação empregada [11][13]:



**Figura 9: Estrutura básica do modelo de ecos.**

Considerando um pulso de entrada, a função transferência será considerada como se segue [11][13]:

$$h(t) = \sum_{i=0}^N g_i \cdot \delta(t - \tau_i) \quad (2.2)$$

Onde  $\tau_i$  são os atrasos de cada eco ou percurso e os fatores  $g_i$  são os pesos. Os coeficientes  $g_i$  dependem do comprimento do cabo e da frequência do sinal. Esse peso pode ser representado da seguinte forma [11][13]:

$$g_i(f, l_i) = a_i \cdot e^{-\alpha(f)l_i} \quad (2.3)$$

Onde:  $l_i$  - comprimento do percurso,  $a_i$  - produto dos coeficientes de transmissão e reflexão ao longo do caminho.

Fazendo a transformada de Fourier da resposta impulsiva do canal, encontra-se a resposta em frequência do canal PLC [11][13]:

$$H_{PLC}(f) = \sum_{i=0}^N a_i \cdot e^{-\alpha(f) \cdot l_i} \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_i} \quad (2.4)$$

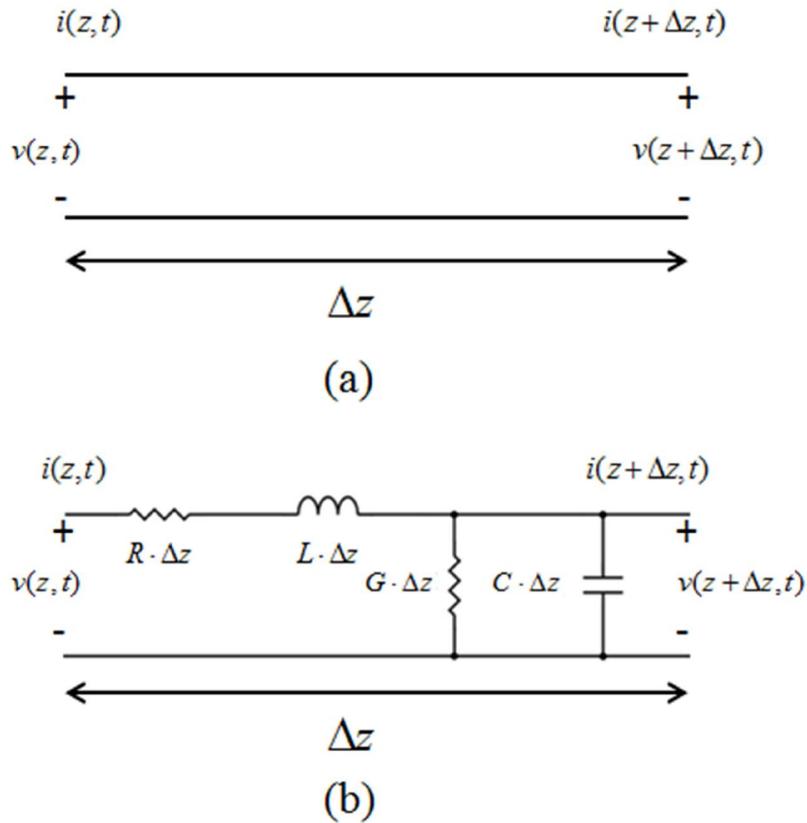
Como a rede elétrica é equivalente a uma linha de transmissão, a atenuação do canal torna-se uma função das constantes  $R$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  da linha de transmissão da rede.

## 2.2 Caso Particular: 2 Condutores

Quando é injetado sinal na faixa de 1MHz até 30 MHz em uma rede elétrica, essa comportasse como uma linha de transmissão.

Pode-se considerar a linha com dois fios paralelos, a fase e o neutro, mesmo os fios não estando igualmente espaçados ou até entrelaçados, é possível realizar essa aproximação[17]. Na Figura 10(a), pode ser visualizado dois fios paralelos representando uma linha de transmissão de comprimento  $\Delta z$ . Onde os valores da tensão e da corrente dependem da posição  $z$  da linha. As quantidades  $v(z, t)$  e  $v(z + \Delta z, t)$  denotam valores instantâneos de tensão no ponto  $z$  e  $z + \Delta z$ , respectivamente. De maneira análoga, para a corrente  $i(z, t)$  e  $i(z + \Delta z, t)$ [16].

Na Figura 10(b), os parâmetros do modelo da linha são representados:  $R$  – resistência por unidade de comprimento em Ohm/m,  $L$  – auto-indutância por unidade de comprimento em  $H/m$ ,  $G$  – condutância por unidade de comprimento em  $S/m$ ,  $C$  – capacitância por unidade de comprimento em  $F/m$ ,  $R$  e  $L$  são elementos em serie e  $G$  e  $C$  são elementos em paralelo [16][15].



**Figura 10: (a) Definição e tensão e corrente. (b) Elemento infinitesimal de uma linha de transmissão.**

Baseado nesse elemento infinitesimal da linha de transmissão, é possível, fazendo lei dos nós e das malhas, encontrar a constante de propagação e a impedância característica da linha de transmissão [15][16], a equação (2.5) representa a constante de propagação [15][16], onde:

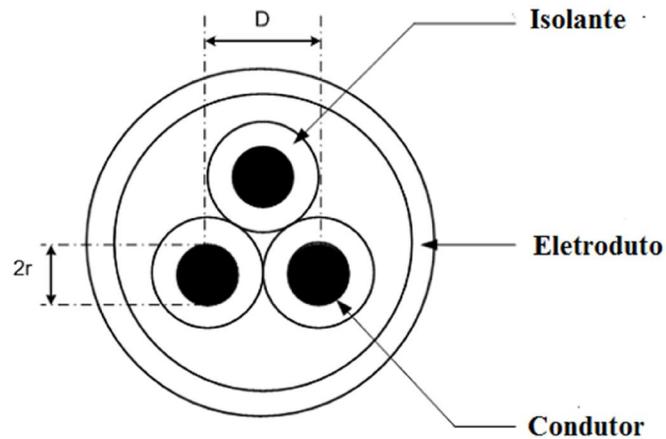
$\gamma$  - Constante de propagação;

$\alpha$  - Constante de atenuação,  $[\alpha] = \text{Np} / \text{m}$  ;

$\beta$  - Constante fase,  $[\beta] = \text{rad} / \text{m}$  .

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2.5)$$

Supondo um eletroduto com fase, neutro e terra no seu interior, possuindo os fios um diâmetro  $D$  e diâmetro de cobre  $2r$ , como mostrado na Figura 11. Pode-se considerar, como já mencionado, que os fios estejam igualmente espaçados.



**Figura 11: Seção Transversal do Eletroduto.**

É possível considerar o equivalente dessa topologia como uma linha de transmissão com dois fios paralelos [17]. As expressões para  $R$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  são descritas nas equações a seguir [16], onde:

$R$  - Resistência

$L$  - Indutância própria;

$C$  - Capacitância da linha;

$G$  - Condutância;

$\delta$  - Profundidade pelicular;

$f$  - Frequência do sinal;

$\mu_0$  - Permeabilidade magnética do vácuo;

$\mu_c$  - Permeabilidade do meio;

$\mu_r$  - Permeabilidade relativa;

$\epsilon$  - Permissividade do meio;

$D$  - Diâmetro do condutor;

$r$  - Raio interno do condutor.

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_c}{\sigma_c}} \quad (2.6)$$

$$L = \frac{\mu_r \cdot \mu_0}{\pi} \cosh^{-1}(D/2r) + \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (2.7)$$

$$C = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot \varepsilon}{\cosh^{-1}(D/2r)} \quad (2.8)$$

$$G = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \tan(\delta) \quad (2.9)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_c \cdot \sigma_c}} \quad (2.10)$$

Para faixa de frequência em banda larga, de 1MHz até 30MHz, é possível realizar as seguintes aproximações:

$$R \ll \omega L \quad (2.11)$$

$$G \ll \omega C \quad (2.12)$$

A constante de propagação, levando-se em conta as aproximações (2.11) e (2.12), fica da seguinte forma [11][16]:

$$\gamma = \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{Z_L} + \frac{1}{2} \cdot G \cdot Z_L + j \cdot \omega \cdot \sqrt{L \cdot C} \quad (2.13)$$

Sabe-se que a parte real da constante de propagação é a atenuação imposta pelo meio ao sinal, a parte imaginária é a constante de fase [11][16]. Portanto, a constante de atenuação pode ser vista da seguinte forma:

$$\alpha(f) = \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{Z_L} + \frac{1}{2} \cdot G \cdot Z_L \quad (2.14)$$

O termo  $\frac{R}{Z_L}$  representa o impacto do efeito *skin*, o qual denota tendência da corrente fluir na superfície do condutor elétrico, e o termo  $\frac{1}{2} \cdot G \cdot Z_L$  denota as perdas no dielétrico dentro do material isolante [11].

Levando-se em conta as equações (2.8) e (2.9), pode-se considerar:

$$R \sim \sqrt{f} \quad (2.15)$$

$$G \sim f \quad (2.16)$$

Logo, têm-se uma simplificação para a atenuação do canal:

$$\alpha(f) = k_1 \cdot \sqrt{f} + k_2 \cdot f \quad (2.17)$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes.

Através de experimentos, (2.17) pode ser considerada ainda mais simples:

$$\alpha(f) = a_0 + a_1 \cdot f^k \quad (2.18)$$

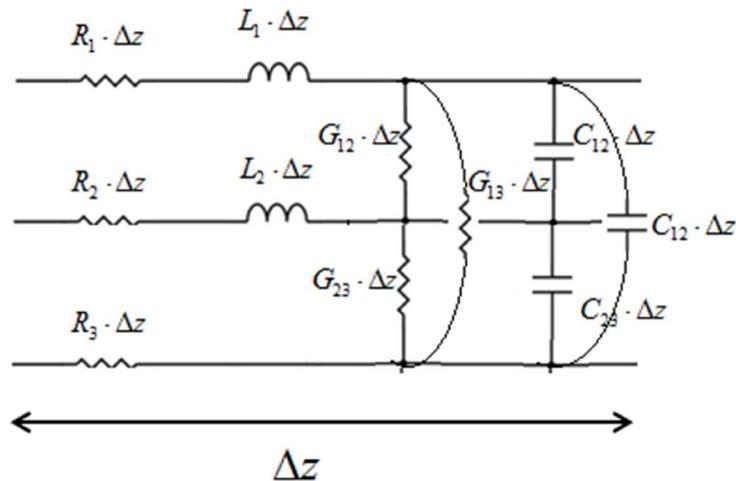
$a_0$ ,  $a_1$  e  $k$  são constantes, na qual os valores de  $k$  estão no intervalo entre 0,5 e 0,7 [11].

### **2.3 Caso Geral: Múltiplos condutores**

Nas seções 2.1 e 2.2 tratou-se do modelo de canal para um par de fios. Contudo, normalmente uma rede elétrica possui mais de um condutor tanto na rede interna como externa. Ou melhor, em uma rede interna a uma residência existem, pelo menos, três condutores dentro do eletroduto. No caso da rede de alimentação da rua há a rede de baixa com as três fases, o neutro e o terra.

Dessa forma, os cabos que não são usados para injeção de sinal, contribuem com capacitâncias, condutâncias e indutâncias. Logo, mesmo em cabos que não sejam injetados sinais, por indução, haverá propagação de corrente e tensão.

Na Figura 12, pode-se ver uma linha de transmissão com três fios paralelos. Percebe-se que com a introdução de apenas mais um fio em paralelo, será acrescentado a rede efeitos de condutância e capacitância representados por  $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $C_{12}$  e  $C_{23}$ . Dessa maneira, haverá alteração na impedância de entrada da rede e na atenuação que o sinal irá sofrer [20][22]. Além disso, pode-se entender como uma rede de múltiplas entradas e múltiplas saídas [23]. Ou seja, dependendo da fase que, injeta informação e do cabo de retorno, o sinal será exposto a funções transferência distintas.



**Figura 12: Elemento Infinitesimal para multicondutores de Linhas de Transmissão.**

## 2.4 Conclusões

Nesse capítulo foi discutido como a rede elétrica se comporta quando injetado sinal na faixa de 1MHz até 30MHz, usualmente empregada para transmissão de dados em banda larga. Devido às derivações existentes na rede, o sinal é espalhado em diversos multipercursos, sofrendo reflexões ao longo do seu percurso. Por conta disso, emprega-se o modelo de multipercurso com sucesso. Além disso, para esta faixa de frequência, a rede pode ser descritas com as equações clássicas de linhas de transmissão com o modo propagante TEM.

Além do mais, normalmente na rede existem mais de dois condutor, assim a teoria de linhas de transmissão para multicondutores pode ser aplicada. Dependendo da topologia da rede, quantidade de cabos ou cabo de injeção e recepção, se terá uma

resposta em frequência diferente. Portanto, o canal PLC pode ser visto com um canal MIMO, *Multiple-Input/Multiple-Output*, com múltiplas entradas e múltiplas saídas.

### 3. Grafo de Fluxos Aplicado ao PLC

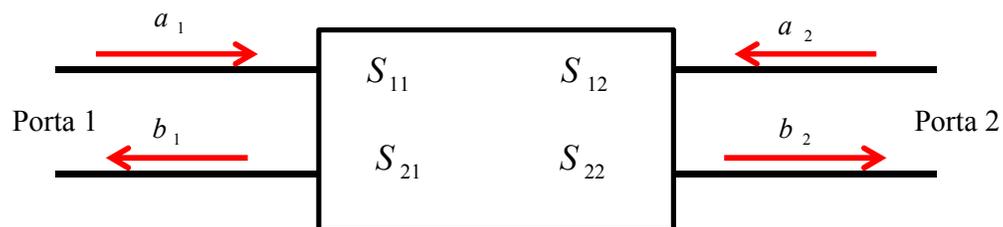
#### 3.1 Introdução ao Grafo de Fluxo

Trata-se de uma técnica bastante utilizada na análise de redes de micro-ondas na qual se leva em consideração as ondas transmitidas e refletidas [15]. A seguir, discute-se a construção do grafo de fluxos.

Os primeiros componentes dos grafos de fluxos são os nós e as derivações:

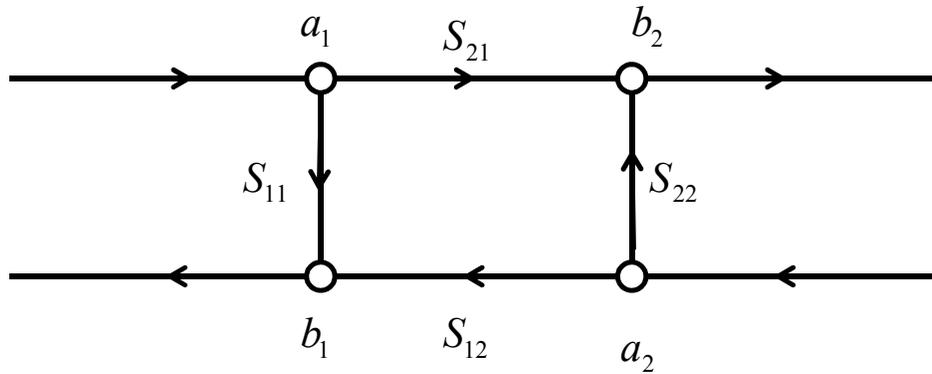
- Nós: Cada porta,  $i$ , de uma rede possui dois nós,  $a_i$  e  $b_i$ .  $a_i$  é identificado como uma onda entrando na porta  $i$ , enquanto  $b_i$  é identificado como a onda refletindo na porta  $i$ . A tensão no nó é igual à soma de todos os sinais entrando no nó;
- Derivações: Uma derivação é o caminho direto entre dois nós, representando o fluxo de sinal de um nó para outro. Toda derivação possui um parâmetro  $S$  associado ao coeficiente de reflexão.

Na Figura 13, pode ver a representação de uma rede de duas portas, com ondas incidentes  $a_i$  e  $b_i$ [19]:



**Figura 13: Parâmetros de espalhamento em uma rede de duas portas[15].**

Na porta 1, é visto as ondas incidentes  $a_1$  e refletida  $b_1$ , e na porta 2, as ondas incidentes  $a_2$  e refletidas  $b_2$ . A rede é caracterizada pela matriz de espalhamento  $S$ . A seguir, a Figura 14 mostra a correspondência da rede da Figura 13, utilizando grafo de fluxos [19]:



**Figura 14: Grafo de Fluxos em uma Rede de duas Portas.**

A onda incidente na porta 1,  $a_1$ , é espalhada, parte dela retorna através do caminho  $S_{11}$ , como a onda refletida  $b_1$ . Outra parte é transmitida através de  $S_{21}$ , como a onda transmitida  $b_2$ . Na porta 2, ocorre o mesmo.

Decomposição do grafo de fluxos:

Um grafo de fluxo de um sinal pode ser reduzido em um simples ramo entre dois nós, usando quatro simples passos para decomposição:

**Regra 1 (Regra em Serie):** Dois ramos, com nó comum pode ser combinado com um simples ramo, o qual o coeficiente é o produto dos ramos originais:

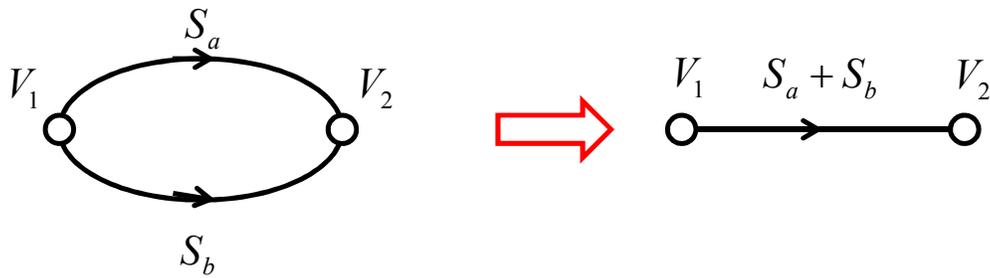


**Figura 15: Grafo de Fluxos em serie.**

Esta derivação segue da relação de que:

$$V_3 = S_{32} \cdot V_2 = S_{32} \cdot S_{21} \cdot V_1 \quad (3.1)$$

**Regra 2 (Regra paralela):** Dois ramos ligando dois nós comuns (ramos em paralelo), pode ser combinados em um único ramo cujo coeficiente é a soma dos coeficientes dos ramos originais.

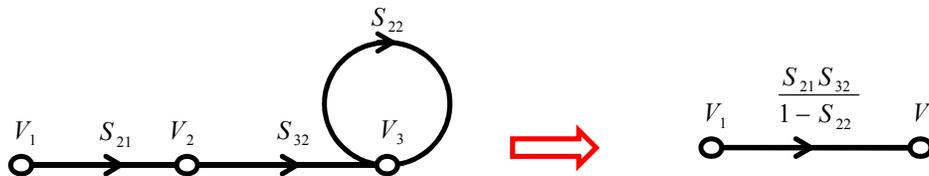


**Figura 16: Grafo de Fluxo em Paralelo.**

Esta derivação segue da relação de que

$$V_2 = (S_a + S_b) \cdot V_1 \quad (3.2)$$

**Regra 3 (Regra alto loop):** Quando um nó tem um alto-loop (um ramo que começa e termina no mesmo nó) de coeficientes, o alto-loop pode ser eliminado multiplicando coeficientes dos ramos que alimentam este nó por  $1/(1 - S)$ .



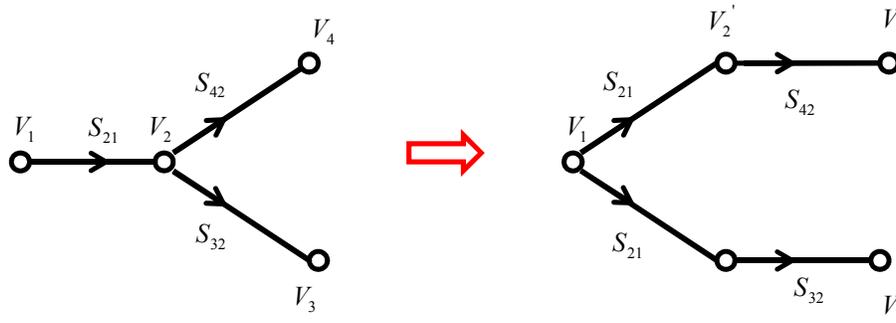
**Figura 17: Grafo de Fluxo com Laço.**

Eliminando  $V_2$  têm-se:

$$V_3 = \frac{(S_{32}S_{21})}{1 - S_{22}} \cdot V_1 \quad (3.3)$$

Que é a função transferência para o grafo reduzido da figura.

**Regra 4 (Regra divisão):** Um nó pode ser dividido em dois nós separados desde que o grafo de fluxo resultante contenha, uma vez e apenas uma vez, cada combinação de ramos separados de entradas e saídas que se conectem ao nó principal.



**Figura 18: Ilustração para Regra da Divisão.**

Esta regra é derivada de:

$$V_4 = S_{42} \cdot S_{21} \cdot V_1 \quad (3.4)$$

$$V_3 = S_{32} \cdot S_{21} \cdot V_1 \quad (3.5)$$

### 3.1.1 Regra de Mason

O valor de saída de uma rede causada pela entrada, pode ser encontrada usando a regra de *Mason*, descrita a seguir [15][19]:

$$T(s) = \frac{P_1 \cdot \Delta_1 + P_2 \cdot \Delta_2 + P_3 \cdot \Delta_3 + \dots}{\Delta} \quad (3.6)$$

Onde  $P_i$  é o ganho no  $i$ -ésimo caminho,

$$\Delta = 1 - \sum L(1) + \sum L(2) - \sum L(3) + \dots \quad (3.7)$$

$$\Delta_1 = 1 - \sum L(1)^{(1)} + \sum L(2)^{(1)} - \sum L(3)^{(1)} + \dots \quad (3.8)$$

$$\Delta_2 = 1 - \sum L(1)^{(2)} + \sum L(2)^{(2)} - \sum L(3)^{(2)} + \dots \quad (3.9)$$

$$\Delta_3 = 1 - \sum L(1)^{(3)} + \sum L(2)^{(3)} - \sum L(3)^{(3)} + \dots \quad (3.10)$$

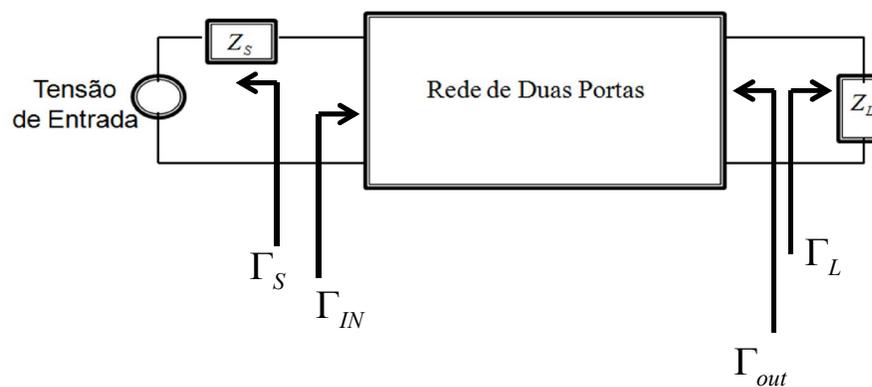
- $\sum L(1)$  - Representa a soma de todos os ganhos dos laços de primeira ordem;
- $\sum L(2)$  - Representa a soma de todos os ganhos dos laços de segunda ordem;
- $\sum L(1)^{(1)}$  - Representa a soma de todos os ganhos dos laços de primeira ordem que não tocam em nenhum nó do caminho 1;
- $\sum L(1)^{(2)}$  - Representa a soma de todos os ganhos dos laços de primeira ordem que não tocam em nenhum nó do caminho 2.

Ganho de laço de segunda Ordem: é o produto de dois laços de primeira ordem que não tocam em qualquer ponto;

Ganho de laço de terceira Ordem: é o produto de dois laços que não se tocam em nenhum ponto.

### 3.1.2 Ganho de Potência em Função de Grafo de Fluxos

Na Figura 19 pode ser visto uma rede de duas portas com fonte e carga na terminação. Essa rede de duas portas pode ser uma linha de transmissão com dois, três ou quatro fios, com ou sem derivações [19].



**Figura 19: Rede de duas portas com fonte e terminação.**

É possível representar a rede da Figura 19 em representação de grafo de fluxos. Assim, encontra-se o seu ganho de potência em função dos coeficientes de reflexão e parâmetros de espalhamento. A representação em função de grafo de fluxo é visualizada na Figura 20 [19]:

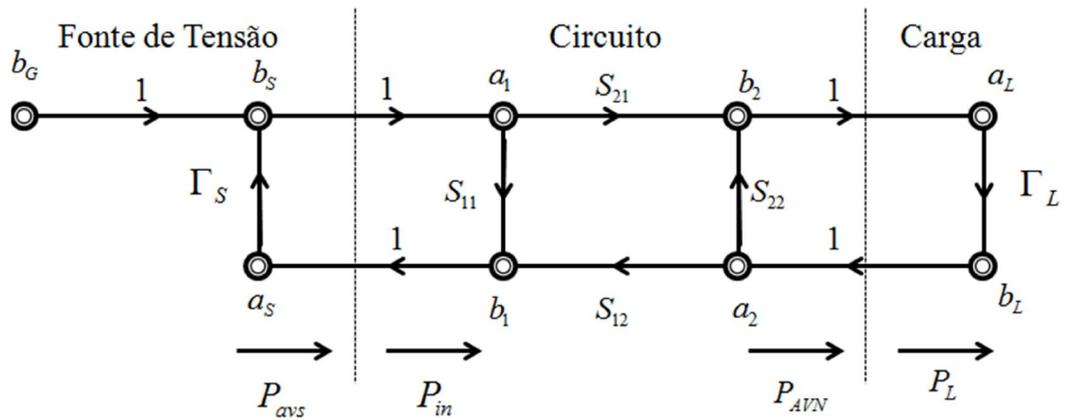


Figura 20: Representação de grafo de fluxo para uma rede de duas portas.

Onde:

$\Gamma_S$  - Coeficiente de reflexão na fonte;

$\Gamma_L$  - Coeficiente de reflexão na carga;

$\Gamma_{IN}$  - Coeficiente de reflexão na entrada;

$P_{avs}$  - Potência média entregue pela fonte;

$P_{in}$  - Potência de entrada no circuito;

$P_{AVN}$  - Potência média saída da rede.

Dessa forma, a potência média entregue pela fonte é igual a potência de entrada, quando o coeficiente de reflexão de entrada for igual ao complexo conjugado do coeficiente da fonte. Logo [19]:

$$P_{avs} = P_{IN} \Big|_{\Gamma_{IN} = \Gamma_S^*} \quad (3.11)$$

De maneira similar, a potência média saída da rede será igual à potência na carga se o coeficiente de reflexão da carga for igual ao complexo conjugado do coeficiente de reflexão de saída [19]:

$$P_{AVN} = P_L \Big|_{\Gamma_L = \Gamma_{out}^*} \quad (3.12)$$

De maneira geral, a máxima transferência de potência ocorre quando o coeficiente de reflexão na carga é o conjugado do coeficiente de reflexão na fonte, como mostrado [19]:

$$\Gamma_L = \Gamma_S^* \quad (3.13)$$

Isso pode ser generalizado para qualquer porta da rede. Na porta de entrada, por exemplo, isso ocorre se o coeficiente de reflexão de entrada for o complexo conjugado do coeficiente de reflexão da fonte [19]:

$$\Gamma_{IN} = \Gamma_S^* \quad (3.14)$$

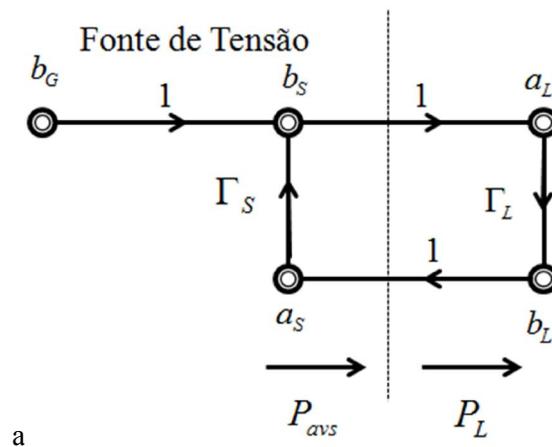
Ganho transdutivo de Potência:

$$G_T = \frac{P_L}{P_{avs}} \quad (3.15)$$

Para encontrar a relação do ganho, deve-se, primeiro, encontrar a potência entregue à carga e à potência média entregue a fonte [19]:

$$P_L = |a_L|^2 - |b_L|^2 = |a_L|^2(1 - |\Gamma_L|^2) = |b_2|^2(1 - |\Gamma_L|^2) \quad (3.16)$$

Para a potência entregue a carga, será avaliado o grafo de fluxo abaixo:



**Figura 21: Grafo de Fluxo Para Cálculo de Potência na Carga.**

Potencia média entregue a carga:

$$P_{avs} = |b_s|^2 - |a_s|^2 \quad (3.17)$$

Pelo grafo de fluxo, da Figura 21 têm-se:

$$b_s = b_G + \Gamma_S \cdot a_s \quad (3.18)$$

$$b_s = b_G + \Gamma_S \cdot b_L \quad (3.19)$$

$$b_s = b_G + \Gamma_S \cdot \Gamma_L \cdot a_L \quad (3.20)$$

$$b_s = b_G + \Gamma_S \cdot \Gamma_L \cdot b_s \Rightarrow b_s = \frac{b_G}{1 - \Gamma_S \cdot \Gamma_L} \quad (3.21)$$

Além disso:

$$a_s = \frac{1}{\Gamma_S} (b_s + b_G) = \frac{1}{\Gamma_S} \left( \frac{b_G}{1 - \Gamma_S \cdot \Gamma_L} - b_G \right) \quad (3.22)$$

$$a_s = \frac{\Gamma_L \cdot b_G}{1 - \Gamma_S \cdot \Gamma_L} \quad (3.23)$$

Usando (3.21) e (3.23) em (3.17), têm-se:

$$P_d = \left| \frac{b_G}{1 - \Gamma_S \cdot \Gamma_L} \right|^2 - \left| \frac{\Gamma_L \cdot b_G}{1 - \Gamma_S \cdot \Gamma_L} \right|^2 \quad (3.24)$$

$$P_d = \left| \frac{b_G}{1 - \Gamma_S \cdot \Gamma_L} \right|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2) = P_L \quad (3.25)$$

Para que a potência entregue a carga seja máxima, deve-se obedecer a seguinte condição:

$$\Gamma_L = \Gamma_S^* \quad (3.26)$$

Com algumas manipulações, chega-se a:

$$Z_L = Z_S^* \quad (3.27)$$

O valor da potência máxima entregue a carga é [19]:

$$P_L = \frac{|b_G|^2}{(1 - |\Gamma_S|^2)} = P_{avs} \quad (3.28)$$

O ganho de potência ou atenuação de uma rede de duas por pode ser definido de três diferentes maneiras, como segue abaixo [19]:

$$G_T = \frac{P_L}{P_{avs}} \quad (3.29)$$

$$G_P = \frac{P_L}{P_{in}} \quad (3.30)$$

$$G_A = \frac{P_{AVN}}{P_{avs}} \quad (3.31)$$

- **Ganho Transdutivo**

Desenvolvendo a equação (3.29). A princípio, é encontrada a expressão para  $P_L$ , logo [19]:

$$P_L = |a_L|^2 + |b_L|^2 = |a_L|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2) = |b_2|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2) \quad (3.32)$$

Substituindo as equações (3.28) e (3.32) na equação (3.29). Encontra-se a expressão para o ganho:

$$G_T = \frac{|b_2|^2}{|b_G|^2} \cdot (1 - |\Gamma_L|^2) \cdot (1 - |\Gamma_S|^2) \quad (3.33)$$

Agora, é possível utilizar a regra de *Mason* para achar a expressão  $b_2/b_G$ . Existe, apenas, um caminho direto, nesse caso. Dessa forma, há três laços. Por *Mason*, têm-se:

$$\frac{b_2}{b_G} = \frac{P_1}{1 - (L_1 + L_2 + L_3) + L_1 \cdot L_2} \quad (3.23)$$

O caminho direto é  $P_1$  e os laços são  $L_i$ :

$$P_1 = S_{21} \quad (3.24)$$

$$L_1 = S_{11} \cdot \Gamma_S \quad (3.25)$$

$$L_2 = S_{22} \cdot \Gamma_L \quad (3.26)$$

$$L_3 = S_{12} \cdot S_{21} \cdot \Gamma_S \cdot \Gamma_L \quad (3.27)$$

Substituindo as equações (3.24) – (3.27), na expressão para o ganho (3.23), obtêm-se:

$$\frac{b_2}{b_G} = \frac{S_{21}}{1 - (S_{11} \cdot \Gamma_S + S_{22} \cdot \Gamma_L + S_{21} \cdot \Gamma_L \cdot S_{12} \cdot \Gamma_S) + S_{11} \cdot \Gamma_S \cdot S_{22} \cdot \Gamma_L} \quad (3.28)$$

Voltando para a expressão do ganho transdutivo:

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2) \cdot (1 - |\Gamma_S|^2)}{|1 - (S_{11} \cdot \Gamma_S + S_{22} \cdot \Gamma_L + S_{21} \cdot \Gamma_L \cdot S_{12} \cdot \Gamma_S) + S_{11} \cdot \Gamma_S \cdot S_{22} \cdot \Gamma_L|^2} \quad (3.29)$$

Simplificando:

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2) \cdot (1 - |\Gamma_S|^2)}{|(1 - S_{11} \cdot \Gamma_S) \cdot (1 - S_{22} \cdot \Gamma_L) - S_{21} \cdot S_{12} \cdot \Gamma_L \cdot \Gamma_S|^2} \quad (3.30)$$

Ou

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2) \cdot (1 - |\Gamma_S|^2)}{\left| (1 - S_{22} \cdot \Gamma_L) \cdot \left[ 1 - \Gamma_S \cdot \left( S_{11} - \frac{S_{21} \cdot S_{12} \cdot \Gamma_L}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_L} \right) \right] \right|^2} \quad (3.31)$$

Simplificando, ainda mais, a expressão (3.31), chega-se a :

$$G_T = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - \Gamma_{in} \cdot \Gamma_S|^2} \cdot |S_{21}|^2 \cdot \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22} \cdot \Gamma_L|^2} \quad (3.32)$$

Onde

$$\Gamma_{in} = S_{11} - \frac{S_{21} \cdot S_{12} \cdot \Gamma_L}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_L} \quad (3.33)$$

De maneira similar:

$$G_T = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - S_{11} \cdot \Gamma_S|^2} \cdot |S_{21}|^2 \cdot \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - \Gamma_{out} \cdot \Gamma_L|^2} \quad (3.34)$$

Onde

$$\Gamma_{out} = S_{22} - \frac{S_{21} \cdot S_{12} \cdot \Gamma_S}{1 - S_{11} \cdot \Gamma_S} \quad (3.35)$$

- **Ganho de Operação**

Através do grafo de fluxo da Figura 20, é encontrado a expressão para a potência de entrada:

$$P_{in} = |a_1|^2 - |b_1|^2 = |a_1|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{in}|^2) \quad (3.36)$$

Logo, utilizando (3.30), verifica-se:

$$G_P = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{|b_2|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2)}{|a_1|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{in}|^2)} \quad (3.37)$$

Novamente, utilizando a Regra de *Mason* para encontrar a relação  $b_2/a_1$ .

Existe, apenas, um caminho direto,  $S_{21}$ , e um laço,  $S_{22} \cdot \Gamma_L$ . Portanto, pode-se escrever:

$$\frac{b_2}{a_1} = \frac{S_{21}}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_L} \quad (3.38)$$

Substituindo na expressão (3.37):

$$G_P = \frac{1}{1 - |\Gamma_{in}|^2} \cdot |S_{21}|^2 \cdot \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22} \cdot \Gamma_L|^2} \quad (3.39)$$

- **Ganho Disponível**

O ganho disponível para a carga é igual ao ganho máximo absolvido pela carga, ou seja, valor máximo de  $P_L$ . Isso ocorre caso seja satisfeita a seguinte condição:

$$\Gamma_L = \Gamma_{out}^* \quad (3.40)$$

Dessa maneira,

$$P_{AVN} = P_L|_{\Gamma_L = \Gamma_{out}^*} = |b_2|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2) = |b_2|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{out}|^2) \quad (3.41)$$

Pela expressão (3.31), obtêm-se o ganho:

$$G_A = \frac{P_{AVN}}{P_{avs}} = \frac{|b_2|^2}{|b_G|^2} \cdot (1 - |\Gamma_{out}|^2) \cdot (1 - |\Gamma_S|^2) \quad (3.42)$$

Utilizando a Regra de *Mason* para encontrar  $\frac{b_2}{b_G}$ , chega-se a:

$$\frac{b_2}{b_G} = \frac{S_{21}}{1 - (S_{11} \cdot \Gamma_S + S_{22} \cdot \Gamma_L + S_{21} \cdot \Gamma_L \cdot S_{12} \cdot \Gamma_S) + S_{11} \cdot \Gamma_S \cdot S_{22} \cdot \Gamma_L} \quad (3.43)$$

$$\frac{b_2}{b_G} = \frac{S_{21}}{(1 - S_{11} \cdot \Gamma_S) \cdot (1 - \Gamma_{out} \cdot \Gamma_L)} \quad (3.44)$$

Além disso, utilizando a condição de máxima potência incidente na carga:

$$\frac{b_2}{b_G}|_{\Gamma_L = \Gamma_{out}^*} = \frac{S_{21}}{(1 - S_{11} \cdot \Gamma_S) \cdot (1 - |\Gamma_{out}|^2)} \quad (3.45)$$

Voltando a equação (3.42):

$$G_A = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - S_{11} \cdot \Gamma_S|^2} \cdot |S_{21}|^2 \cdot \frac{1}{1 - |\Gamma_{out}|^2} \quad (3.46)$$

Este capítulo descreveu os parâmetros de rede, tais como parâmetros de espalhamento, parâmetros de impedância e parâmetros ABCD. Sendo formulada a expressão do ganho em função dos parâmetros ABCD. Em seguida, foi encontrada o ganho de potência de uma rede de duas portas, utilizando a técnica de grafo de fluxo.

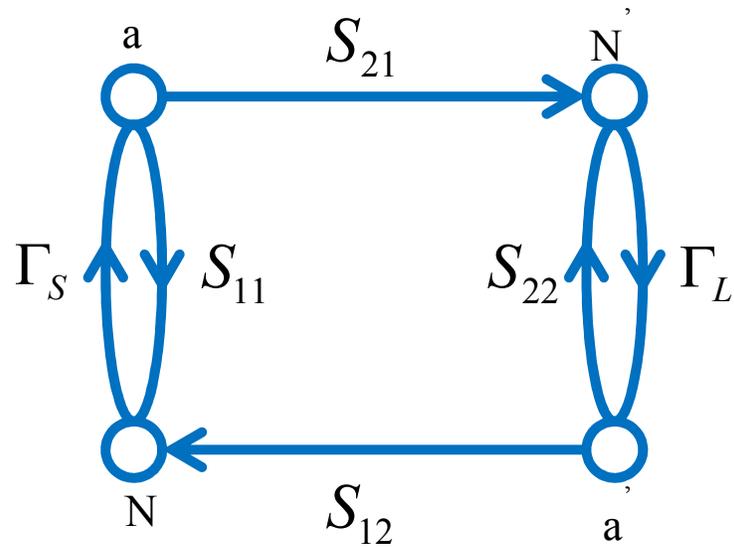
Através dessa técnica, chegou a três expressões distintas para o ganho [10]:

- Ganho Transdutivo: Relaciona a transferência de potência direta da fonte para carga;
- Ganho Operacional: Associa a potência que entra no circuito e chega à carga;
- Ganho Disponível: Razão entre a potência média que entra na rede com a potência que sai da rede.

### **3.2 Modelagem do Canal PLC através Grafo de Fluxo**

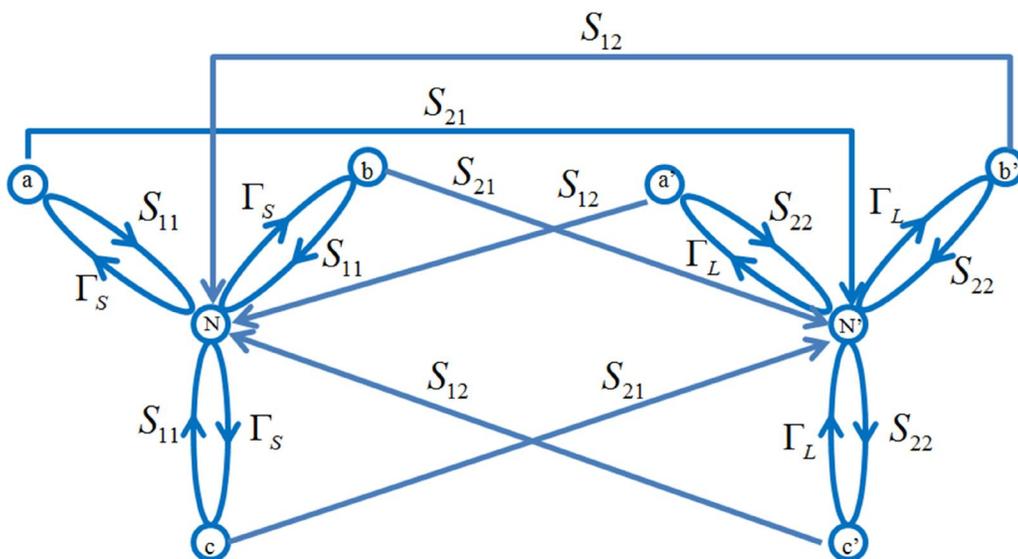
A malha da rede elétrica possui inúmeras derivações, por conta disso existem descasamentos ao longo do percurso entre o transmissor e receptor de informação. Esses descasamentos geram reflexões e o sinal no receptor será o somatório de  $n$  sinais, provenientes de  $n$  percursos diferentes [11].

Uma rede elétrica com uma fase e um neutro pode ser modelada utilizando grafo de fluxo como mostrado na Figura 22. Na fonte de informação, a-N, a porção do sinal transmitida representa-se por  $S_{21}$ , o retorno é representado pelo  $S_{11}$  e  $\Gamma_S$ . O receptor, a'-N', com as reflexões sendo representadas por  $S_{22}$  e  $\Gamma_L$  [5].



**Figura 22: Grafo de Fluxo de uma Rede Elétrica de uma Fase.**

Supondo, agora, uma rede trifásica, o grafo de fluxo pode ser representado como mostrado na Figura 23. Onde, existem três fases a, b e c, onde os sinais saem para o receptor a', b' e c'. Nessa situação, a rede não possui derivações, portanto, só existem reflexões na fontes e na carga, ou seja, transmissor e receptor. Caso, houvesse derivações, como é o natural, o sinal sofreria mais reflexões ao longo do percurso [5].



**Figura 23: Grafo de Fluxo para uma Rede Elétrica Trifásica.**

A teoria de grafo de fluxo representa claramente como o sinal de informação trafega na rede elétrica. Através desta técnica é possível encontrar a função transferência, levando em consideração as reflexões na fonte e no receptor.

Além disso, a Figura 23, o diagrama elétrico não possui derivações. Entretanto, a rede elétrica pode sofrer mudanças, derivações poderão ser colocadas ao longo da rede. Essas derivações provocam novas reflexões inesperadas na transmissão de informação. Assim, Grafo de Fluxo pode ser usado para prever o comportamento do canal com eventuais mudanças na rede elétrica.

### **3.3 Conclusões**

Nesse capítulo, introduziu-se a teoria de Grafo de Fluxo e sua utilização em linhas de transmissão. Em seguida, através da Regra de *Mason* encontrou-se o ganho de potência transdutivo.

Além disso, essa teoria foi proposta como uma alternativa para a modelagem da rede elétrica para transmissão de informação. Visto que esse meio possui inúmeras reflexões, as quais promovem laços na rede. Dessa maneira, o Grafo de Fluxo torna-se uma maneira atrativa para modelar uma malha elétrica com diversas derivações e bastante complexa.

No capítulo seguinte, serão mostrados resultados experimentais, com aplicação da teoria de Grafo de Fluxo a Rede Elétrica.

## **4. Resultados Experimentais**

### **4.1 Introdução**

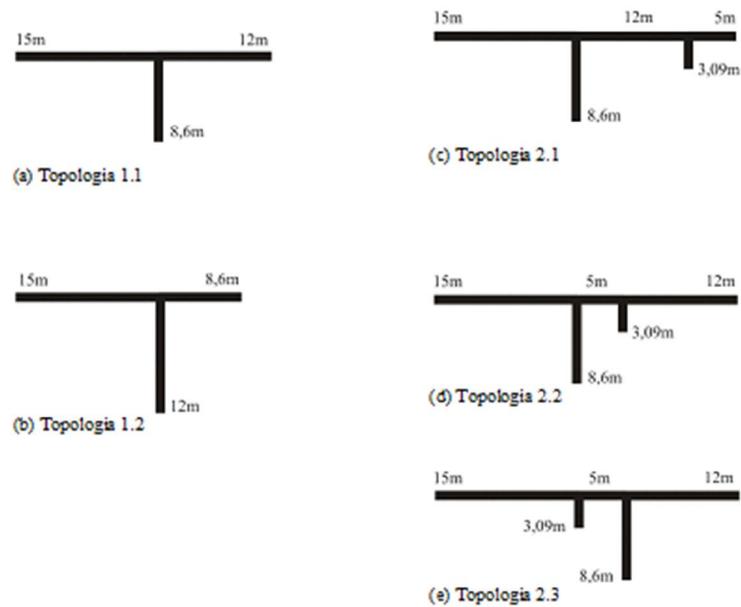
Nesse capítulo, serão apresentados experimentos realizados para comprovar a viabilidade do uso de Grafo de Fluxos para modelagem do canal PLC.

A princípio, serão realizados testes em cabos coaxiais, devido a sua imunidade a interferências externas e facilidade de manuseio. Além do mais, com esses cabos é possível colocar derivações, as quais provocarão reflexões ao longo do percurso da rede. Em seguida, medições em uma rede elétrica serão apresentadas e, em ambos os casos, é encontrado o ganho transdutivo da rede elétrica.

### **4.2 Experimentos com 2 Condutores**

A importância de utilizar os cabos se deve ao fato de se conhecer precisamente os comprimentos e impedância característica desses condutores. Os cabos coaxiais utilizados possuem impedância característica de  $50 \Omega$ . Os parâmetros de espalhamento foram medidos utilizando o Analisador de Redes Vetorial.

Foram avaliadas as topologias descritas na Figura 24, em (a) e (b) a rede possui apenas uma derivação, (c), (d) e (e) a rede possui duas derivações.



**Figura 24: Topologias com cabos coaxiais avaliadas.**

Na Figura 25, é mostrado como foi feita a medição com o Analisador de Redes Vetorial, Agilent ENA Series E5071B. Nessa situação é visualizada a topologia com apenas uma derivação. Com duas derivações, o procedimento é análogo.



**Figura 25: Medição Realizada com Analisador de Redes**

O analisador de redes foi calibrado para a faixa de frequência de 1MHz até 50 MHz, utilizando cabos tipo N.

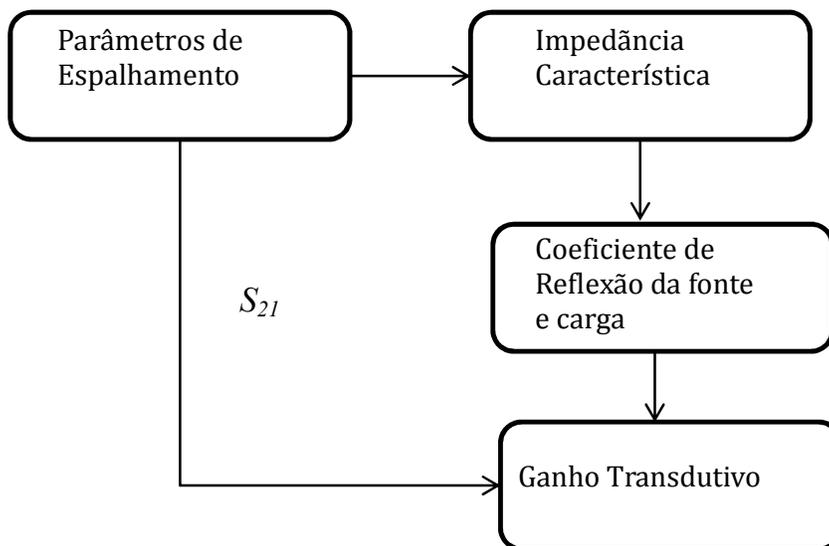
Como a saída do analisador de redes é tipo N macho, foi utilizada uma linha de transmissão N fêmea seguida de um adaptador N macho para BNC. Para inserir a derivação foi introduzido um divisor de potência BNC, no qual foram ligados uma derivação e outro cabo coaxial, em serie. Esse último foi ligado, através de adaptadores, ao cabo que vai para a porta dois do Analisador de Redes.

Com o analisador de redes foi obtido os parâmetros de espalhamento de cada topologia descrita.

#### 4.2.1 Resultados e Análise

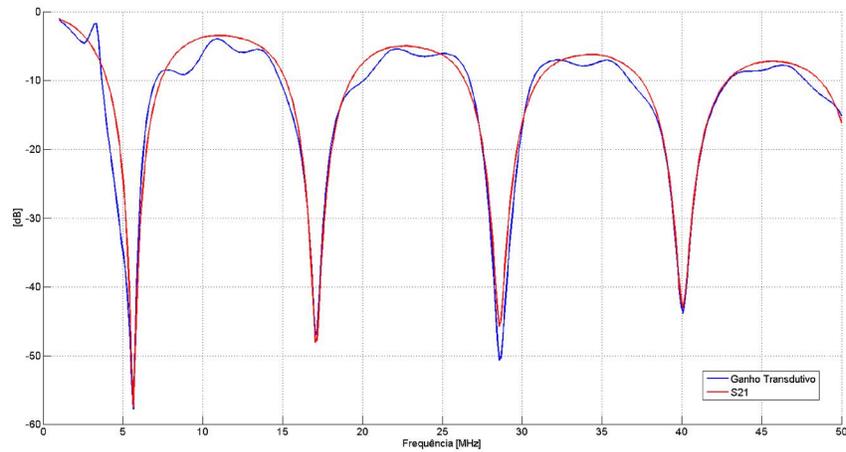
Como mostrado na Figura 25, utilizando o analisador de redes, foram extraídos os parâmetros de espalhamento da rede e calculado o ganho transdutivo com base na equação (3.32), esse resultado foi comparado com o parâmetro  $S_{21}$ .

O calculo do ganho transdutivo pode ser representado no fluxograma da Figura 26:



**Figura 26: Fluxograma Representativo do calculo do Ganho transdutivo.**

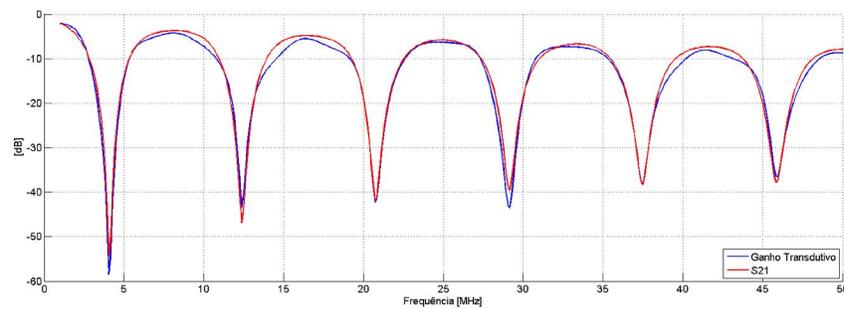
Na Figura 27, pode ser visualizado o ganho transdutivo e o  $S_{21}$  para a topologia 1.1, a qual possui uma derivação. Como o Analisador de Redes foi devidamente calibrado, o ganho transdutivo é próximo do  $S_{21}$ , pois as reflexões são minimizadas nesse processo.



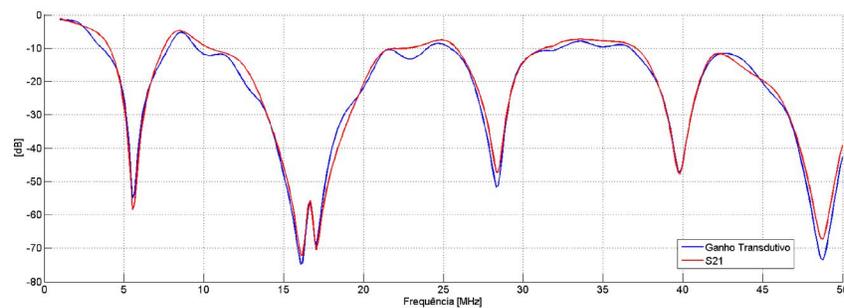
**Figura 27: Comparação entre o ganho transdutivo e  $S_{21}$  para a Topologia 1.1.**

O sinal percorre dois percursos, tendo, portanto, a função transferência o comportamento similar ao de um interferômetro. Ou melhor, o sinal é dividido em dois e sem seguida são submetidos a atrasos distintos, dependendo a frequência, quando estão em fase os sinais se somam, em oposição de fase, os sinais se subtraem, formando os nulos e máximos de potência.

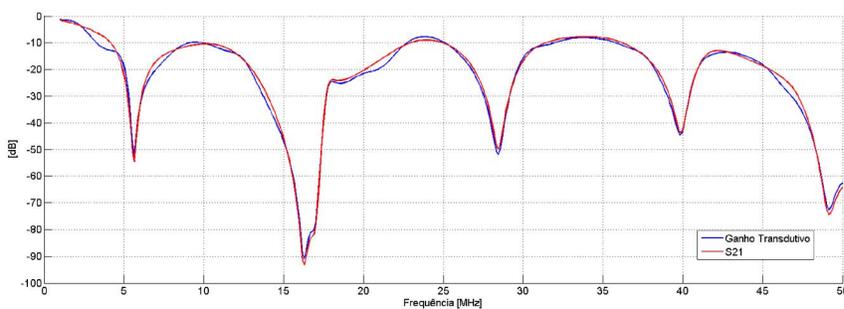
Nas Figura 28- Figura 31, são mostrados os resultados para as demais topologias. Novamente, o ganho transdutivo aproxima-se do  $S_{21}$ .



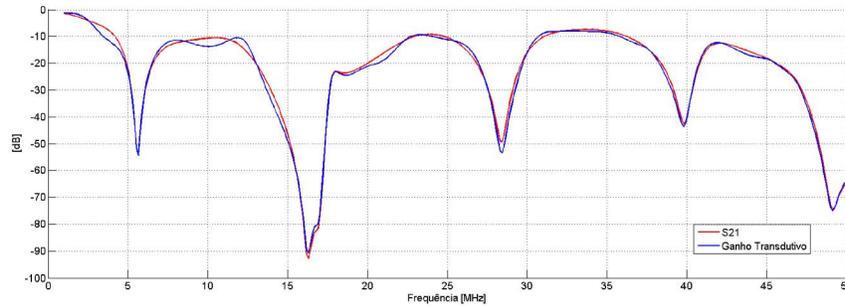
**Figura 28: Comparação entre o Ganho Transdutivo e  $S_{21}$  para a Topologia 1.2.**



**Figura 29: Comparação entre o Ganho Transdutivo e  $S_{21}$  para a Topologia 2.1.**



**Figura 30: Comparação entre o Ganho Transdutivo e  $S_{21}$  para a Topologia 2.2.**



**Figura 31: Comparação entre o Ganho Transdutivo e  $S_{21}$  para a Topologia 2.3.**

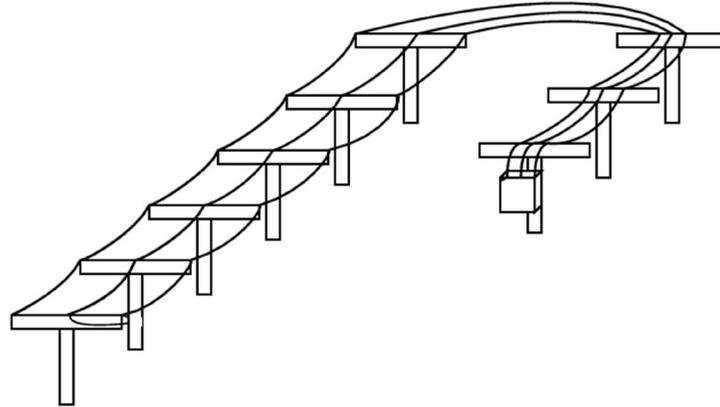
As pequenas diferenças entre o Ganho Transdutivo e o  $S_{21}$  deve-se ao fato de que os coeficientes de reflexão na fonte e na carga não são nulos.

Os gráficos mostrados nas Figuras 30 e 31 possuem os mesmos comportamentos, pois as derivações e caminhos diretos possuem o mesmo comprimento. Dessa maneira, os sinais divididos são submetidos aos mesmos atrasos e atenuações.

### 4.3 Experimentos com Múltiplos Condutores

#### 4.3.1 IFPE Pesqueira

Foram realizadas medições em uma rede de teste no IFPE, Instituto Federal de Pernambuco, *campus* Pesqueira. Trata-se de uma rede para treinamento de estudantes de Técnico em Eletrotécnica. Na Figura 32, pode ser vista a rede elétrica de pesqueira. Trata-se de uma rede em U, a qual possui oito postes, cada um distando entre si, cinco metros. A rede não se esta energizada, tendo dois 2 metros de altura, sendo de fácil acesso. A distância entre os cabos de média tensão é de 2,3 metros, são cabos de alumínio com bitola de 3/8”.



**Figura 32: Rede Elétrica de Teste no IFPE Pesqueira.**

Na Figura 33, pode-se ver uma foto da rede elétrica do IFPE de pesqueira, que possui duas linhas. Uma de média tensão, na parte superior e outra de baixa tensão, mostrada na parte de baixo.



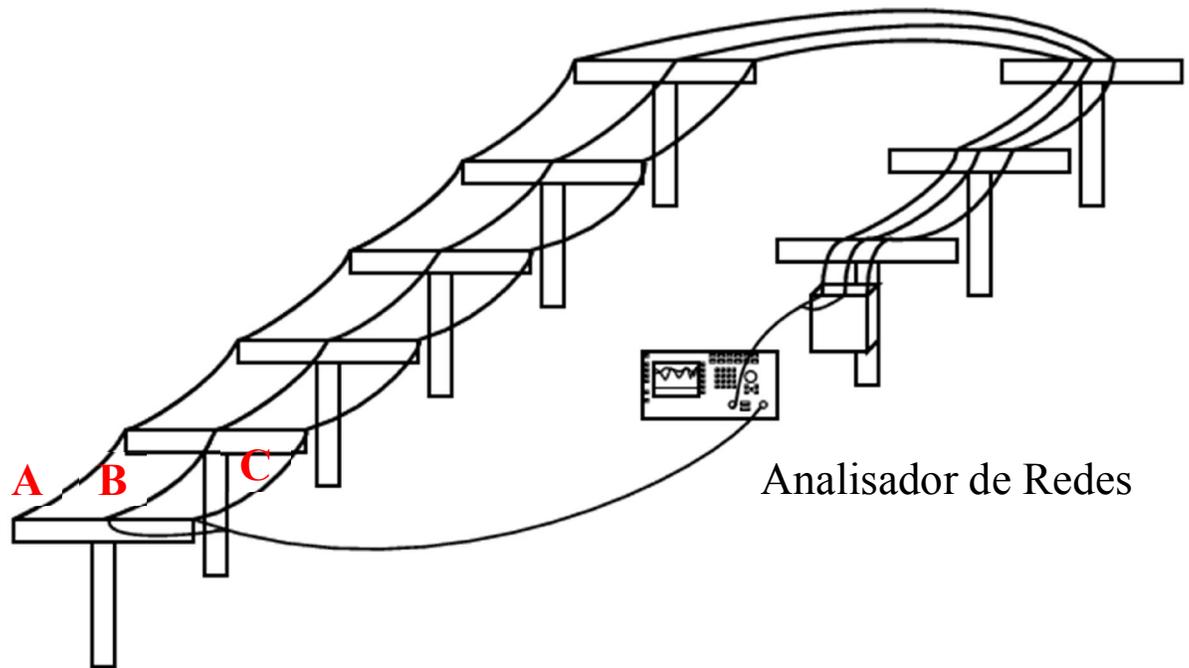
**Figura 33: Foto de um trecho da rede elétrica de Pesqueira.**

Uma visão lateral da rede pode ser vista na Figura 34, trata-se de uma das pontas da rede.



**Figura 34: Foto Lateral da Rede Elétrica de Pesqueira.**

O analisador de redes portátil *R&S®ZVL Vector Network Analyzer 9kHz - 6GHz* foi utilizado para realizar as medições. Na Figura 35, pode ser visto a medição que foi realizada na rede de testes do IFPE de Pesqueira. A rede de média tensão possui três fases, A, B e C.



**Figura 35: Medição Realizada na Rede de Testes no IFPE Pesqueira.**

Mediu-se os parâmetros de espalhamento e os parâmetros de impedância da rede elétrica da topologia mostrada na Figura 35, onde as entradas são os fios mais internos a rede de transmissão, ou seja, as fases B e C. Através desses parâmetros, calculou-se o Ganho Transdutivo da rede elétrica. Além disso, também calculou-se a função transferência utilizando os parâmetros ABCD, o qual já foi utilizado antes para o canal PLC [17].

Com os parâmetros de impedância foi encontrado a impedância característica da linha e a impedância de entrada, através das equações [15]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{B}{C}} \quad (4.1)$$

$$Z_{en} = \frac{Z_L \cdot A + B}{Z_L \cdot C + D} \quad (4.2)$$

Onde,

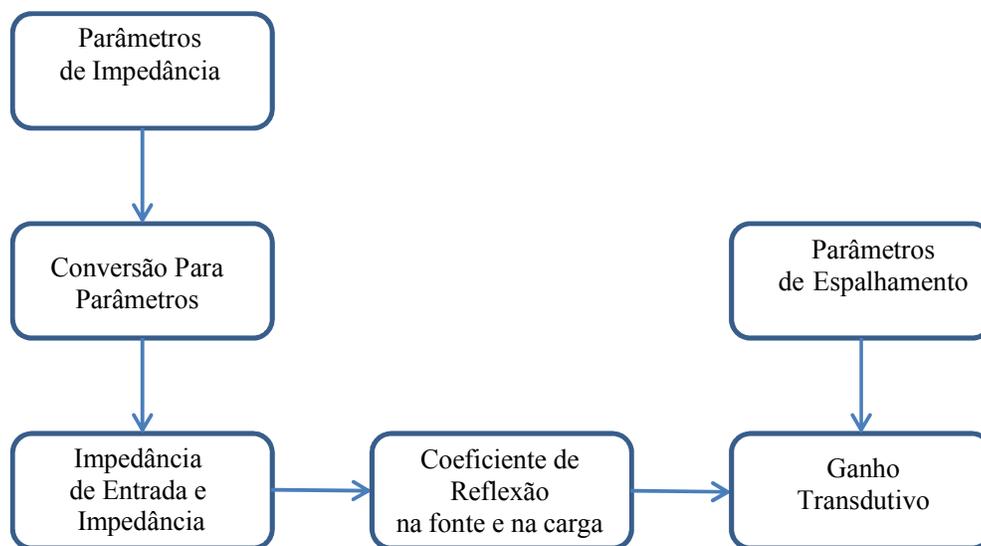
$Z_0$  - Impedância Característica;

$Z_{en}$  - Impedância de Entrada.

Possuindo esses valores, é possível aplicar a equação do Ganho Transdutivo (3.34) utilizando grafo de fluxo e a Regra de Mason.

Através do *software Matlab* foi desenvolvido um programa que calcula a função transferência ou ganho transdutivo, dado pela equação (3.34).

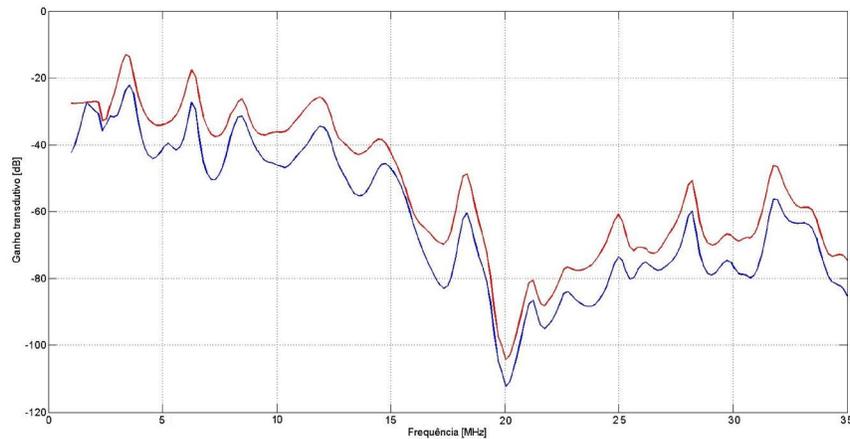
Com os parâmetros de impedância extraídos das medições, calcula-se os parâmetros ABCD e a impedância de entrada e característica, fazendo uso das equações (4.1) e (4.2). Em seguida, calcula-se os coeficientes de reflexão na fonte e na carga. Com esses resultados e os parâmetros de espalhamentos medidos é extraído o ganho transdutivo da rede. Os passos que foram seguidos no programa estão descritos no fluxograma da Figura 36:



**Figura 36: Fluxograma descritivo do programa.**

Também calculou-se a função transferência utilizando a equação (1.12), e foi comparada com o ganho transdutivo, a primeira expressão já foi comparada com resultados experimentais com sucesso [18].

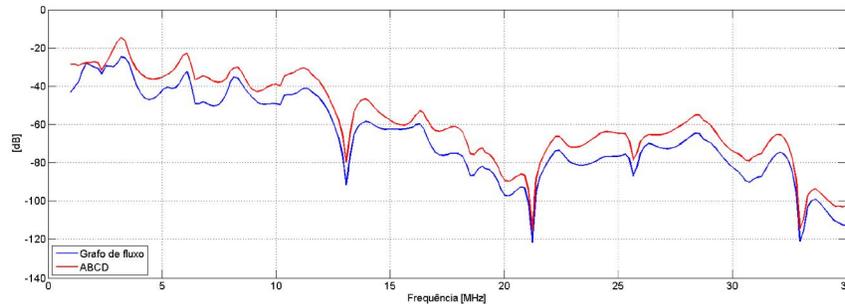
Através da medição realizada e mostrada na Figura 35, o Ganho Transdutivo e a função transferência utilizando os parâmetros ABCD são comparadas na Figura 37:



**Figura 37: Medição da Rede de Média Tensão Pesqueira das Fases B e C.**

Percebe-se que o Ganho Transdutivo obtido utilizando a teoria de grafo de fluxo e a regra de *Mason* apresenta um comportamento similar a teoria utilizada classicamente para modelar linhas de transmissão e o canal PLC [18]. As diferenças existentes entre os dois modelos, deve-se ao fato de que parte da potência é induzida no terceiro fio. Assim, para uma aproximação mais extada, é necessário considerar-se uma rede de três entradas, ao invés de duas para o calculo do ganho transdutivo.

Também foi realizado medições com os cabos mais externos a rede, isto é, as fases A e B. Novamente, foram extraídos os parâmetros de impedância e espalhamento e realizado o mesmo procedimento para a topologia anterior.



**Figura 38: Medição da Rede de Média Tensão Pesqueira das Fases A e B.**

Como aconteceu nas fases B e C, para as fases A e B o Ganho Transdutivo possui comportamento similar a função transferência obtida com os parâmetros ABCD. Entretanto, são formados mais dois nulos, e o nulo que ocorria em 20MHz é deslocado. Isso é justificado pela alteração na topologia e, com isso, modificação nos efeitos capacitivos e indutivos causados pelo condutor não utilizado para tráfego de informação .

#### **4.4 Conclusões**

Com os experimentos utilizando cabos coaxiais mostrou-se que o ganho transdutivo pode ser usado para cálculo da função transferência de uma rede com derivações. Representando mais claramente o comportamento da rede, pois não ignora reflexões na fonte e na carga. Dessa maneira, no caso de rede mais complexas, ele poderá antever comportamentos, em eventuais mudanças de topologia, pois com a mudança da impedância de entrada, haverá alteração nas reflexões. Portanto, esse resultado indica a viabilidade do uso dessa técnica.

Além disso, foram realizadas medições em uma rede elétrica real. Dessa vez o ganho transdutivo foi comparado com a função transferência utilizando parâmetros ABCD [17][18]. Mais uma vez, o ganho transdutivo mostrou-se eficiente e com comportamento correspondente a teoria clássica.

## 5. Conclusões, Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusão

Nesse trabalho, foi mencionado a importância da rede elétrica no desenvolvimento humano. Além disso, descreveu-se a sua evolução e no novo momento o qual ela se encontra.

Nesse novo momento, surgiu o conceito *Smart Grids* [1] que pode ser descrita como uma rede elétrica com comunicação digital bidirecional entre o fornecedor e o consumidor, medição inteligente e sistemas de monitoramento.

Os benefícios das redes inteligentes são amplamente reconhecidos. *Smart Grids* podem gerenciar a interação direta e de comunicação entre os consumidores, famílias ou empresas, outros usuários da rede e fornecedores de energia. Ela abre possibilidades inéditas para os consumidores controlar e gerenciar diretamente os seus padrões de consumo individuais, proporcionando, por sua vez, fortes incentivos para o uso de energia eficiente se combinado com tempo-dependente dos preços da eletricidade. Assim, a melhoria da gestão da rede se traduz em uma malha elétrica mais segura e mais barata para operar.

Como mencionado anteriormente, diversas tecnologias podem ser usadas para automatizar sistemas de distribuição de rede elétrica. Tais como *Zig bee*, antenas inteligentes, redes *wireless* em geral e a rede elétrica como meio físico de transmissão. Esta última denominada de PLC, *Power Line Communication*.

Esse trabalho, abordou os modelos matemáticos que descrevem o comportamento da rede elétrica quando utilizada para transmissão de dados. Foi mencionado modelos clássicos para aplicados para essa tecnologia [11][17][18].

Também discutiu-se a “teoria de grafo de fluxo” e sua utilização como alternativa para aplicação na caracterização e modelagem de redes elétricas. Medidas experimentais em cabos coaxiais e rede elétrica foram realizadas.

Através das medições com cabos coaxiais comprovou-se a eficácia do uso dessa técnica. As medições com cabos coaxiais comprovaram que é possível modelar com Grafo de Fluxo uma rede a partir dos parâmetros de espalhamento.

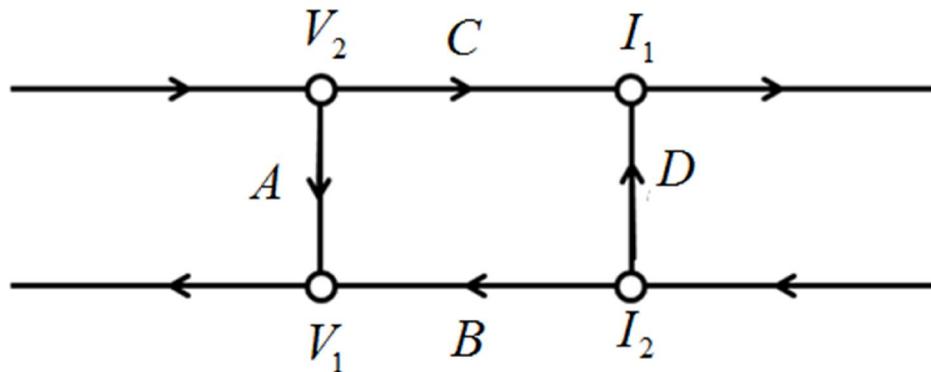
Além disso, as medições utilizando a rede elétrica do IFPE de Pesqueira comprovaram que a nova teoria é compatível com o modelo de transmissão utilizando parâmetros ABCD. Dessa forma, como o Ganho Transdutivo funciona

bem para redes elétricas sem derivação, isso indica a real possibilidade do seu funcionamento e previsão de comportamento para malhas elétricas mais complexas com inúmeras derivações e cargas ligadas a rede, de maneira que possa prever o comportamento da função transferência quando são realizadas alterações na topologia da rede.

Portanto, esse trabalho traz como contribuição a comprovação experimental que a teoria de grafo de fluxo pode ser aplicada a redes elétricas na modelagem, sendo ótima alternativa para redução de esforço computacional em processos de simulação.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro, ao invés de trabalhar-se com parâmetros de espalhamento para o cálculo do ganho de potência ou ganho transdutivo, será abordado os parâmetros ABCD ou de transmissão. Na Figura 39, pode ser visto a representação por grafo de fluxo de uma rede utilizando parâmetros de transmissão.



**Figura 39: Grafo de Fluxo para uma Rede de duas Portas Modelada com Parâmetros ABCD.**

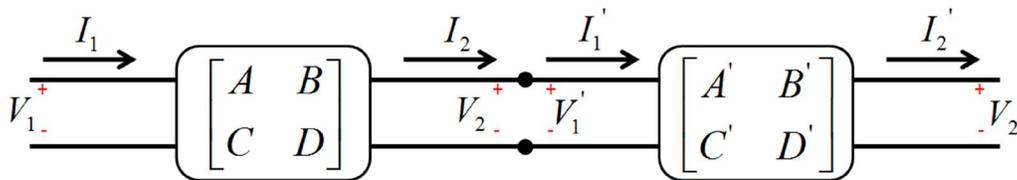
Através da Figura 39, percebe-se que o Grafo representa bem as equações usadas quando se está trabalhando com parâmetros de transmissão. Partindo do nó  $V_1$ , encontra-se[15]:

$$V_1 = A \cdot V_2 + B \cdot I_2 \quad (5.1)$$

Agora, caso se olhe para o nó  $I_1$ , têm-se:

$$I_1 = C \cdot V_2 + D \cdot I_2 \quad (5.2)$$

A meta será encontrar o ganho transdutivo e uma rede em cascata com parâmetros ABCD e poder avaliar a contribuição de cada trecho na perda de potência do sinal. Duas redes de duas portas concatenadas são representadas na Figura 40[15]:



**Figura 40: Conexão em Cascatas de duas Redes.**

Para cada uma das redes que são conectadas em cascata na Figura 40, pode-se afirmar a partir do sistema matricial (1.3) [15]:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

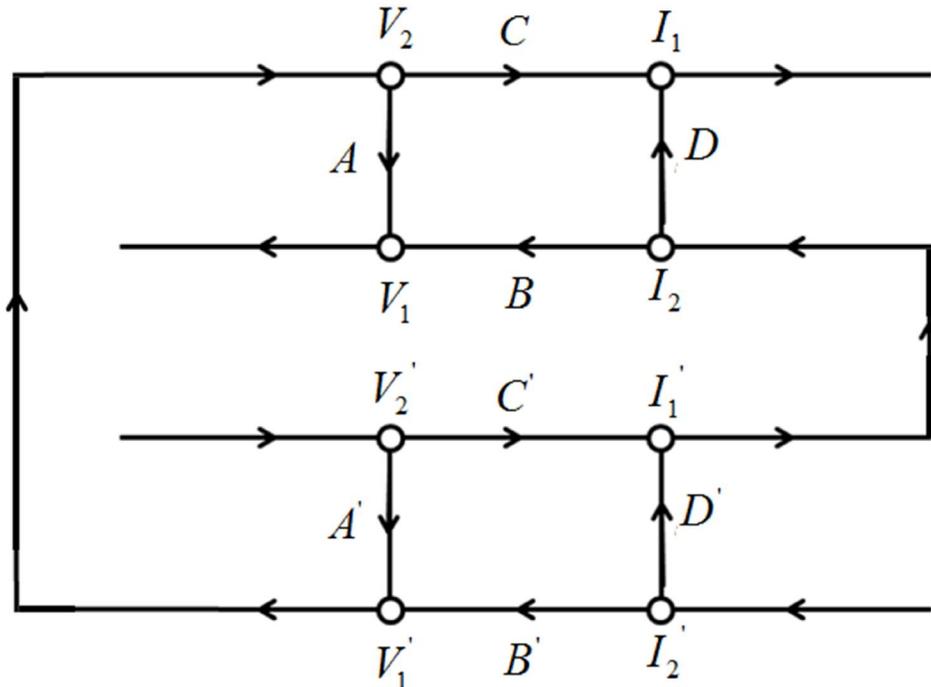
e

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

A tensão de saída da primeira rede,  $V_2$ , é igual a tensão de entrada da segunda rede,  $V_1'$ , e a corrente de saída da primeira rede,  $I_2$ , é igual a corrente de entrada da segunda rede,  $I_1'$ . Assim, é possível afirmar [15]:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

O grafo de fluxo do sistema descrito na Figura 40, é mostrado na Figura 41.



**Figura 41: Grafo de Fluxo Para Rede de Duas Portas com Parâmetros ABCD.**

A utilização de Grafo de Fluxo poderá minimizar o tempo computacional facilitar a simulação de malhas elétricas mais complexas.

## 6 Trabalhos Publicados e Atividades no Doutorado

No período do curso de doutorado o autor publicou os artigos relacionados abaixo:

- Vitor, U. R.C. and de Melo, M.T. (2012), *Comparison between power line communication multipath model and coaxial cable interferometer theory*. *Int. J. Commun. Syst.*. doi: 10.1002/dac.2353;
- F. R. Sabino Jr ; VITOR, Ulysses Roberto Chaves ; MELO, Marcos Tavares de . *Electric Field in Overhead Transmission Line for PLC Signal*. In: *14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, 2010, Chicago. Digest of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation.. Chucago: Omnipress, 2010. v. 1. p. 1784-1784.11.*
- Hermano A. Cabral ; VITOR, Ulysses Roberto Chaves ; MELO, Marcos Tavares de . *Analysis of Noise and Transfer Function Characteristics in a Three-Phase Electrical Infrastructure*. In: *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications 2010, 2010, Rio de Janeiro. Proceedings of the IEEE ISPLC 2010. Rio de Janeiro, 2010. v. 1. p. 137-141.*
- VITOR, Ulysses Roberto Chaves ; Lucas G Gueiros ; Rafael M. C. Brito; MELO, Marcos Tavares de ; SANTOS, Mauro Rodrigues dos ; BELFORT, A ; Hermano A. Cabral ; Mauricio Lôbo . *Quality of Service in a PLC Network*. In: *IWT - International Workshop on Telecommunications, 2009, São Paulo. Proceedings - International Workshop on Telecommunicatios*. SANTA RITA DO SAPUCAÍ: EDITORA DO INATEL, 2009. v. 1. p. 41-44.

## 7. Referências

- [1] F. B. M. Bandeira. “Redes de Energia Elétrica Inteligentes”. Nota Técnica. Consultoria Legislativa. Câmara dos Deputados. Abril 2012;
- [2] MÁRCIO PEREIRA ZIMMERMANN. “ Relatório Smart Grid”. Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes. Ministério de Minas e Energia. Abril 2010;
- [3] Aalamifar, F.; Hassanein, H.S.; Takahara, G., "Viability of powerline communication for the smart grid," Communications (QBSC), 2012 26th Biennial Symposium on , vol., no., pp.19,23, 28-29 May 2012;
- [4] Kikkert, C.J., "MV to LV transformer PLC bypass coupling networks for a low cost Smart Grid rollout," Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT), 2011 IEEE PES , vol., no., pp.1,6, 13-16 Nov. 2011;
- [5] Bakhoun, E.G., "Parameters Model for Data Communications Over 3-Phase Transmission Lines," Smart Grid, IEEE Transactions on , vol.2, no.4, pp.615,623, Dez. 2011;
- [6] Jaeyoung Shin; Jaehoon Lee; Jichai Jeong, "Channel Modeling for Indoor Broadband Power-Line Communications Networks With Arbitrary Topologies by Taking Adjacent Nodes Into Account," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.26, no.3, pp.1432,1439, Julho 2011;
- [7] Korke, M.; Hosseinzadeh, N.; Vu, H.L.; Moazzeni, T.; Chuan Heng Foh, "A channel model for power line communication in the smart grid," Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES , vol., no., pp.1,7, 20-23 Março 2011;
- [8] D. J. Leeds, “The Smart Grid In 2010: Market Segments, Applications and Industry Players”, Gtm Research, Julho 2009;
- [9] E. Biglieri. Coding and modulation for a horrible channel. IEEE Communications Magazine, 41:92–98, Maio 2003;
- [10] Laguna, G.; Barron, R., "Survey on Indoor Power Line Communication Channel Modeling," Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2008. CERMA '08 , vol., no., pp.163,168, Setembro. 30 2008 - Outubro. 3 2008;
- [11] Dostert, K., “Powerline Communication, Prentice Hall PTR, Network”, USA, Abril, 2001;

- [12] PIMENTEL, C. . Comunicação Digital. 1. ed. Rio de Janeiro: BRASPORT, 2007. v. 1. 420p ;
- [13] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications," IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility, vol. 44, n. 1, pp. 249–258, 2002;
- [14] Zhenchao Wang, Huiran Hou, and Yutao Gan, "Feature Extraction of the Noise in L-PLC," 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp.1341-1346, 2007;
- [15] Pozar, D. M. ,“Microwave Engineering”, Third Edition, Wiley, 2005;
- [16] Cheng, D. K. , “Fundamental of Engineering Electromagnetics”. Reading, MA: Addison-Wesley, 1992;
- [17] Meng, H.; Chen, S.; Guan, Y.L.; Law, C.L.; So, P.L.; Gunawan, E.; Lie, T.T., "Modeling of transfer Characteristics for the broadband power line communication channel," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.19, no.3, pp. 1057-1064, Julho 2004;
- [18] Galli, S.; Banwell, T., "A novel approach to the modeling of the indoor power line channel-Part II: transfer function and its properties," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.20, no.3, pp. 1869-1878, Julho 2005;
- [19] D.K. Misra. Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits: Analysis and Design. A Wiley-Interscience publication. Wiley, 2004;
- [20] T.S. Pang, P.L. So, K.Y. See, and A. Kamarul. Common-mode current propagation in power line communication networks using multi-conductor transmission line theory. In Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC '07. IEEE International Symposium on, pp. 517–522, 2007;
- [21] J. Anatory, N. Theethayi, R. Thottappillil, M.M. Kissaka, and N.H. Mvungi. The influence of load impedance, line length, and branches on underground cable power-line communications (plc) systems. Power Delivery, IEEE Transactions on, 23(1):180–187, 2008;
- [22] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, John Wiley & Sons. 1994.;
- [23] Cabral, H.A.; Vitor, U. R C; De Melo, M.T., "Analysis of noise and transfer function characteristics in a three-phase electrical infrastructure," Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.137,141, 28-31 Março 2010;