

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
CAMPUS JATAÍ
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Análise do Transitório Eletromagnético em Linhas de
Transmissão**

CARLOS ANTONIO PEREIRA JUNIOR

Jataí - GO
Novembro/ 2013

CARLOS ANTONIO PEREIRA JUNIOR

**Análise do Transitório Eletromagnético em Linhas de
Transmissão**

Trabalho de conclusão de curso
apresentada ao Instituto Federal de
Goiás – IFG – Campus Jataí, para
Graduação em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Sistema de
Energia Elétrica

Orientador: Prof. Msc. Marcelo Semensato

Jataí - GO

Novembro/ 2013

CARLOS ANTONIO PEREIRA JUNIOR

**Análise do Transitório Eletromagnético em Linhas de
Transmissão**

Msc. Marcelo Semensato

Orientador

Dr. Fernando Silva Pereira

Membro da Banca Examinadora

Msc. Dori Rodrigues de Souza

Membro da Banca Examinadora

Jataí - GO

Novembro/ 2013

Dedicatória

Dedico todo este trabalho a Deus. Sei que foi ele que não me deixou desistir.

A minha mãe que por muitas vezes fez o papel de pai, conselheira e amiga, Helena Cesário. Que não mediu esforço e empenho para que pudesse chegar até aqui. E ao meu pai Carlos Antonio. A esses o meu reconhecimento e eterna gratidão.

Agradecimento

Agradeço ao Instituto Federal de Goiás e a todos os idealizados que trouxeram o curso de Engenharia Elétrica para este campus.

Agradeço ao professor Marcelo Semensato por ter compartilhado seus conhecimentos. Como professor na graduação, orientador neste trabalho e na iniciação científica.

Agradeço aos meus tios e padrinhos Maria Rita Winder, Wilton Winder, Jair Cesário, Elizabeth Lira, Mauricio Cesário, Sandra Costa e a minha irmã de coração Ana Rita Winder pelo apoio.

Agradeço aos meus amigos de Jataí. De uma forma especial a Hugo Gonçalves, Danilo Lima, Patrício Sodré e Divino Júnior. E a todos integrante da Republica Skolaxo pelas longas conversas e risadas.

Agradeço aos amigos de infância “A Diretoria” Kairo Henrique, Eric Firmino, Frederico Peixoto, Geraldo Magela, Robson Tavares, Rodolfo Carneiro, e Guilherme Toledo.

A todos esses muito obrigado!

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original”*

Albert Einstein

“A felicidade só é real quando compartilhada”

Christopher McCandless

Resumo

O presente trabalho baseia-se na Teoria da Potência Complexa Instantânea (TPCI) que utiliza vetores espaciais instantâneos para interpretar resultados da tensão trifásica, corrente trifásica e potência complexa em qualquer instante de tempo. Este método foi utilizado para analisar o comportamento de uma linha de transmissão, no modelo Pi, durante o transitório eletromagnético causado por faltas trifásicas, abertura e fechamento das fases. Este também explana sobre o método utilizado por muitos softwares para análise de transitório eletromagnético. Método de análise através de variáveis de estado.

No trabalho foram obtidas e analisadas tensões, correntes e potências com fonte de tensão equilibrada e desequilibrada. Os resultados foram conseguidos por simulações no software Simulink. Por fim, é obtido um comparativo entre o regime permanente, em condições normais de operação do sistema elétrico e o transitório eletromagnético que tem curta duração, mas eleva os equipamentos além de suas condições normais de operação.

Palavras-chave: Potência Complexa Instantânea, Vetores Espaciais Instantâneos, Linhas de transmissão, transitório eletromagnético, variáveis de estado.

Abstract

The present work is based on the Instantaneous Complex Power Theory (ICPT), which uses instantaneous space vectors to interpret results from three-phase voltage, three-phase current and complex power at any instant of time. This method was used to analyze the behavior of a transmission line, on a Pi-model, during an electromagnetic transient caused by three-phase faults, opening and closing of the phases. The work also explains about the method, which uses state variables, executed by many software programs to perform the electromagnetic transient analysis.

In this paper, some voltages, currents and powers were obtained and analyzed considering: balanced and unbalanced voltage source. Simulations on the Simulink software were made to obtain the results. Finally, a comparative of the steady state (normal operation conditions) and the electromagnetic transient (rapid duration, but responsible to elevate parameters beyond their normal conditions) was developed.

Key words: *Instantaneous Complex Power, Instantaneous Space Vectors, transmission lines, electromagnetic transient, state variables.*

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Ciclo econômico da energia elétrica no Brasil Fonte: Autor	14
Figura 2.2 - Subsidiárias da Eletrobras com áreas originais de atuação Fonte: Eletrobras.....	15
Figura 2.3 - Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.....	16
Figura 2.4 - Sistema interligado brasileiro Fonte: Operador Nacional do Sistema (ONS, 2013).....	17
Figura 2.5- Linha de Transmissão como Quadripolo Fonte: [4].....	19
Figura 2.6 – Associação em cascata de quadripolo Fonte: [4]	19
Figura 2.7 – Associação em paralelo de quadripolo Fonte: [4].....	19
Figura 2.8- Modelo para linha curta Fonte: [4].....	20
Figura 2.9 – Modelo para linha media.....	20
Figura 2.10 – Modelo para linha longa.....	21
Figura 2.11- Representação modelo PI	22
Figura 2.12 – Representação do fluxo de potência através de 3 barras Fonte: [7].....	23
Figura 3.1 - Exemplo de um onda não senoidal de corrente decomposta e seu aspecto de uma lâmpada Fluorescente Compacta. Fonte : [4]	26
Figura 3.4 - – Transitório impulsivo. Fonte: [1]	27
Figura 3.5 – Transitório oscilatório. Fonte: [3]	28
Figura 3.6 – Circuito RC. Fonte: [2].....	29
Figura 3.7 – Circuito RL para transformada de Laplace. Fonte: [2]	31
Figura 4.1 - Circuito π para a linha de transmissão.....	34
Figura 5.1 – Evolução da Eletrônica Fonte: Autor.....	37
Figura 5.2 - Representação das ondas senoidais de tensão antes da transformada de Clarke. Fonte: [6]	40
Figura 5.3 - – Representação das ondas senoidais de tensão após a transformada de Clarke. Fonte: [6]	40
Figura 5.4 – Vetores Espaciais Instantâneos Tensão e Corrente no plano $\alpha - \beta$. Fonte: [1]	41
Figura 5.5 – Sistema Bifásico $\alpha\beta$. Fonte: [1]	42
Figura 6.1- Representação dos blocos no Simulink da principal simulação usada no trabalho. Fonte: Autor	47
Figura 6.2 – Representação das fontes de tensão do sistema trifásico. Fonte: Autor..	48
Figura 6.3 – Configuração dos parametros da fonte de tensão. Fonte: Autor.....	48
Figura 6.4 - Vetor Espacial Instantaneo tensão no ambiente Simulink. Fonte: Autor..	49
Figura 6.5 - Vetor Espacial Instantaneo corrente no ambiente Simulink. Fonte: Autor.	50
Figura 6.6 - Representação Potência Complexa Instantane no ambiente Simulink. Fonte: Autor.....	50
Figura 6.7 - Representação da linha de transmissão no modelo π Fonte: Autor	51
Figura 7.1 - Bloco Simulink responsável pelo curto-circuito.....	52
Figura 7.2 - Configurações do bloco Simulink responsável por causar as faltas.....	53
Figura 7.3 – Vetor espacial instantâneo de tensão no regime permanente.....	54

Figura 7.4 – Simetria do vetor espacial instantâneo tensão.....	55
Figura 7.5 – Vetor espacial instantâneo tensão transitório.....	55
Figura 7.6 – Vetor espacial instantâneo corrente no regime permanente	56
Figura 7.7 – Vetor espacial instantâneo corrente transitório.....	57
Figura 7.8 – Potência complexa instantânea sistema equilibrado	58
Figura 7.9 – Vetor espacial instantâneo tensão no regime permanente	59
Figura 7.10 – Vetor espacial instantâneo tensão transitório	60
Figura 7.11 – Vetor espacial instantâneo corrente regime permanente.....	61
Figura 7.12 – Vetor espacial instantâneo corrente transitório.....	62
Figura 7.13 – Potencia Complexa Instantânea sistema desequilibrado.....	63
Figura 7.14 - Configurações do bloco do Simulink responsável por causar o transitório.	64
Figura 7.15 - Bloco do Simulink responsável pelo transitório	64
Figura 7.16 – Vetor espacial instantâneo tensão primeiro estágio.....	65
Figura 7.17 – Vetor espacial instantâneo tensão segundo estágio.....	66
Figura 7.18 - Vetor espacial instantâneo tensão terceiro estágio.....	66
Figura 7.19 - Vetor espacial instantâneo corrente primeiro estágio.....	67
Figura 7.20 - Vetor espacial instantâneo corrente segundo estágio.....	68
Figura 7.21 - Vetor espacial instantâneo corrente terceiro estágio.....	68
Figura 7.22 - Potencia Complexa Instantânea segundo estágio	69
Figura 7.23 - Potência complexa instantânea terceiro estágio	70
Figura 7.24 – Vetor espacial instantâneo tensão primeiro estágio.....	70
Figura 7.25 – Vetor espacial instantâneo tensão segundo estágio.....	71
Figura 7.26 - Vetor espacial instantâneo tensão terceiro estágio.....	72
Figura 7.28 – Vetor espacial instantâneo corrente primeiro e segundo estágio	73
Figura 7.29 - Vetor espacial instantâneo corrente terceiro estágio.....	73
Figura 7.30 - Potência complexa instantânea primeiro estágio	74
Figura 7.31 - Potência complexa instantânea segundo estágio	74
Figura 7.32- Potência Complexa Instantânea terceiro estágio	75
Figura 7.33- Gráfico corrente em relação ao tempo na linha de transmissão.....	75
Figura 7.34- Gráfico tensão em relação ao tempo na linha de transmissão	75

Sumário

1 - INTRODUÇÃO	12
2- LINHA DE TRANSMISSÃO	13
2.1- Introdução.....	13
2.2 - Aspecto Econômico	13
2.3 – Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica	15
2.4 - Sistema Interligado	16
2.5 - Tipos de Linhas de Transmissão	18
2.5.1 - Linha de Transmissão como Quadripolo.....	18
2.5.2 - Linha de Transmissão Curta	20
2.5.3 - Linha de Transmissão Media	20
2.5.4 - Linhas de Transmissão longa	21
2.6 - Circuito Pi Equivalente.....	21
2.7- Circuito Pi nominal	22
2.8 - Fluxo de Potência.....	23
3 – INTRODUÇÃO AO TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO	25
3.1 – Poluição na Rede	26
3.2 - Tipos de transitório eletromagnético	27
3.2.1 - Transitório Impulsivo.....	27
3.2.2 - Transitório Oscilatório.....	28
3.3 – Parâmetros e formulação matemática dos circuitos elétricos	29
3.3.1 – Parâmetros.....	29
3.3.2 – Formulação matemática.....	29
3.4 – Método da transformada de Laplace.....	30
4 – ANÁLISE DO TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO POR MEIO DE VARIÁVEIS DE ESTADO	33
4.1 – Introdução.....	33
4.2 – Linha de Transmissão.....	33
4.3 – Desenvolvimentos Matemáticos	34
5 – TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA	37

5.1 - Introdução.....	37
5.2 - Teoria da Potencia Complexa Instantânea	38
5.3 - Transformada de Clarke.....	38
5.4 - Vetores Espaciais Instantâneos.....	40
5.4. 1- Vetores Espaciais Instantâneos representados na forma cartesiana.....	42
5.4.2 – Desmembrando a Potencia Complexa Instantânea	43
6 – METODOLOGIA UTILIZADA	46
6.1 - Fonte de Tensão.....	48
6.2 - Vetores Espaciais Instantâneos.....	49
6.3 - Potência Complexa Instantânea	50
6.4 - Linhas de Transmissão	51
7 – SIMULAÇÃO DO TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO	52
7.1 - Simulação de curto-circuito trifásico em linhas de transmissão	52
7.1.1 - Sistema trifásico equilibrado	53
7.1.2 - Sistema trifásico desequilibrado.....	58
7.2 – Simulações da abertura e fechamento do sistema elétrico em linhas de transmissão	63
7.2.1 – Sistema trifásico equilibrado.....	65
7.2.2 – Sistema Trifásico desequilibrado.....	70
8 - CONCLUSÃO	77

1 - INTRODUÇÃO

O objetivo do trabalho é analisar o transitório eletromagnético, causado quando o sistema elétrico é chaveado ou posto fora das condições nominais. Na maioria das vezes, é durante esses instantes de transitório que é causado os maiores prejuízos às concessionárias de energia elétrica. Dessa maneira é imprescindível uma análise criteriosa desses instantes.

Existem alguns métodos e softwares específicos para essa análise. No trabalho utilizou-se o Simulink, e foi analisado o transitório eletromagnético causado por blocos que simula-se curto-circuito e abertura de fases em uma linha de transmissão. Seguindo o que foi relatado, o trabalho foi dividido da seguinte forma:

O segundo capítulo faz um relato da condição econômica ligada com a produção de energia elétrica brasileira, os tipos de linhas de transmissão existentes e como é o processo até que a energia elétrica chegue ao consumidor final.

No terceiro capítulo mostrou-se os transitórios eletromagnéticos que podem afetar o sistema elétrico, a poluição na rede causada pelas harmônicas, fechando o capítulo, realizou-se a dedução pelo método de Laplace.

O quarto capítulo foi destinado para explicar sobre uma forma de analisar o transitório eletromagnético diferente da potência Complexa Instantânea. A análise através das variáveis de estado.

No quinto capítulo é feita uma introdução do que é a Teoria da Potência Complexa Instantânea, como surgiu e qual sua utilidade.

O sexto capítulo mostra como foi realizado as simulações, os métodos utilizados.

O sétimo capítulo expõem todos os gráficos dos vetores espaciais instantâneos tensão, corrente e o gráfico da potência complexa Instantânea obtidos nas simulações e faz suas respectivas análises.

E por fim, o oitavo capítulo é destinado as conclusões sobre o referido trabalho.

2- LINHA DE TRANSMISSÃO

2.1- Introdução

Para que uma boa linha de transmissão consiga o seu objetivo final, ou seja, entregar uma energia de qualidade ao consumidor, alguns critérios devem ser satisfeitos. Alguns desses critérios são: Uma boa adaptação às exigências do consumidor, não interromper a transmissão, e se por ventura, houver um interrupção, que seja estabelecida o funcionamento o mais rápido possível. Por final, corresponder às expectativas de carga para o consumidor, caso o cliente deseje aumentar a sua carga, a concessionária terá esse excedente para oferecer.

As linhas de transmissão possuem grandes dimensões, e estão sujeitas a ações do meio, como por exemplo, ventos fortes, galhos de árvores e descargas atmosféricas. Situações que podem prejudicar, ou até mesmo, impedir o seu funcionamento. Interrompendo o funcionamento de milhares de indústrias, fábricas, e residências que venham a depender dessa energia elétrica transportada por essa linha de transmissão.

Analisando os prejuízos, que uma interrupção de energia elétrica, possa a vir causar aos clientes, concessionárias estão cada vez mais preocupadas com essas faltas, sendo assim, estudos está sendo feitos para impedir ou mesmo prever um defeito.

Nesse objetivo, o transitório eletromagnético que é explanado neste trabalho, auxilia no dimensionamento destes componentes elétricos, visto que, durante os picos de tensão e/ou corrente esses saem do seu regime permanente e ultrapassando seus valores nominais.

2.2 - Aspecto Econômico

O fornecimento de energia elétrica tem ligação direta com a condição econômica do país. Pois, se a economia do país esta bem, a produção esta em alta. A produção estando alavancada, as industriais estão consumindo cada vez mais energia elétrica. Nesse contexto algumas teorias devem ser levadas em conta no sentido de inibir ou ampliar as taxas de crescimento do país. O ciclo econômico da energia elétrico no Brasil esta representado na figura 2.1.



Figura 2.1 - Ciclo econômico da energia elétrica no Brasil Fonte: Autor

O ciclo da figura 2.1 faz uma ilustração de como foi mencionando anteriormente, o fornecimento de energia elétrica. O mapa do Brasil esta representando todo o país em termos econômicos, se o país esta bem economicamente, um dos fatores é sua produção em níveis elevados. A produção neste contexto é representada pela ilustração da fabrica, dando continuidade ao ciclo, alta produção requer alta demanda de energia elétrica, onde entra todas as fontes de energia, representada pela hidrelétrica, mas poderia ser qualquer outra fonte, tais como, usinas nucleares, parques eólicos entre outros.

O País consumindo energia elétrica além do esperado, à necessidade de construir novas hidroelétricas, subestações, e linhas de transmissão para levar essa energia até as fabricas aumentam. Porém, alguns critérios devem ser minuciosamente analisados para essa nova ampliação, como por exemplo, o custo do investimento, custo das perdas, e o custo de confiabilidade do novo sistema.

Existe também para casos mais extremos, o racionamento de energia elétrica. Estes acontecem quando o governo esta contendo gastos de energia, seja pelo baixo nível de água nos reservatórios das hidroelétricas, causados pela escassez de chuvas, ou por medidas estratégicas. No caso dos baixos

níveis dos lagos, o racionamento é uma medida preventiva para que não aconteça um novo “Apagão”.

Para administrar todo esse sistema existem algumas subsidiárias da Eletrobrás com áreas originais de atuação. Essas divide o território brasileiro em setores.

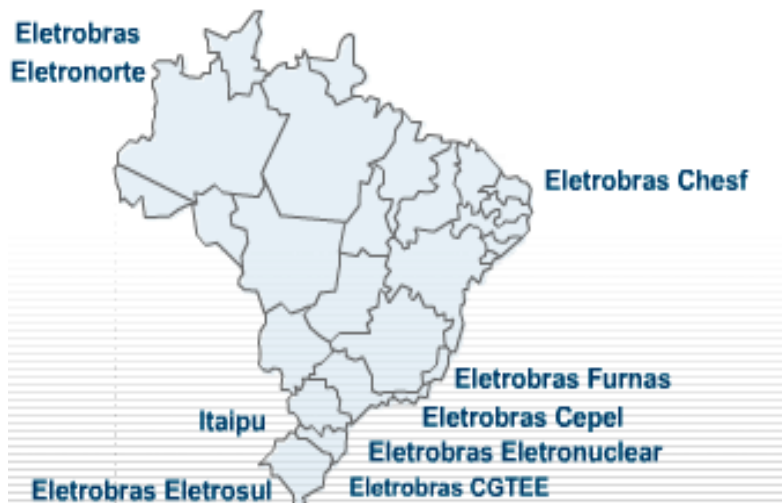


Figura 2.2 - - Subsidiárias da Eletrobrás com áreas originais de atuação Fonte: Eletrobrás

A Eletrobrás é a maior companhia de energia elétrica da América Latina, sendo constituída por seis subsidiárias, sendo elas Eletrobrás Eletronorte, Eletrobrás Eletrosul, Eletrobrás CGTEE, Eletrobrás Eletronuclear, Eletrobrás Chesf, e Eletrobrás Furnas. Contando ainda com 50% de Itaipu Binacional que é uma parceria com o Paraguai e a Eletrobrás Cepel que é o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Ao todo, são 29 hidrelétricas, 15 termelétricas, duas usinas nucleares, 237 subestações e mais de 59,7 mil km de linhas de transmissão. [1]

2.3 – Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica

Para chegar ao ponto do consumidor final ligar um aparelho eletrônico em sua residência, a energia elétrica consumida por ele já percorreu milhares de quilômetros. Pegando como referencia a ilustração 2.3, tudo inicia com a produção, nas usinas hidrelétricas. Porém, essa energia geralmente é produzida distante do seu consumidor final, com isso, é necessário levar essa energia até eles.

Essa é transmitida através das linhas de transmissão que na maioria das vezes são aéreas, assunto deste trabalho. Por questão econômica, são necessários os transformadores, para abaixar e elevar a tensão quando

necessário. Na saída da hidrelétrica passa por um transformador elevando a tensão. Nas intermediações dos centros urbanos existem as subestações, para rebaixar essa tensão e distribuir aos consumidores residenciais e industriais nos parâmetros adequados.

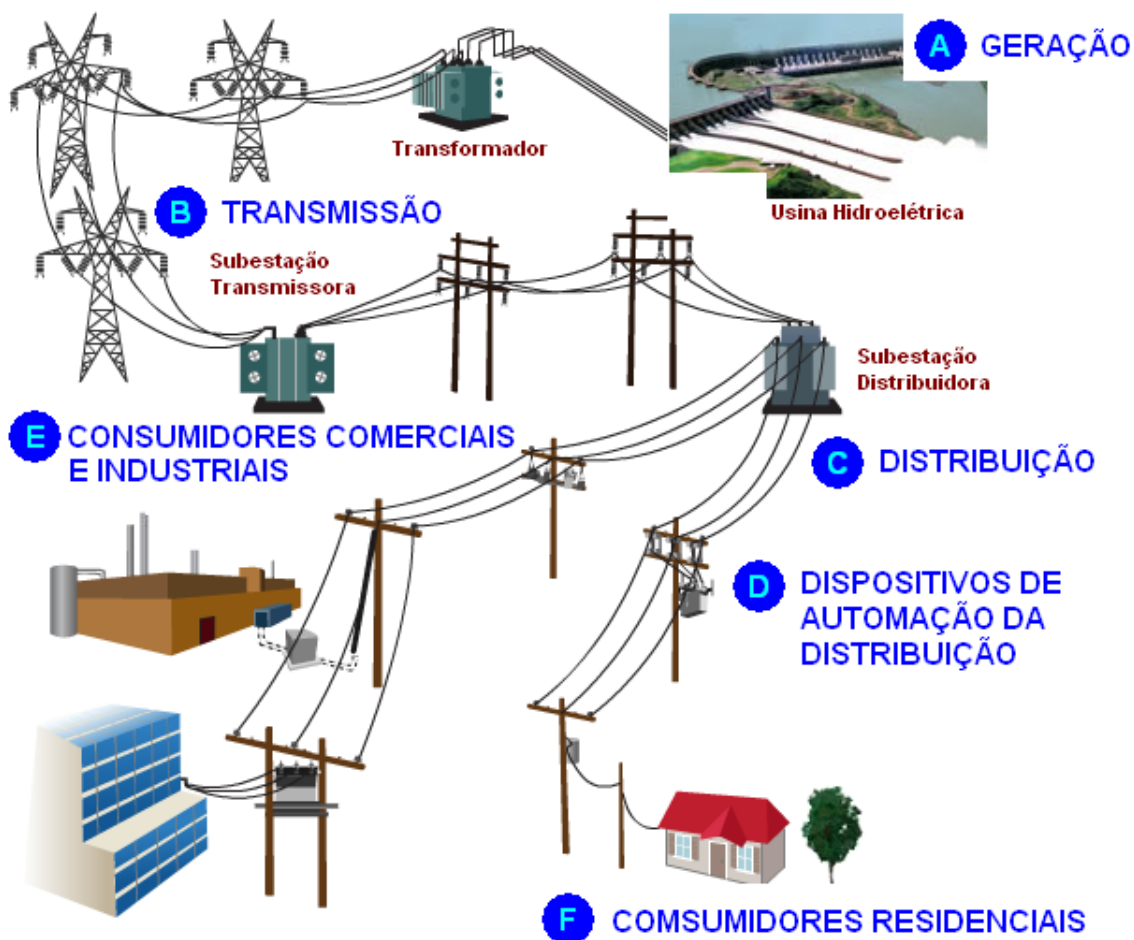


Figura 2.3 - Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

2.4 - Sistema Interligado

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão que gerencia, fiscaliza, coordena, e desenvolve estratégia para todo o Sistema Interligado Nacional (SIN) sobre a regulamentação da Agencia Nacional de Energia Elétrica(ANEEL). [2]

A maioria do território brasileiro no aspecto de produção de eletricidade esta interligada através do SIN, apenas 3,4 % da capacidade de geração de energia elétrica não está interligada. [2] Esses setores fora da interligação se encontram em territórios isolados principalmente na região amazônica.

No aspecto mundial são poucos os países que tem um sistema elétrico

como o sistema brasileiro. Isso traz inúmeras vantagens, como por exemplo, no caso de falhas, caso uma região fique sem energia o outro setor possa suprir sua necessidade, enquanto não resolve o problema, aumentando assim, a confiabilidade no sistema. Também a melhoria de alguns parâmetros na rede, como tensão e frequência.

A questão econômica faz toda a diferença nesse aspecto. Pois, com isso à uma redução considerável de custo, não à necessidade de construir grandes unidades geradoras, visto que, todo o setor esta interligado, uma região que consuma menos poderá suprir a necessidade de uma região que necessita de uma carga maior.

O sistema interligado também trás algumas desvantagens, como, um distúrbio em qualquer um dos pontos existentes pode ser transferido para outro ponto a quilômetros de distâncias. Um curto-circuito pode abalar o sistema inteiro ocasionando alta corrente em vários equipamentos conectados a ele.

Como pode-se entender a interligação do sistema é complexo. Por traz disso existem muito estudos, projetos, e pessoas especializadas para tamanha tarefa.

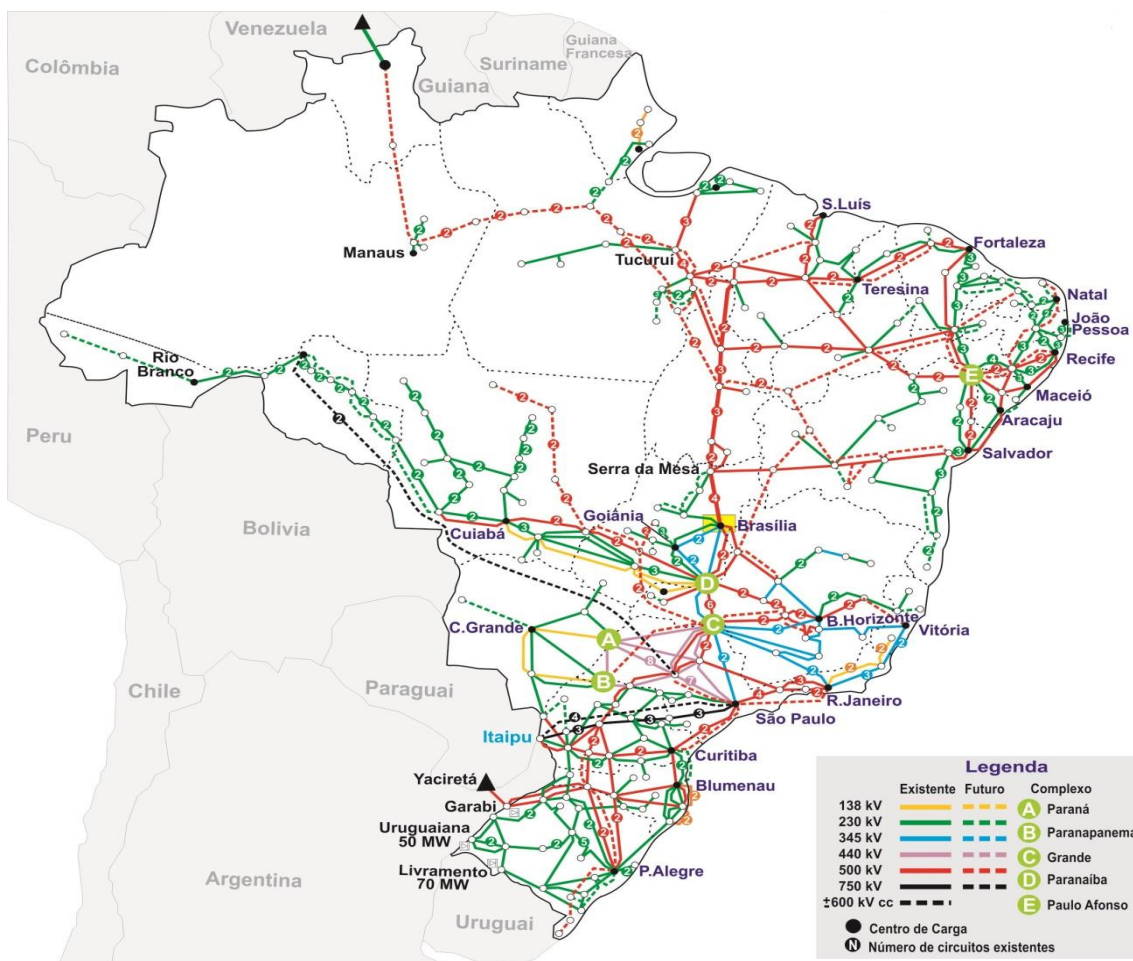


Figura 2.4 - Sistema interligado brasileiro Fonte: Operador Nacional do Sistema (ONS, 2013)

As linhas de transmissão vem utilizando cada vez mais tensões elevadas. No Brasil, atualmente, o maior nível de tensão é o 765 kV do sistema de Itaipu, interligando as regiões Sul e Sudeste do país. [3]

Existem alguns modelos de linhas de transmissão, como, a linhas subterrâneas, linhas aéreas, linhas mistas e as linhas de placas de circuitos impressos. Algumas dessas são transmitidas por correntes contínuas outras por corrente alternada. No trabalho estamos tratando das linhas de transmissão aéreas com corrente alternada.

Nestas linhas de transmissão aéreas alguns componentes são básicos, como é o caso dos Isoladores, para-raios, estrutura, e os condutores. Cada um desses materiais utilizados é específico quanto a sua dimensão e natureza, para cada tensão transmitida na linha.

2.5 - Tipos de Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão AC possuem resistência, indutância e capacitância uniformemente distribuídas ao longo da linha. A resistência consome energia, com perda de potência de $R \cdot I^2$. A indutância armazena energia no campo magnético devido à circulação de corrente. A capacitância armazena energia no campo elétrico devido à diferença de potencial. [4]

2.5.1 - Linha de Transmissão como Quadripolo

Um circuito quadripolo é um circuito com duas portas, uma porta de entrada (fonte) representada pelas variáveis $V(x)$ e $I(x)$ e uma porta de saída (carga) com as variáveis V_r e I_r , como representada na matriz 1.1.

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Esse sistema pode ser modelado matricialmente facilitando seu entendimento. A matriz central, matriz impedância, define a característica da linha de transmissão.

A figura 2.5 ilustra bem como seria a linha de transmissão com sua

corrente de entrada, corrente de saída, fonte, carga, e com as variáveis que define seu aspecto.



Figura 2.5- Linha de Transmissão como Quadripolo Fonte: [4]

Esse sistema quadripolo pode ser analisado em associações. Associação em serie, cascata, paralelo, serie-paralelo, paralelo-serie. A seguir o modelo da associação em cascata e da associação em paralelo, respectivamente. Para cada tipo de associação existe uma forma de calcular a matriz, pela manipulação de sua matriz impedância. No caso da associação em paralelo a matriz admitância total é igual a soma de suas matriz admitâncias.

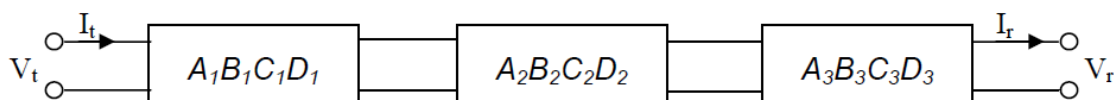


Figura 2.6 – Associação em cascata de quadripolo Fonte: [4]

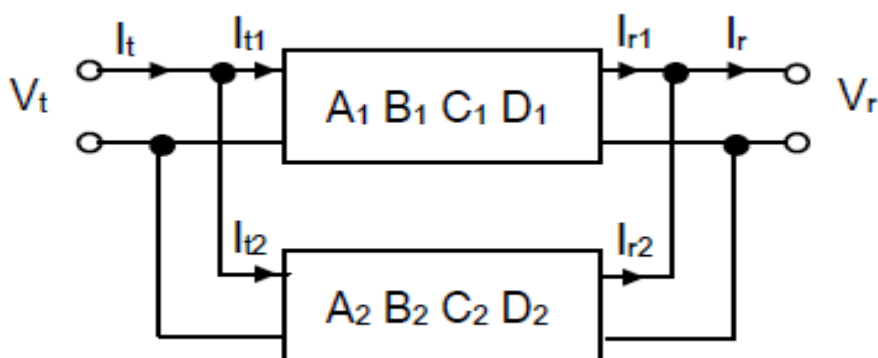


Figura 2.7 – Associação em paralelo de quadripolo Fonte: [4]

Existem alguns modelos para o comprimento de uma linha de transmissão. Com isso as linhas podem ser divididas entre linhas de

transmissão curtas, medias, e longas. Algumas literaturas entram em conflito quanto ao tamanho exato para cada definição. Sendo assim:

2.5.2 - Linha de Transmissão Curta

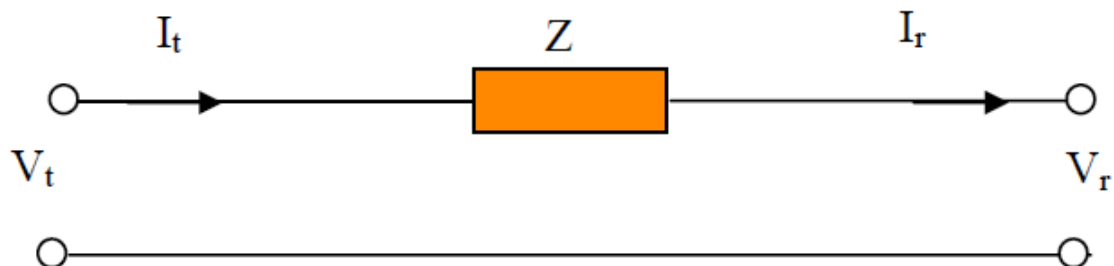


Figura 2.8- Modelo para linha curta Fonte: [4]

Este grupo de linhas é para transmissões até 80 km, do ponto de início até o ponto de entrega, com frequência de 60 Hz. A capacitância é considerada zero, restando apenas a impedância em serie como mostrada na figura 2.8.

2.5.3 - Linha de Transmissão Media

As linhas de transmissão medias, são linhas com faixa de 80 km a 240 km.

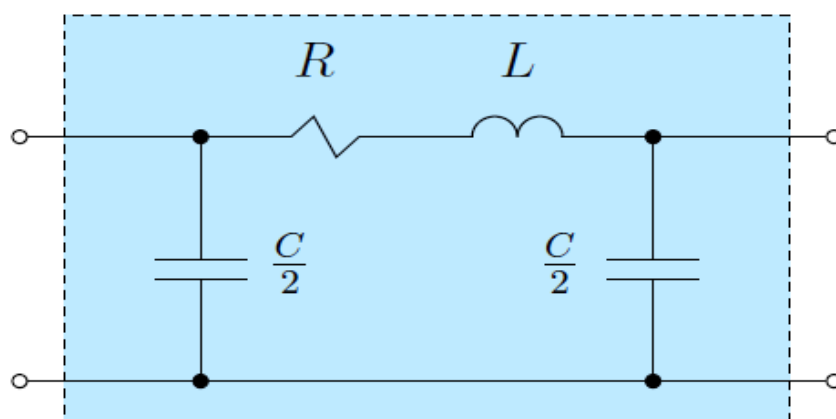


Figura 2.9 – Modelo para linha media

Este grupo de linhas como representada na figura, possui capacitância, indutância, e resistência utilizando o modelo π nominal. Nos próximos subtítulos mostra se a definição do modelo π nominal.

2.5.4 - Linhas de Transmissão longa

As linhas de transmissão longas, são linhas com faixas maiores que 240km.

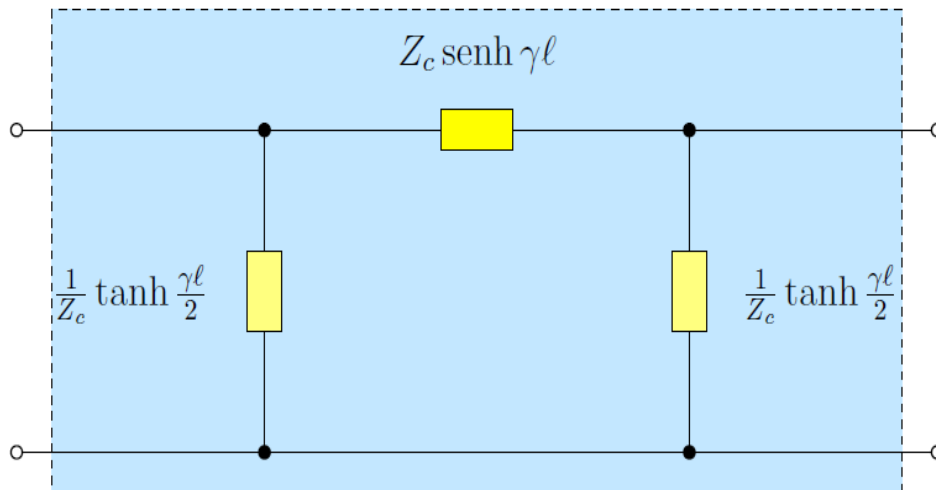


Figura 2.10 – Modelo para linha longa

O modelo da figura é utilizado para linhas de transmissão longas, mas pela sua versatilidade pode ser utilizado para outros tipos de linhas. Este é um modelo π composto por uma impedância série e duas admitâncias para a terra, no caso de uma linha genérica. [5]

2.6 - Circuito Pi Equivalente

Este modelo é o mesmo apresentado para linhas de transmissão longa, maiores que 240 km. Para que o modelo de linha, seja um modelo Pi equivalente, os parâmetros concentrados deve ser definidos a partir dos parâmetros distribuídos.

A seguir realiza as demonstrações das constantes de parâmetros distribuídos e parâmetros concentrados das linhas de transmissão.

$$Z = Z_C \cdot \sinh (\gamma l) \quad (1.2)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{1}{Z_C} \operatorname{tgh} \left(\frac{\gamma l}{2} \right) \quad (1.3)$$

Onde;

Z : Parâmetro concentrado

Y

$\frac{Y}{2}$: Parâmetro concentrado

Z_c : Impedância característica de Linha

γ : Constante de propagação

l : Comprimento da Linha

2.7- Circuito Pi nominal

No caso a seguir, quando o circuito Pi é nominal, com uma linha de transmissão na faixa de comprimento médio, os parâmetros da linha podem ser obtidos como na formula.

$$Z = z \cdot l \quad (1.4)$$

$$Y = y \cdot l \quad (1.5)$$

Sendo assim no caso do modelo PI nominal a fórmula de calcular os parâmetros são mais simplificadas do que no modelo PI equivalente. A seguir uma ilustração de uma linha de transmissão no modelo π .

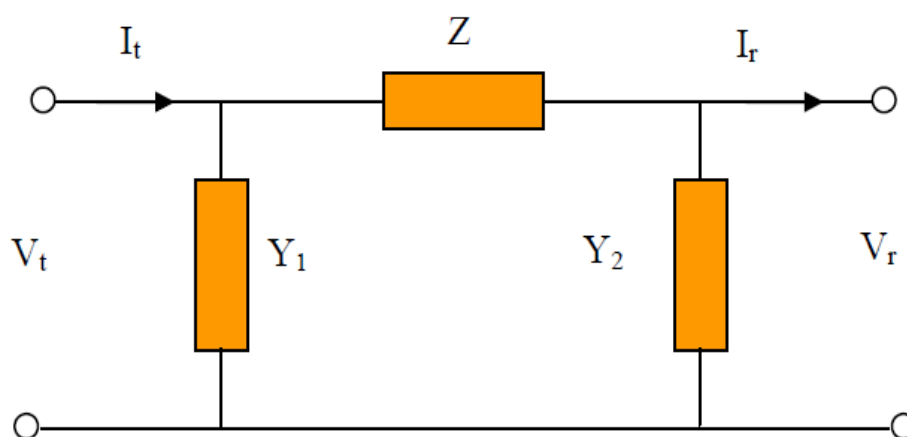


Figura 2.11- Representação modelo PI

2.8 - Fluxo de Potência

Nos primeiros estudos que são feitos para a implantação de uma nova linha de transmissão, um dos quesitos primordiais que são analisados é o fluxo de potência.

Com o intuito de uma breve introdução ao fluxo de potência, vamos explicar sobre as potencias absorvidas por cargas, ativa P e reativa Q , formam a potência complexa na forma retangular. [5]

$$S = P + jQ \quad (1.6)$$

A distribuição do fluxo de potencia pode ser entendida conforme ilustrada na figura 2.12. Neste exemplo estamos com 3 barras, sendo a barra 1 como barra de geração ou barra de referencia, e a barra 2 e 3 como barra de carga. Todas essas barras estão interligadas por linhas de transmissão.

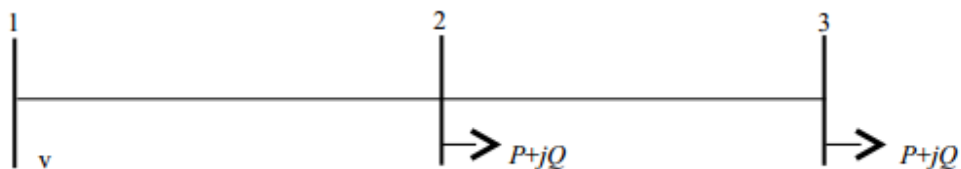


Figura 2.12 – Representação do fluxo de potência através de 3 barras Fonte: [7]

Um sistema real é constituído por milhares de barras como estas mostradas na figura 2.12. Entre as barras podemos encontrar os valores de tensão e ângulo, dependendo da barra a ser analisando, podendo ser um barra PQ ou PV. Na literatura existem alguns métodos para efetuar o calculo dessas potencias, como por exemplo, método iterativo de Newton-Raphson e de Gauss-Seidel.

Referências

- [1] ELETROBRAS. **Centrais Elétricas Brasileiras S.A.** Disponível em: <http://www.eletronbras.com/elb/data/Pages/LUMISBF7839BFPTBRIE.htm> Acesso em: 19 de Setembro de 2013.
- [2] ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico.** Disponível em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx Acesso em: 19 de Setembro de 2013.
- [3] CAMARGO, C. Celso de Brasil. **Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos fundamentais.** Florianópolis: UFSC, 2009. 277 p.
- [4] LEÃO, R. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.** Apostila do curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/60721341/Transmissao> Acesso em: 19 de setembro de 2013
- [5] ZANETTA, Jr. Luiz Cera. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência.** São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005. 312 p.
- [6] GRECO, A.F.G.;BARROSO, J.J.;ROSSI, J.O. **Modelagem e Simulação de Linhas de Transmissão Periódicas.** Laboratório Associado de Plasma – INPE, São José dos Campos, SP. Disponível em: <http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/08.16.11.55/doc/1210> Acesso em: 19 de Setembro de 2013
- [7] ARRUDA, C. **Fluxo de Potência.** Apostila do curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás. Disponível em: <http://www.eee.ufg.br/~colemar/Fluxo06.pdf> Acesso em: 19 de setembro de 2013
- [8] SILVA,V.A.F; CANÔNICO,R.B; KUROKAWA, S. **Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em Uma Linha de Transmissão por Meio de Variáveis de Estado.** Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina (DEEL/CTU/UEL). Disponível em: http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBA2008/textos/CBA_2008_Artigos/37511.pdf Acesso em: 19 de Setembro de 2013

3 – INTRODUÇÃO AO TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO

Transitório eletromagnético é a manifestação ou resposta elétrica, local ou nas adjacências, que se origina em alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. [1]

O transitório eletromagnético pode acontecer em qualquer sistema elétrico, seja ela, de baixa, media ou alta tensão. Este compreende um intervalo de tempo muito pequeno. Levando em consideração que na maior parte do tempo que o sistema esta em operação, este permanece em seu regime permanente. Porém, é nesse intervalo que os equipamentos elétricos são submetidos a condições muito severas que podem ultrapassar suas capacidades nominais. [2]

A ideia de prevenir uma ação antes que ela aconteça, caso ela aconteça para que os seus danos sejam mínimos, poderá evitar muitos prejuízos. Pensando dessa forma pesquisadores vêm analisando o transitório eletromagnético. Pois é, nesse pequeno intervalo de tempo que as concessionárias têm os maiores prejuízos. No trabalho em questão será simulado o transitório em linhas de transmissão.

Alguns equipamentos de proteção podem ser instalados, como por exemplo, os dispositivos de proteção contra surtos. Porém, é necessário analisar a amplitude e a duração destes fenômenos. Levando em consideração que cada circuito elétrico terá um comportamento diferente, o transitório não tem uma única representação. As simulações e resultados coletados, juntamente com o conhecimento do fenômeno, auxiliam na melhor forma de lidar com a anormalidade. [2]

O sistema elétrico pode sair do seu regime permanente entrando em oscilações bruscas de tensão e/ou corrente por algumas razões. As causas podem ser classificadas sendo de origem interna pelo chaveamento de cargas indutivas, capacitivas, e de origem externa pelas descargas atmosféricas, e curto-circuito. Provocando assim, sobretensões, sobrecorrentes, e formas de ondas anormais no sistema.

As sobretensões podem ser causadas basicamente por duas adversidades, uma descarga atmosférica, ou por condições quase estacionarias, como por exemplos, uma rejeição de carga. O que gera um transtorno no sistema elétrico, tirando do seu regime estacionário e colocando seus equipamentos além de suas condições nominais.

3.1 – Poluição na Rede

O aumento dos circuitos chaveados de eletrônica de potência e, conseqüentemente, das formas de onda de tensão e corrente não-senoidais, a compensação da potência reativa passou a ser um problema mais complexo devido à potência harmônica presente nos sistemas. [1]

Porem, certos avanços tem os seus preços. Uma das causas dessa poluição é a descontinuidade de corrente e tensão, causadas pelo excesso de cargas não lineares, conectadas a rede elétrica, como por exemplo, computadores, aparelhos eletrônicos, e inversores de frequência. Isto deforma a onda não deixando com que ela fique senoidal, caracterizando assim as harmônicas. As ondas não senoidais podem ser decomposta através da série de Fourier como mostrada na figura 3.1.

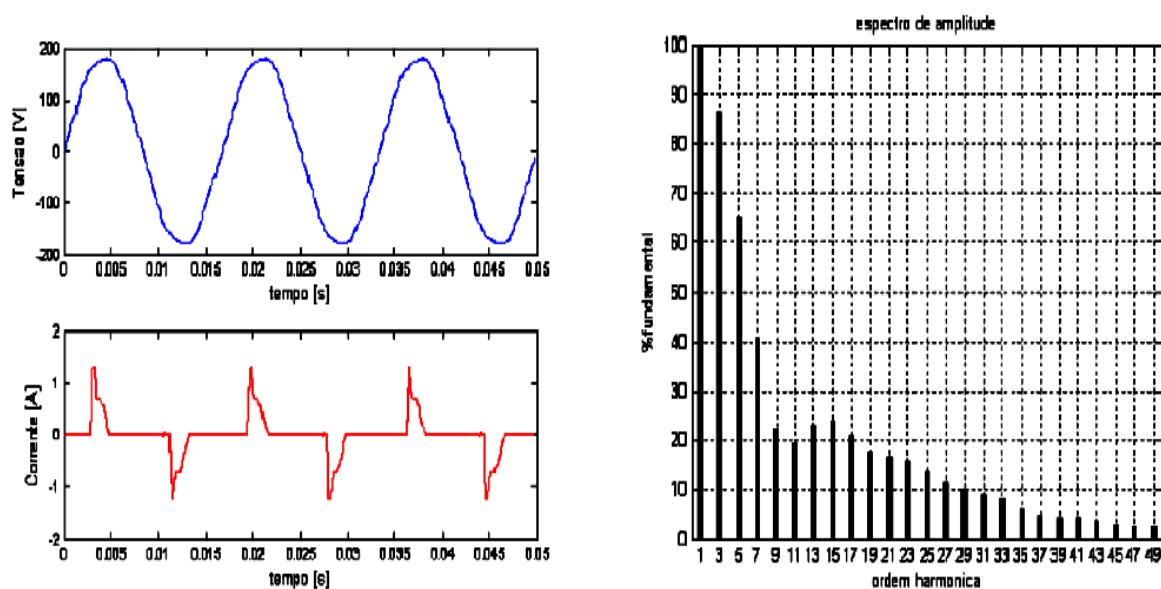


Figura 13.1 - Exemplo de um onda não senoidal de corrente decomposta e seu aspecto de uma lâmpada Fluorescente Compacta. Fonte : [4]

Tabela 1 – Ordem, Frequência e sequencia das harmônicas.

Ordem	Frequência (Hz)	Sequencia
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n*60	(+, -, 0)

As harmônicas são frequências múltiplas da frequência fundamental 60 Hz, como mostrado na tabela 1. Essas percorrem todo o sistema elétrico,

prejudicando o funcionamento dos equipamentos conectados nessa rede. Os malefícios das harmônicas são muitos, como por exemplo, o aquecimento dos cabos, perda por efeito Joule, e diminuição da vida útil das cargas.

3.2 - Tipos de transitório eletromagnético

Algumas biografias divide o transitório em dois grupos, sendo o transitório impulsivo que ocorrem devido às descargas atmosféricas e os transitórios oscilatórios ocasionados pelo chaveamento de cargas.

3.2.1 - Transitório Impulsivo

No transitório impulso, as variações bruscas de corrente e/ou tensão são causadas por descargas atmosféricas. Os impulsos causados são unidirecionais, ou seja, polaridade positiva ou negativa como pode ver no gráfico da figura 3.2.

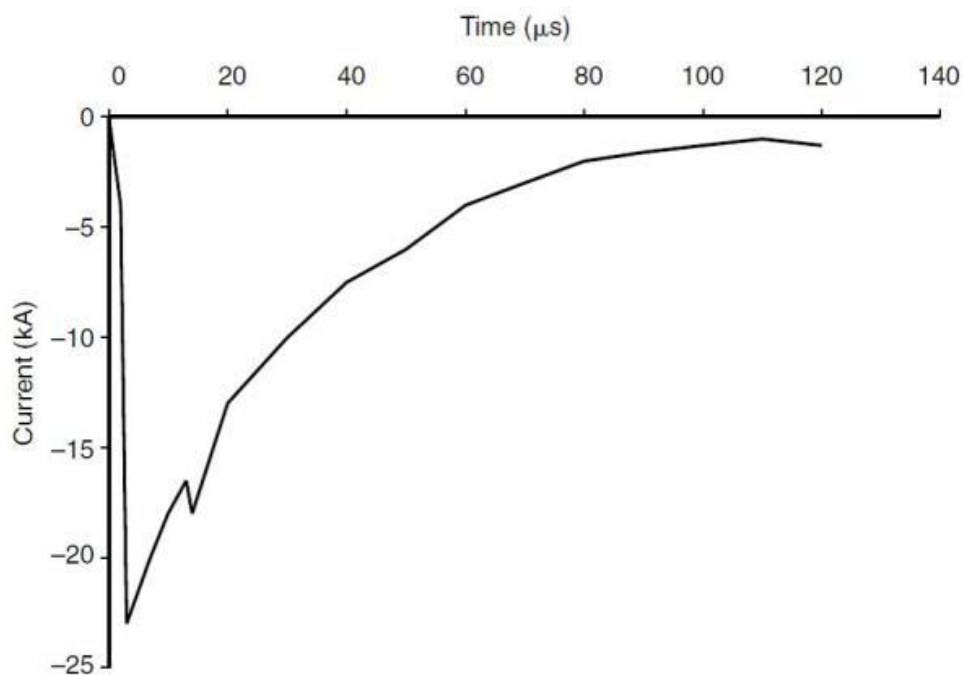


Figura 3.2 - - Transitório impulsivo. Fonte: [1]

O que caracteriza o transitório eletromagnético é a variação, o tempo de queda e subida da tensão e/ou corrente. Essa variação é analisada por cada conteúdo espectral. Por exemplo, o que atinge 1500 V na subida que ocorre em 1,3us, e volta a zero em 35us, será um transitório de $1,3 \times 35us = 1500$ V.[1]

Quando se trata de uma descarga atmosférica existem muito caminhos nos quais a corrente pode percorrer. O mais provável é pelo condutor fase, no primário ou no secundário, tendo como efeito sobretensão no sistema elétrico.

Um dos métodos para tratar desses distúrbios é os Dispositivos de Proteção contra Surtos, conhecidos como DPS.

3.2.2 - Transitório Oscilatório

O transitório oscilatório, diferentemente do transitório impulsivo tem maior numero de causas. Podendo ser causado, como por exemplo, pela energização do sistema, corte de cargas indutivas, eliminação de faltas, e pelo chaveamento de banco de capacitores. [3]

Nesse transitório a variação acontece nos dois sentidos, tanto positivo quanto negativo, como segue a figura 3.3. O transitório oscilatório pode ser dividido em três grupos de frequência. A figura mostra um transitório oscilatório.

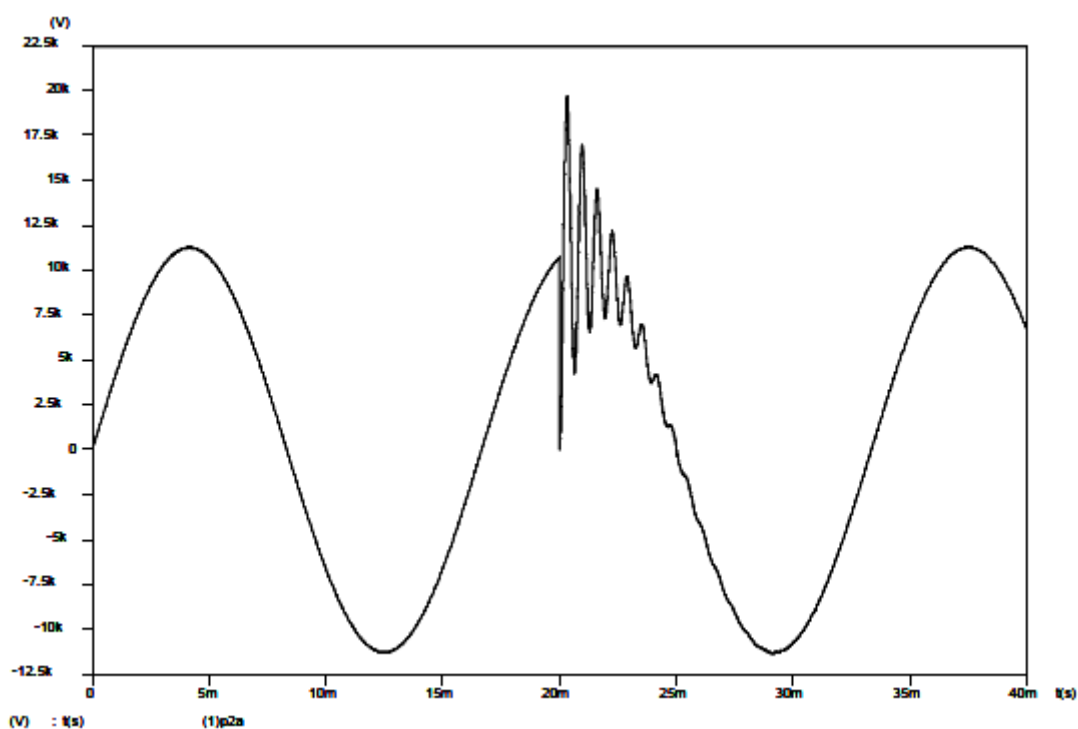


Figura 3.3 – Transitório oscilatório. Fonte: [3]

O transitório de frequência baixa encontrado nos sistemas de distribuição das concessionárias. Transitório oscilatório de frequência media que pode ser causado por disjuntores de proteção que atuam em eliminação de faltas, compreendido entre 5 e 500 kHz. No terceiro grupo, transitório

oscilatório de frequência alta, podendo ser causados por chaveamento de cargas indutivas, com frequência maiores que 500 kHz.

3.3 – Parâmetros e formulação matemática dos circuitos elétricos

3.3.1 – Parâmetros

Todo e qualquer circuito elétrico é constituído por indutância, resistência, e capacitância em maiores ou menores números.

As indutâncias e as capacitâncias possuem a capacidade de armazenar energia: L no campo magnético ($\frac{1}{2} LI^2$) e C no campo elétrico ($\frac{1}{2} CV^2$). O comportamento de tais componentes, sofrem mudanças do seu período permanente para o período transitório. Em períodos transitórios ocorre uma redistribuição desta energia, comandada pelo princípio da conservação de energia e de modo que a corrente nas indutâncias e a tensão sobre as capacitâncias não variem bruscamente. [2]

3.3.2 – Formulação matemática

Para fazer um análise matematicamente, iremos pegar como exemplo um circuito RC. Como mostrado na figura 3.4 que ao se fechar a chave, a corrente flui no circuito no sentido horário, passando pela resistência e carregando o capacitor.

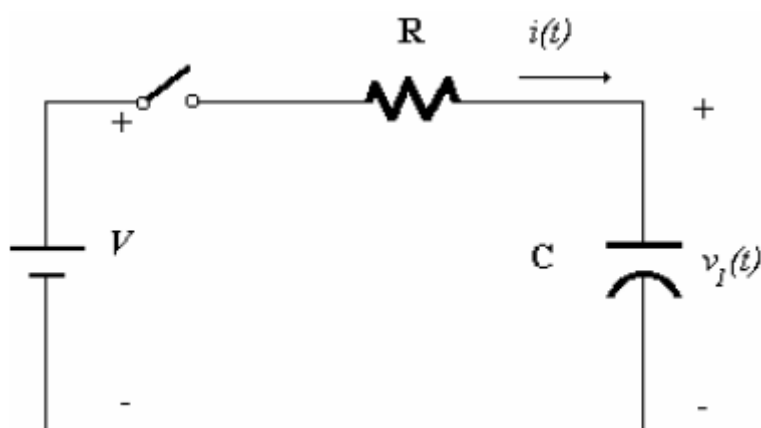


Figura 3.4 – Circuito RC. Fonte: [2]

No circuito da figura 3.4 no instante em que a chave é fechada, tem – se;

$$V = R \cdot i(t) + v_1(t) \quad (2.1)$$

$$v_1(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + v_1(0) \Rightarrow C dv_1(t) = i(t) dt \quad (2.2)$$

$$i(t) = C \frac{dv_1(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Realizando a substituição da equação 2.3 na equação 2.1.

$$V = RC \frac{dv_1(t)}{dt} + v_1(t) \quad (2.4)$$

$$\frac{dv_1(t)}{V - v_1(t)} = \frac{dt}{RC} \quad (2.5)$$

$$\ln[V - v_1(t)] = -\frac{t}{RC} + cte \quad (2.6)$$

$$v_1(t) = V - Ae^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.7)$$

O valor de A sendo considerando uma constante, e fazendo a substituição, na equação 2.7.

$$v_1(t) = V - [V - v_1(0)]e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.8)$$

3.4 – Método da transformada de Laplace

A transformada de Laplace é uma fórmula puramente algébrica de calcular tensões e correntes transitórias em circuitos elétricos. A análise a seguir, é considerando o circuito com a chave fechado e com o tempo superior a zero.

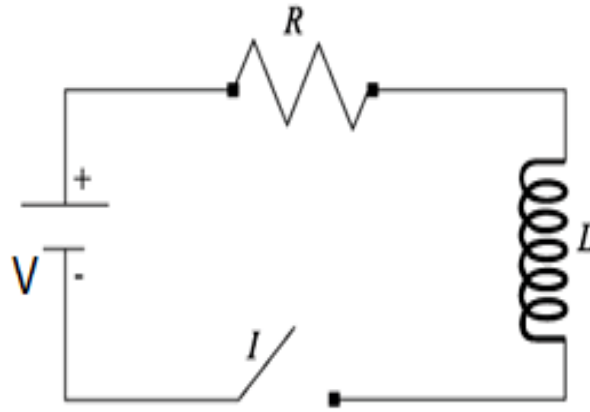


Figura 3.5 – Circuito RL para transformada de Laplace. Fonte: [2]

$$\frac{V}{s} = R.I(s) + sL.I(s) \quad (2.9)$$

$$I(s) = \frac{\frac{V}{s}}{R + sL} = \frac{V}{s(sL+R)} \quad (2.10)$$

$$I(S) = \frac{\frac{V}{L}}{s(s + \frac{R}{L})} \quad (2.11)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação 2.11, a equação correspondente será a equação 2.12.

$$i(t) = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} \cdot e^{-RL} \text{ A} \quad (2.12)$$

Referencia

[1] MARTINHO, E. **Distúrbios da Energia Elétrica – qualidade de energia, conceitos, cuidados, soluções, normalização**. São Paulo: Érica, 2009.140 p.

[2] HAFFNER, S. **Introdução aos Transitórios Eletromagnéticos**. Apostila Transitório Eletromagnético – Universidade do Estado de Santa Catarina. Disponível em: http://slhaffner.phpnet.us/transitorios_eletromagneticos/transitorios01.pdf
Acesso em: 30 de Setembro de 2013.

[3] CORRÊA, F. I. M. **Estudo de um Sistema de Distribuição com Enfoque na Qualidade da Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

[4] SILVEIRA, R. F. **Filtro Ativo de Potência: Conceito e Ferramentas Matemáticas**. 2013. 59 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Goiás, Jataí, Brasil.

4 – ANÁLISE DO TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO POR MEIO DE VARIÁVEIS DE ESTADO

4.1 – Introdução

Uma linha de transmissão é o meio que se utiliza para entregar a energia produzida a seus consumidores. Definem-se linhas de transmissão como sistemas físicos que transportam um sinal elétrico entre um gerador e uma carga, através de um campo eletromagnético. [1]

A distancia percorridas por essas linhas de transmissão são cada vez maiores. As fontes geradoras estão distantes dos centros urbanos, consumidores finais. O que gera problemas como percas ou surtos no sistema elétricos, ocasionados por algum chaveamento de componente interligados ao longo dos quilômetros ou uma descarga atmosférica. Esses fatores levam os componentes elétricos além de suas condições nominais, devido ao transitório eletromagnético. Assunto este que foi explanado em capítulos anteriores.

No entanto é necessários fazer estudos e ensaios nas linhas de transmissão, mas como não é viável realizar isso na própria linha. Existem softwares, cada vez mais eficientes que consegue o mesmo resultado.

4.2 – Linha de Transmissão

No trabalho simula-se uma linha de transmissão por uma cascata de circuitos no modelo π . A representação pelo modelo π é constituída condutância, resistência, indutância e capacitância. A associação série e paralela de resistores e indutores que é inserida em cada um dos circuitos forma a cascata. Esta cascata é então descrita por meio de variáveis de estado. [2] A figura 4.1 ilustra o sistema.

A representação da linha por meio de variáveis de estado pode ser utilizada no ensino de conceitos básicos de propagação de ondas em linhas de transmissão. [2]

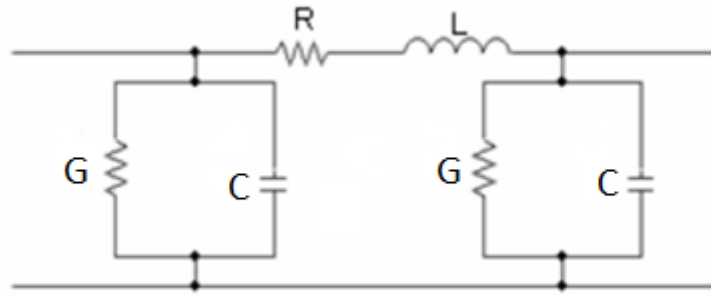


Figura 4.1 - Circuito π para a linha de transmissão

O valor associado a cada parâmetro da cascata de circuitos π , tais como, resistência, indutância, condutância e capacitância, faz-se o seguinte cálculo: Multiplicam-se tais valores distribuídos pelo comprimento da linha, dividindo o resultado pelo numero de circuitos utilizados para modelar a linha. [1] Com isso, tem-se:

$$R = R' \frac{d}{n} ; L = L' \frac{d}{n} \quad (3.1)$$

$$G = G' \frac{d}{n} ; C = C' \frac{d}{n} \quad (3.2)$$

4.3 – Desenvolvimentos Matemáticos

A forma de simular o comportamento do transitório eletromagnético neste capítulo, é distinta das formas mostradas nos capítulos anteriores deste trabalho. Porém, esta é a forma como a maioria dos softwares de simulação do transitório em sistemas elétricos trabalha. Utilizando variáveis de estado.

Para desenvolver este método é necessário interpretar os parâmetros da cascata de circuitos PI e transforma-los em matriz com as variáveis de estado.

Existem alguns softwares que conseguem essa mesma simulação, sem seguir todos esses passos de transformação conforme é necessário no software Matlab. Um dos softwares mais utilizados para a simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão é o *Eletromagnetic Transients Program*, EMTP.

Para análise da linha de transmissão, modela-se o circuito π em variáveis de estado e estende-se para os demais π 's, mostrando-se assim, a

Referencia

[1] SILVA,V.A.F; CANÔNICO,R.B; KUOKAWA, S. **Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em Uma Linha de Transmissão por Meio de Variáveis de Estado.** Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina (DEEL/CTU/UEL).

[2] KUOKAWA, S; YAMANAKA, F.N.R; PRADO, A.J; BOVOLATO, L.F. **Representação de linhas de transmissão por meio de variáveis de estado levando em consideração o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais.** Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de engenharia de Ilha Solteira, UNESP. Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

5 – TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA

5.1 - Introdução

Desde a antiguidade o homem vem melhorando o aproveitamento da energia. Seja a energia eólica com os moinhos de vento, ou a energia mecânica com a força dos animais. A energia sempre existiu. O que não tinham era a possibilidade de controlá-la de uma forma eficiente e prática.

A tecnologia está em um processo contínuo, sempre em busca de um melhor equipamento que traga facilidade, praticidade e confiança. Notamos essa evolução para qualquer lado que olhamos no mundo globalizado e industrializado que vivemos.

As exigências do mundo moderno não seriam supridas se não fosse à evolução da eletrônica. Os estudos sobre a eletrônica começaram a ter resultados satisfatórios a partir da década de 60, com isso, fez com que cada vez mais, fossem aprimorados os dispositivos, tornando-os mais eficientes, práticos, e acessíveis.



Figura 5.1 – Evolução da Eletrônica Fonte: Autor

A ilustração da figura 5.1 mostra de forma clara essa evolução nos meios de comunicação. Desde os telégrafos aos mais modernos celulares. Tudo isso graças aos dispositivos semicondutores diodos, transistores e tiristores.

5.2 - Teoria da Potencia Complexa Instantânea

Como notamos o sistema elétrico esta em plena mudança. Com ele trouxe alguns malefícios, com isso, a teoria convencional de calcular potência já não seria tão precisa. Portanto, fez se necessário um novo método de calcular a potência.

A nova teoria é um aprimoramento da potência convencional, porem como uma grandeza variável no tempo e aplicável a sistemas elétricos trifásicos a três condutores em quaisquer condições de operação. [1]

A Teoria da Potência Complexa Instantânea baseia-se na aplicação de vetores espaciais instantâneos, e não nos fasores convencionais da teoria de circuitos elétricos para regimes permanentes senoidais. Estes vetores são grandezas utilizadas na análise de transitórios de máquinas elétricas de corrente alternada. [2]

Entre todos os estudiosos do assunto, Akagi (1983) propôs decompor a corrente e tensão escalar nos eixos real e imaginário. Com isso, tornou-se um dos precursores desse método, para melhor resultados da analise da potência.

A Teoria da Potência Complexa Instantânea é uma teoria de Milanez [3] do ano de 1993 que baseia seus estudos na teoria de Akagi. Onde passamos a analisar a potência ativa e reativa em seu regime transitório e com ondas não senoidais.

Pelo uso vetorial é possível enxergar melhor as variações das grandezas físicas da rede elétrica. Possibilita obter a potência ativa e reativa instantânea trifásica como também para uma única fase tanto para sistemas equilibrados como para sistemas desequilibrados e/ou não senoidais. [4]

A Teoria ainda é pouca difundida entre o meio acadêmico, alguns consideram de difícil interpretação, por seu diferencial de trabalhar com vetores, mas é de grande utilidade e precisão para o estudo de potência. Alguns estudiosos do assunto estão compreendendo à melhor, para que assim, essa possa entrar nas grades curriculares.

5.3 - Transformada de Clarke

Akagi, por sua vez, utilizou a transformada de Clarke para fundamentar suas teorias.

O emprego das componentes modais, componentes zero, alfa e beta, das formulas 4.1 e 4.2, que são apresentados como componentes de Clarke, no cálculo de tensões e correntes numa rede em que há um defeito fase à terra, resultando grande simplificação no processo de calculo.[5]

A transformada de Clarke faz a transformação algébrica de um sistema de três fases abc (4.1) para um sistema $\alpha\beta$ (4.2) estacionarias, fazendo coincidir a fase α com a fase a . [1]

$$\begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

- Sistema trifásico sem o condutor neutro:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A seguir, a representação das ondas de tensão senoidais na figura sem a transformada, com os eixos V_a , V_b , e V_c e com a transformada de Clarke nos eixos V_α , e V_β .

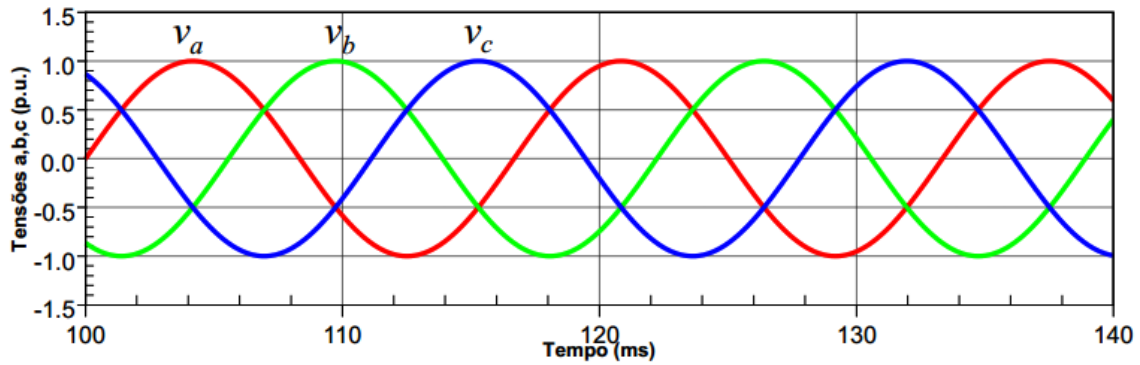


Figura 5.2 - Representação das ondas senoidais de tensão antes da transformada de Clarke. Fonte: [6]

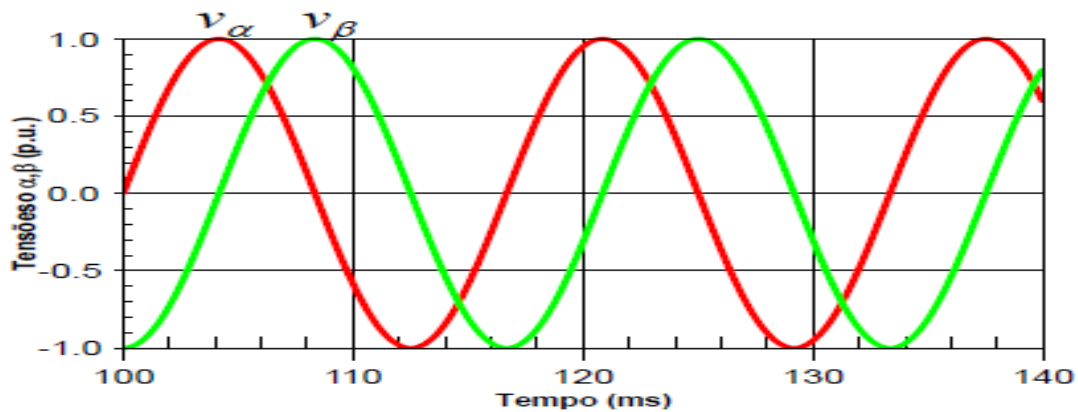


Figura 5.3 - Representação das ondas senoidais de tensão após a transformada de Clarke. Fonte: [6]

5.4 - Vetores Espaciais Instantâneos

Esses vetores, chamados pela sigla VEI, são representados no plano complexo $\alpha - \beta$. São utilizados em sistemas trifásicos operando em quaisquer condições. Com eles, podemos obter o gráfico de potência no instante de tempo desejado, para que assim, possamos analisar o transitório eletromagnético.

Defasando as fases em 120° no espaço, tem-se:

$$\tilde{V} = \frac{2}{3} (v_a + av_b + a^2v_c) \quad (4.3)$$

$$\tilde{I} = \frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2i_c) \quad (4.4)$$

Explicando sobre as formulas apresentadas, define-se “a” no valor de $e^{j2\pi/3}$ e que o $\frac{2}{3}$ na expressão é para a correção da transformada inversa nas fases a, b, e c.

No plano complexo esses valores são representados da seguinte maneira;

$$\tilde{V} = \left| \tilde{V} \right| e^{j\omega_V t} e^{j\phi_{V_0}} \quad (4.5)$$

$$\tilde{I} = \left| \tilde{I} \right| e^{j\omega_I t} e^{j\phi_{I_0}} \quad (4.6)$$

A velocidade angular do vetor tensão e corrente são analisados separadamente.

$$\omega_V = \frac{d\phi_V}{dt} \quad (4.7)$$

$$\omega_I = \frac{d\phi_I}{dt} \quad (4.8)$$

Todos os cálculos mostrados acima podem ser ilustrados no plano complexo $\alpha - \beta$.

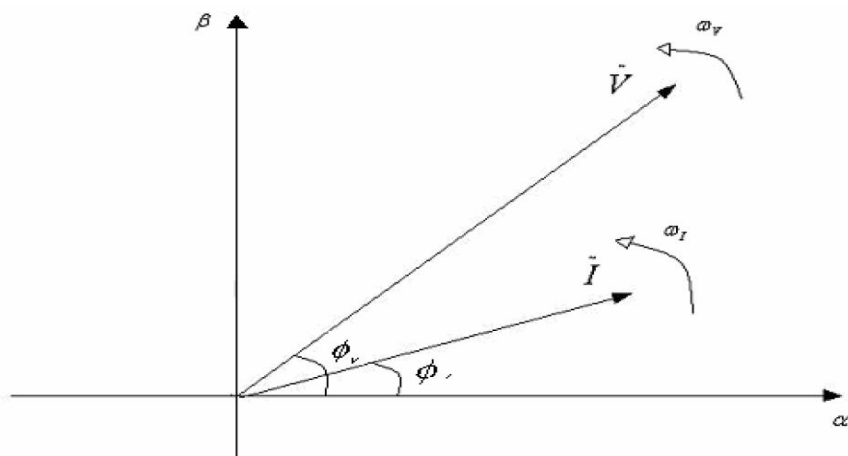


Figura 5.4 – Vetores Espaciais Instantâneos Tensão e Corrente no plano $\alpha - \beta$. Fonte: [1]

5.4. 1- Vetores Espaciais Instantâneos representados na forma cartesiana

$$\tilde{V} = V_{\alpha} + j V_{\beta} \quad (4.9)$$

$$\tilde{I} = I_{\alpha} + j I_{\beta} \quad (4.10)$$

Como citado anteriormente às coordenadas agora passaram a ser α e β . Contudo, o sistema houve uma transformação, como representado na figura a seguir.

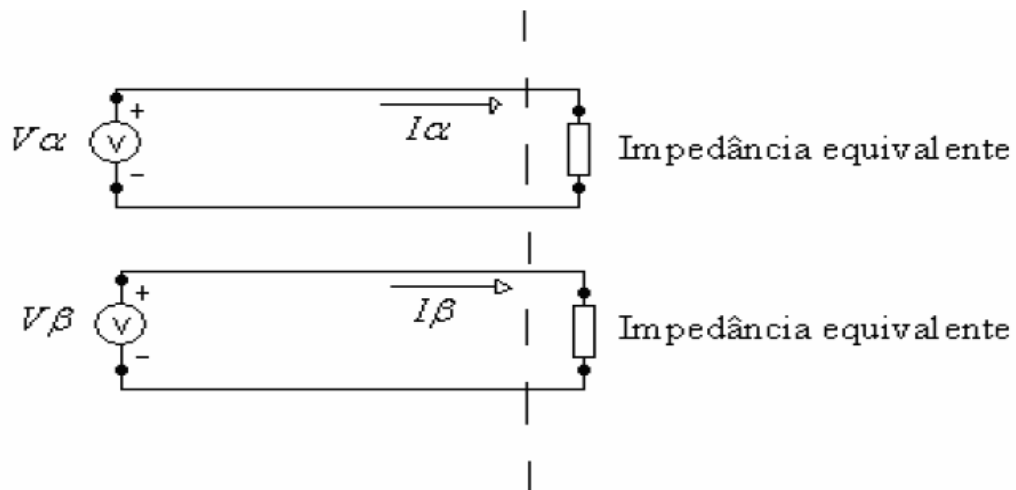


Figura 5.5 – Sistema Bifásico $\alpha\beta$. Fonte: [1]

Com base na transformada de Clarke (4.2) a Potência Ativa e Potência Reativa da Teoria de Akagi ficam na forma da matriz seguinte.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Resolvendo a matriz e fazendo as manipulações pertinentes, obtemos;

$$p = v_{\alpha} i_{\alpha} + v_{\beta} i_{\beta} \quad (4.12)$$

$$q = -v_{\beta} i_{\alpha} + v_{\alpha} i_{\beta} \quad (4.13)$$

Com as deduções anteriores, chegamos ao resultado esperado, a formula da Potencia Complexa Instantânea proposta por Milanez [3]. Ou seja, O Vetor Espacial Instantâneo Tensão (4.3) e o conjugado do Vetor Espacial Instantâneo Corrente (4.4) multiplicado por $\frac{3}{2}$.

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \tilde{V} \tilde{I}^* \quad (4.14)$$

5.4.2 – Desmembrando a Potencia Complexa Instantânea

A formula final da Potencia Complexa Instantânea que Milanez [3] obteve esta representada na equação 4.14. Nesta etapa do trabalho vamos desfragmenta-la analisando- a em partes.

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \left| \tilde{V} \right| \left| \tilde{I} \right| e^{j\varphi} = \left| \tilde{S} \right| e^{j\varphi} \quad (4.15)$$

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \left| \tilde{V} \right| \left| \tilde{I} \right| \cos \varphi + j \frac{3}{2} \left| \tilde{V} \right| \left| \tilde{I} \right| \text{sen } \varphi \quad (4.16)$$

A TPCI pode ser analisada como o somatório da Potência Ativa e Potência Reativa. Sendo a Potencia Ativa a parte real e Potência Reativa parte imaginaria.

$$\tilde{S} = P + jQ \quad (4.17)$$

$$P = \text{Real}\{\tilde{S}\} = \frac{3}{2} \left| \tilde{V} \right| \left| \tilde{I} \right| \cos \varphi \quad (4.18)$$

$$Q = \text{Imag}\{\tilde{S}\} = \frac{3}{2} \left| \tilde{V} \right| \left| \tilde{I} \right| \sin \varphi \quad (4.19)$$

O fator de potência Instantâneo FPI fornece o valor do fator de potência do sistema trifásico instantaneamente que pode ter valor variável se a velocidade relativa entre os VEI's tensão e corrente for diferente de zero.

$$FPI = \frac{P}{\left| \tilde{S} \right|} = \cos \varphi \quad (4.20)$$

Referencias

- [1] SEMENSATO, M. **Aplicações da teoria da potência complexa instantânea no cálculo das grandezas de Buchholz-Goodhue**. 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica: Sistemas de Energia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- [2] MORAES, J. P. **Aplicação da Teoria da Potência Complexa Instantânea na Análise e Estimação de Parâmetros da Máquina Síncrona em Condições Transitórias**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- [3] MILANEZ, D. L. **A Potência Complexa Instantânea Aplicada às Máquinas Elétricas Trifásicas**. 1993. 112 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- [4] SILVEIRA, R. F. **Filtro Ativo de Potência: Conceito e Ferramentas Matemáticas**. 2013. 59 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Goiás, Jataí, Brasil.
- [5] ROBBA, E. J; Kagan, N; Schmidt, H. P; **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricos**. 2º Edição ver. e ampl. São Paulo: Editora Blucher, 2000.
- [6] LIMA, K. **Transformada de Clarke e Park**. Centro de Tecnologia Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Aplicações de Eletrônica de Potência em Sistemas de Potência. Departamento de Engenharia Elétrica. Ceará.

6 – METODOLOGIA UTILIZADA

As simulações utilizadas no trabalho foram conseguidas através do software Matlab na versão R2008a. O software conta com um ambiente de simulação nomeado Simulink. Este trabalha com blocos para representar as operações matemáticas pertinentes e componentes do sistema elétrico.

A figura 6.1 mostra o sistema elétrico da principal simulação do trabalho, no ambiente de bloco do software Simulink. Todos os gráficos mencionados no trabalho vetor espacial instantâneo tensão, vetor espacial instantâneo corrente e potência complexa instantânea foram obtidos deste blocos representados na figura.

De uma forma prática e didática para entendimento, o sistema elétrico utilizado foi dividido em sub-sistemas e destacados em vermelho. Esse subsistemas mencionados são fonte de tensão equilibrado e desequilibrado (1), blocos dos cálculos dos vetores espaciais instantâneo tensão(2) e corrente(3), potência complexa instantânea (4) e a linha de transmissão no modelo π (5). No decorrer deste capítulo será explanado sobre cada um dos cinco subsistemas.

O sistema trata-se de uma linha de transmissão conectadas em modelos π 's. A simulação do transitório eletromagnético é feita pela Teoria da Potência Complexa Instantânea (TPCI) e por equacionamento em variáveis de estado, ambos no Simulink.

Utilizando a TPCI a linha de transmissão trifásica foi simulada para os seguintes casos:

- Fonte equilibrada sendo chaveada
- Fonte desequilibrada sendo chaveada
- Fonte equilibrada com curto-circuito na linha
- Fonte desequilibrada com curto-circuito na linha

A simulação em variáveis de estado pode ser realizada tanto para sistema equilibrados ou desequilibrados com cargas ou sem cargas. Porém, no trabalho a simulação do transitorio eletromagnetico por variáveis de estado foi realizada apenas em sistemas equilibrados sem carga.

Os resultados são mostrados por gráficos no capítulo 7.

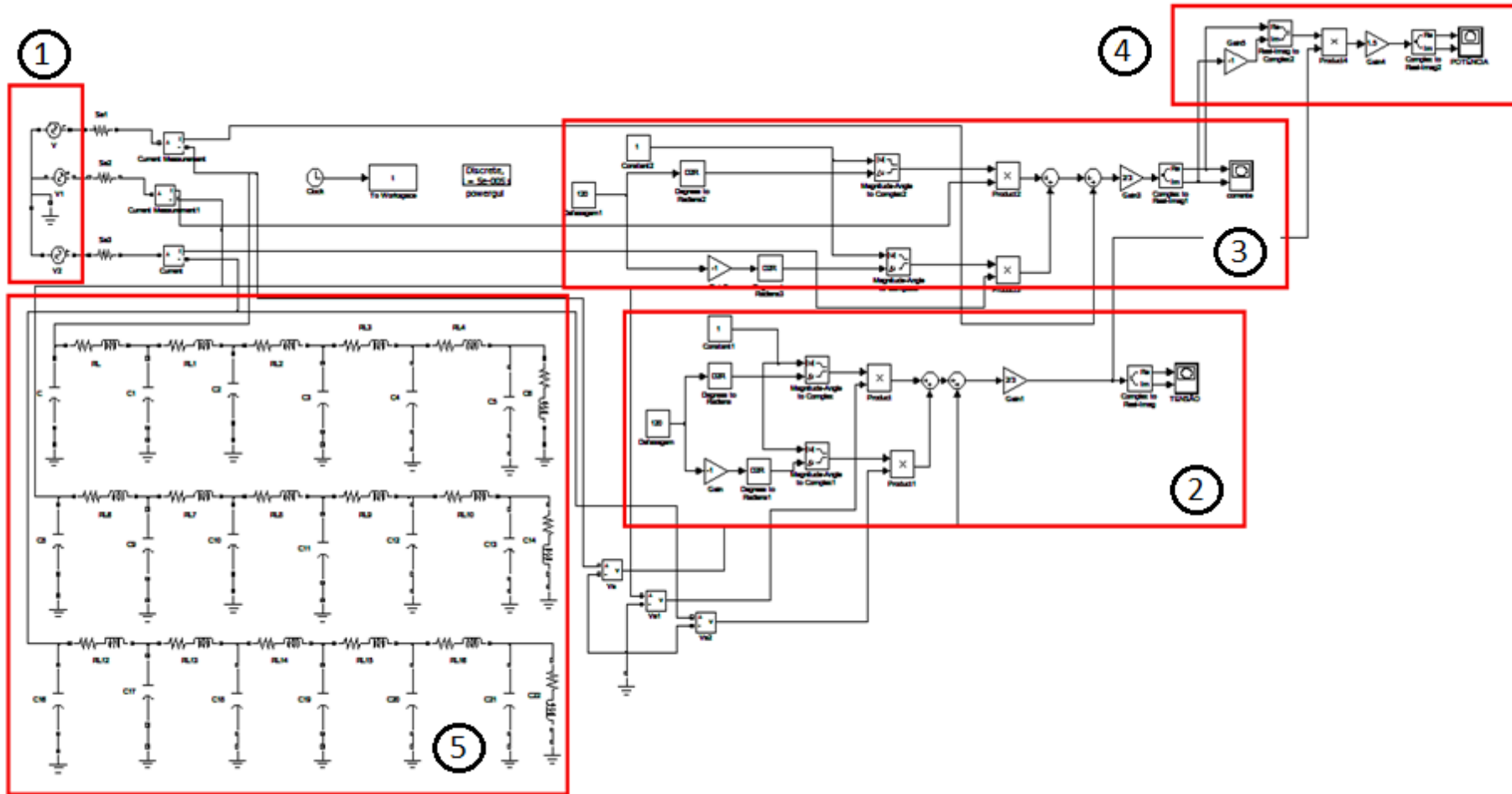


Figura 6.1 - Representação dos blocos no Simulink da principal simulação usada no trabalho. Fonte: Autor

6.1 - Fonte de Tensão

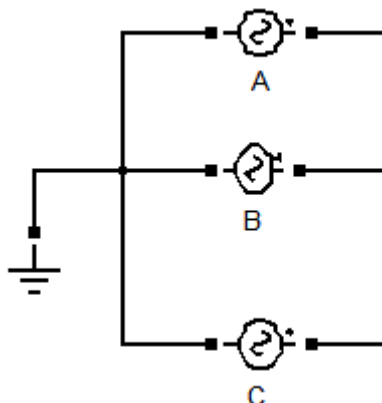


Figura 6.2 – Representação das fontes de tensão do sistema trifásico. Fonte: Autor

Durante a simulação foi utilizado um sistema trifásico, como mostrado na figura 6.2. Segue a configuração da fonte A.

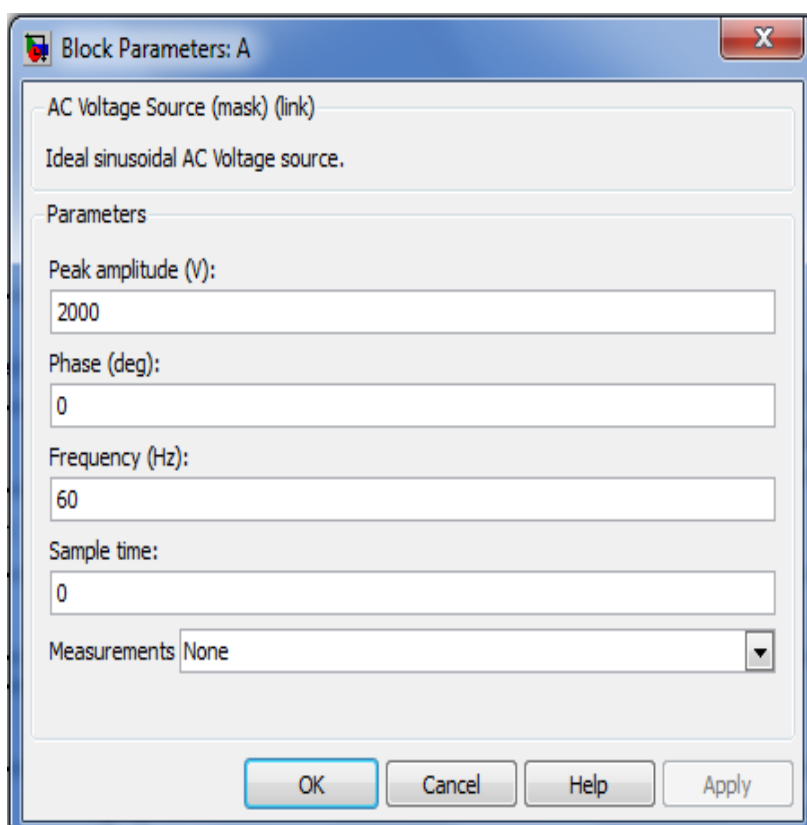


Figura 6.3 – Configuração dos parâmetros da fonte de tensão. Fonte: Autor

O bloco pode ser configurado adequando os seus parâmetros como mostrado na figura 6.3. As opções relevantes a ser alterar na janela que se

abre são a respectiva tensão, ângulo de fases, e a frequência do sistema. Nas simulações foram utilizadas fonte de tensão equilibrada e desequilibrada.

6.2 - Vetores Espaciais Instantâneos

Os blocos que calculam o vetor espacial instantâneo tensão é mostrado abaixo.

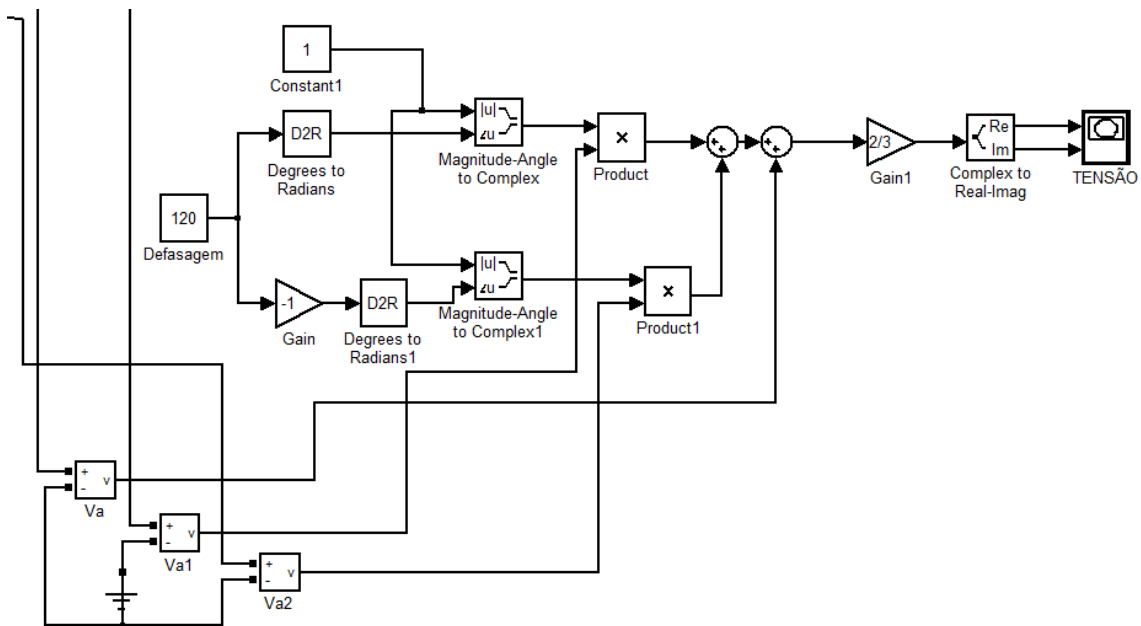


Figura 6.4 - Vetor Espacial Instantaneo tensão no ambiente Simulink. Fonte: Autor

Na simulação os blocos dos vetores de corrente e tensão não tem distinção. São usados os mesmo blocos tanto para corrente como para tensão. O que distingi é apenas que pra leitura do grafico de tensão pega-se a tensão da fonte geradora e no gráfico de corrente pega-se as correntes de fases. O software tem um bloco que plota os sinais na forma complexa, nomeado no Simulink como “XY Graph”.

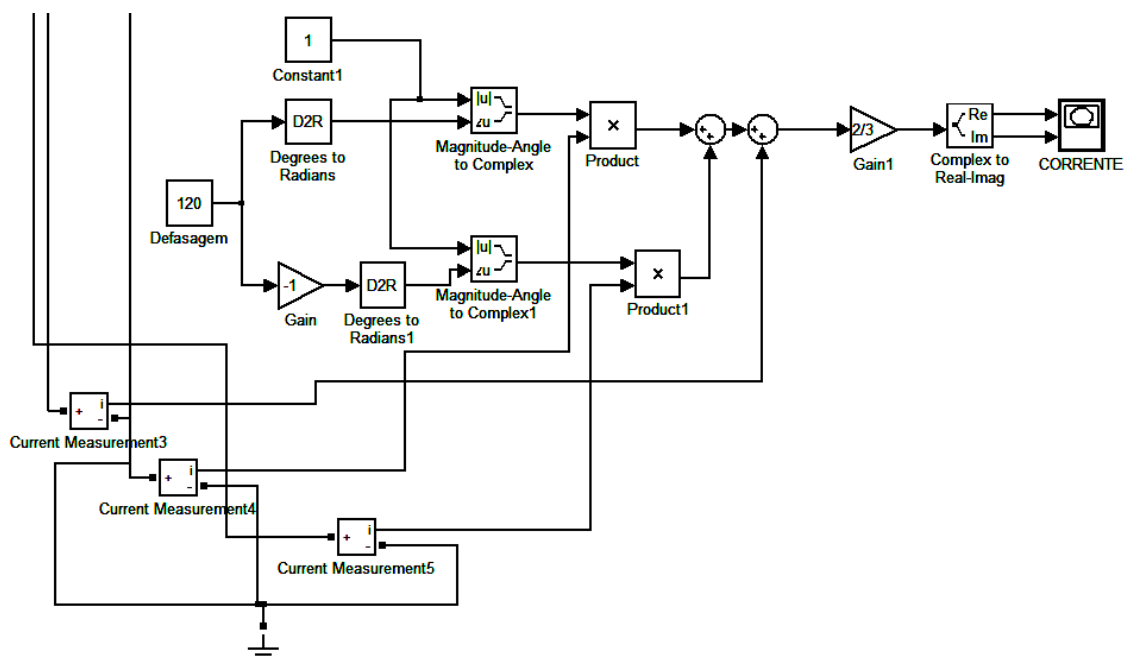


Figura 6.5 - Vetor Espacial Instantaneo corrente no ambiente Simulink. Fonte: Autor

6.3 - Potência Complexa Instantânea

A potência complexa instantânea é calculada multiplicando o vetor espacial instantâneo tensão pelo conjugado da corrente e o resultado multiplicado por $\frac{3}{2}$.

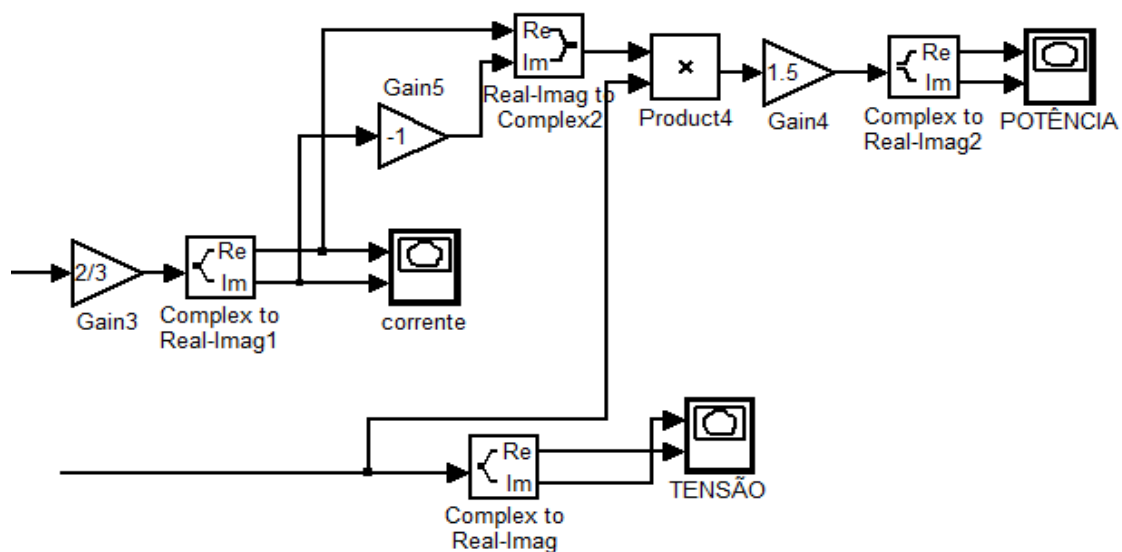


Figura 6.6 - Representação Potência Complexa Instantane no ambiente Simulink. Fonte: Autor

6.4 - Linhas de Transmissão

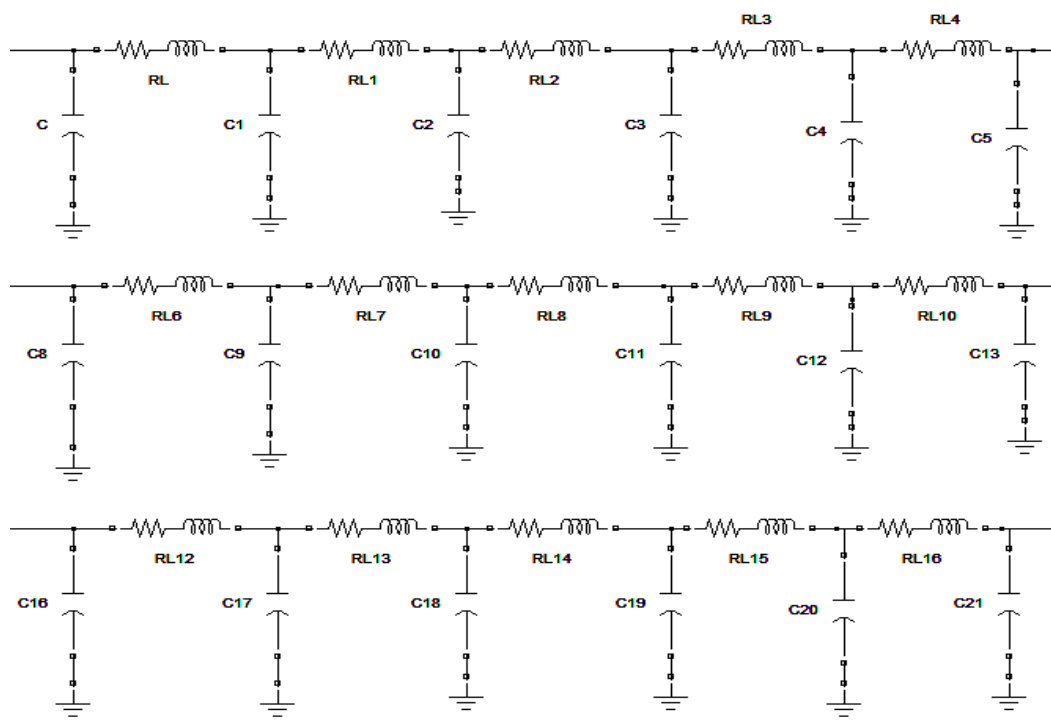


Figura 6.7 - Representação da linha de transmissão no modelo π Fonte: Autor

O modelo escolhido para a representação da linha de transmissão foi o modelo π . Este é constituído por um resistor, indutância, e capacitor. Uma linha de transmissão pode ser representada por infinitos conjuntos π .

No trabalho a linha foi representada por cinco conjuntos. O sistema é representado por fases, como mostrado na figura 6.7.

A quantidade e o seu respectivo dimensionamento, ficaram sendo, o valor de cada resistor de $2,5 \cdot 10^{-3} \Omega$, as indutâncias com $5 \cdot 10^{-4} \text{ H}$ e os capacitores com $5,55 \cdot 10^{-9} \text{ F}$. [8]

7 – SIMULAÇÃO DO TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO

Nos capítulos anteriores fez se uma explanação sobre o transitório eletromagnético e suas respectivas simulações, no software Matlab em seu ambiente de simulação simulink.

As simulações foram divididas em duas partes. O primeiro grupo de simulações foram realizadas com o bloco do simulink “*Three-Phase Fault*” e o segundo com o bloco “*Three-Phase Breaker*”. Foram utilizadas fontes de tensão equilibradas e desequilibradas.

7.1 - Simulação de curto-circuito trifásico em linhas de transmissão

Na primeira parte de simulações do trabalho obteve se as faltas, ou curto-circuito, que ira ocorrer na linha de transmissão, linha essa descrita anteriormente. As faltas poderão ser monofásica, bifásica, ou trifásica, ou seja, entre qualquer fase e o terra. Porém, para o melhor entendimento dos resultados simulou se apenas as faltas trifásicas. A opção por esse tipo de falta foi por apresentar alguns modelos de gráficos mais didáticos.

Para conseguir essas simulações, utilizou-se o bloco “*Three-Phase Fault*” (Falta Trifásica), do ambiente Simulink. Neste bloco o usuário tem a opção de programa-lo, podendo escolher o tipo de falta, a resistência, capacitância e o instante que ela ira ocorrer.

O bloco foi pré-programado para ocasionar faltas trifásicas no sistema elétrico. Com isso, obtém a leitura dos vetores espaciais instantâneos corrente, vetores espaciais instantâneos tensão e a leitura da potência complexa Instantânea. A figura 7.2 mostra como é feita essa parametrização do bloco.

As simulações para que obtenha um melhor entendimento e visualização do gráfico, foram divididas em dois estágios, antes e depois do transitório eletromagnético.

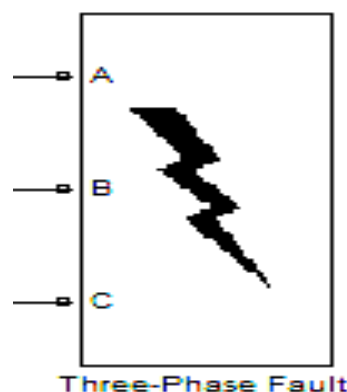


Figura 7.1 - Bloco Simulink responsável pelo curto-circuito

O bloco deixa como opcional, o local onde conecta-lo, para ocorrer a falta, sendo que esse local deve ser propício para tal acontecimento. Na simulação em questão, esse foi conectado no meio da linha de transmissão.

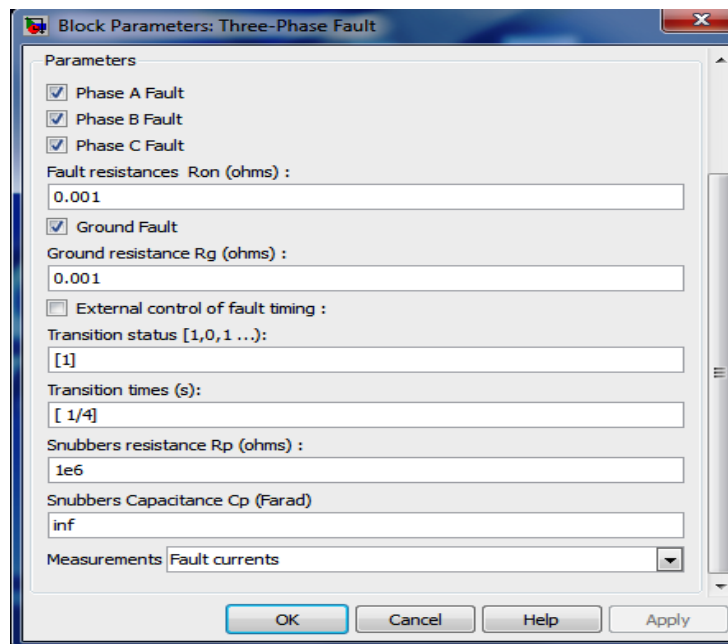


Figura 7.2 - Configurações do bloco Simulink responsável por causar as faltas.

7.1.1 - Sistema trifásico equilibrado

O sistema elétrico para ser considerado equilibrado certas condições deve ser satisfeitas, entre elas, a defasagem entre as fases A, B e C de 120° e tensão de mesmo módulo em todas elas. Como mostrado na equação

$$\mathbf{E}_a = E \angle 0^\circ \quad \mathbf{E}_b = E \angle -120^\circ \quad \mathbf{E}_c = E \angle -240^\circ \quad (6.1)$$

Sendo estabelecidas as condições acima, as correntes, circulando em cada uma das fases, podem ser representadas da seguinte forma;

$$I_A = \frac{E}{Z} \quad I_B = \frac{E \angle -120^\circ}{Z} \quad I_C = \frac{E \angle -240^\circ}{Z} \quad (6.2)$$

No sistema elétrico a ligação trifásica tem certas vantagens sobre a ligação monofásica, como por exemplo, a viabilidade técnica e a questão econômica.

7.1.1.1 – Vetor Espacial Instantâneo tensão com fonte de tensão equilibrado

Todas as simulações teve duração de 1 segundo e o sistema foi pré-programado, para sair do seu regime permanente, e entrar em seu período transitório (curto-circuito) no instante igual há 0,25 segundos. O gráfico da figura 7.3 representa bem o comportamento da tensão em seu regime permanente. No instante em que se inicia o sistema elétrico, até o instante próximo há 0,25 segundos o sistema esta em regime permanente.

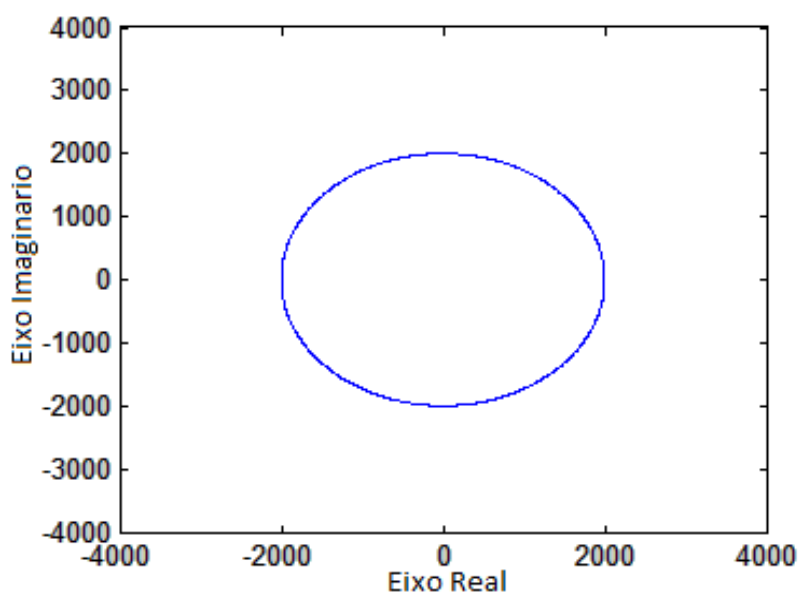


Figura 7.3 – Vetor espacial instantâneo de tensão no regime permanente

O gráfico de tensão em seu regime permanente é simétrico. A corrente também é simétrica.

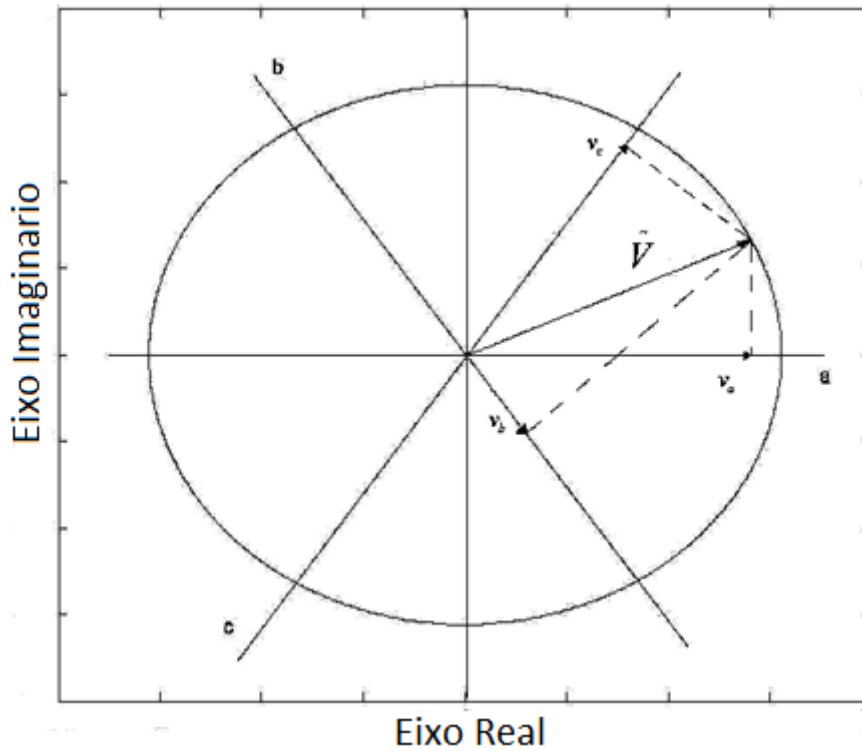


Figura 14 – Simetria do vetor espacial instantâneo tensão

O gráfico da figura 7.4 tem caráter ilustrativo para demonstrar a simetria das três fases do sistema elétrico, quando estão equilibradas. Durante o trabalho esta demonstração será mencionada.

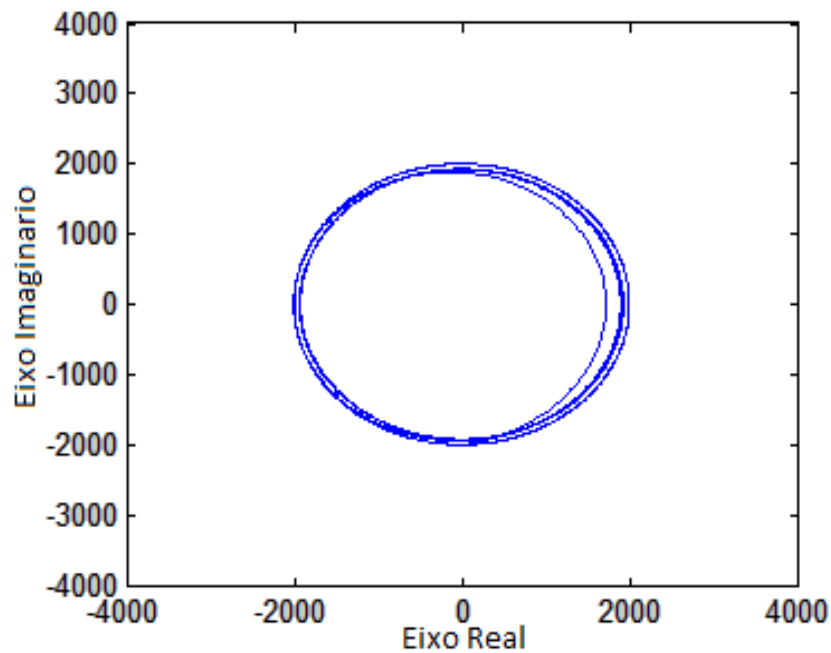


Figura 15 – Vetor espacial instantâneo tensão transitório

Como mencionado anteriormente, o período transitório é de curta duração mais com condições severas. Portanto, é isso que está representado no gráfico da figura 7.5. No transitório, este sai do seu regime permanente, tendo picos de tensão, onde está representada pelas margens fora da região de maior contorno. Porém, quando acaba o surto, este retorna para o regime permanente, representado no gráfico pela área de maior contorno, área mais escura.

7.1.1.2 – Vetor Espacial Instantâneo corrente no sistema equilibrado

O gráfico representa o vetor espacial instantâneo corrente no sistema trifásico equilibrado. Durante o trabalho será apresentado os gráficos de um sistema desequilibrado, a distinção entre ambos é nítida.

Nos casos do transitório de corrente, este acontece de forma distinta dos demais, tensão e potência. O pico de corrente é mais brusco. Como podemos perceber nas escalas dos gráficos. Fez se necessário uma maior ampliação para que pudesse acompanhar a trajetória da corrente.

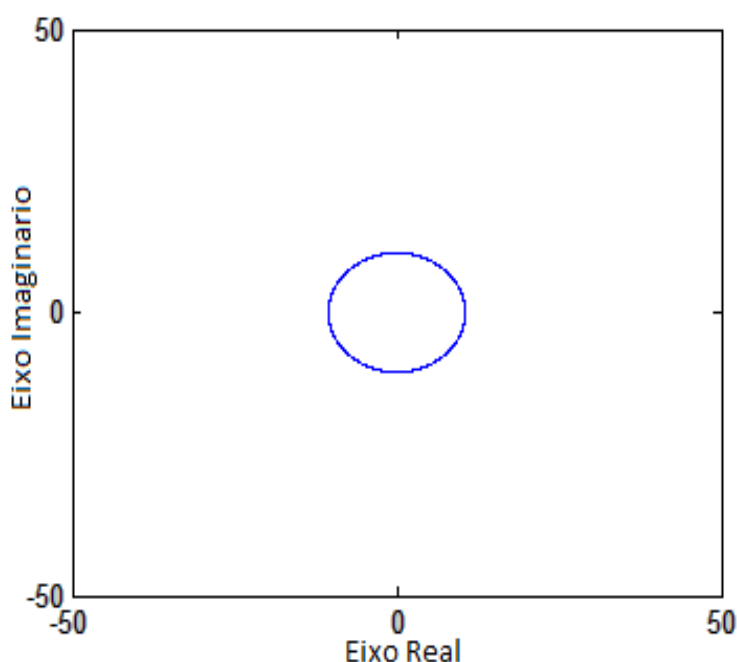


Figura 16 – Vetor espacial instantâneo corrente no regime permanente

A figura 7.6 representa o vetor espacial instantâneo corrente com a fonte de tensão equilibrada. Com isso, observa-se a simetria do gráfico.

Nesta figura 7.7 já corresponde o período transitório da simulação, compreendido após o instante de 0.25 segundos, quando o bloco atua fazendo o curto-circuito nas três fases do sistema. O sistema sai do seu regime

permanente, região representada no gráfico pelo círculo simétrico, e indo para as suas oscilações, região fora do círculo simétrico. Devido o transitório ser um fenômeno de curta duração, o sistema retorna ao seu regime permanente após alguns segundos, retornando a região simétrica, finalizando assim a simulação.

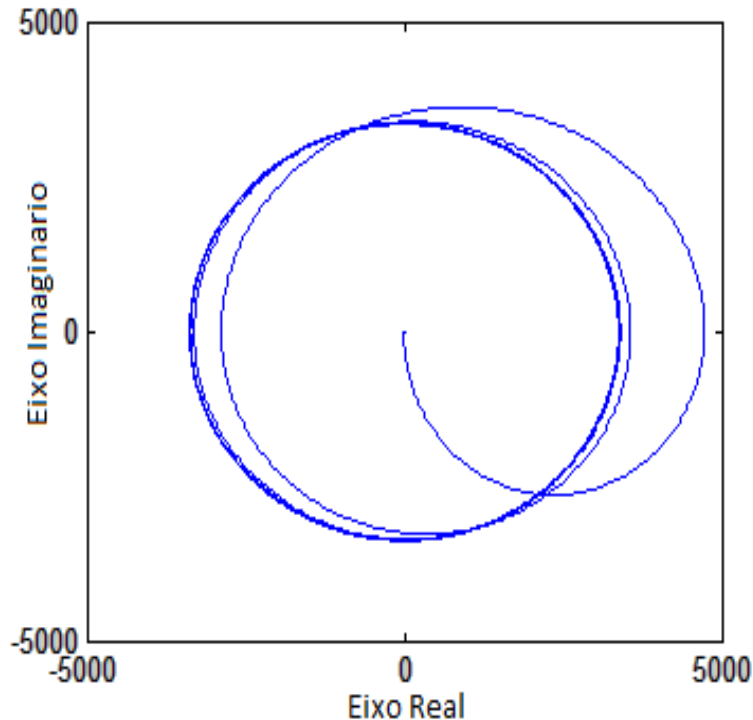


Figura 17 – Vetor espacial instantâneo corrente transitório

7.1.1.3 - Potência Complexa Instantânea no sistema equilibrado

A análise da potência complexa instantânea, neste caso, foi feita distintamente da análise do vetor espacial instantâneo tensão e vetor espacial instantâneo corrente. Na potência obteve apenas um gráfico na simulação para representar os dois estágios, ou seja, regime permanente e transitório eletromagnético.

Observa-se o gráfico, no instante que se inicia a simulação, instante zero até o instante que acontece a falta trifásica no sistema, 0.25 segundos, o gráfico está em seu regime permanente, estático, eixo real e eixo imaginário constante. Após, a falta trifásica acontece o transitório, a representação que se observa é o transitório eletromagnético, logo depois, o gráfico caminha fazendo a forma de um espiral, tendendo ao regime.

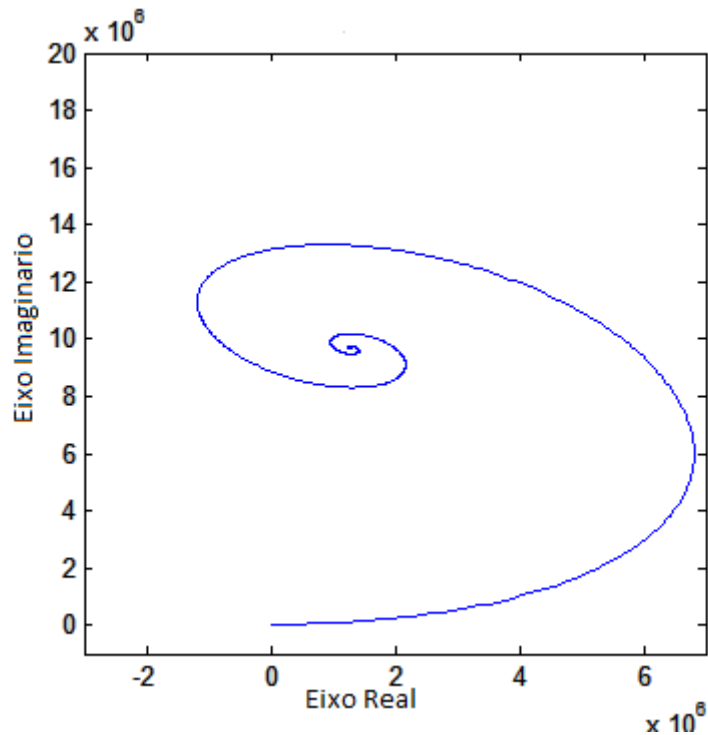


Figura 18 – Potência complexa instantânea sistema equilibrado

7.1.2 - Sistema trifásico desequilibrado

O sistema trifásico desequilibrado é o contrário do que foi mencionado no sistema equilibrado. Se uma das condições ou parâmetros não for estabelecido o sistema deixa de ser equilibrado, passando a ser desequilibrado.

Os parâmetros utilizados na simulação para fonte de tensão desequilibradas foram: Na fase A tensão de 2000 Volts, ângulo 0° e frequência de 60 Hz. Na fase B tensão de 1000 Volts, ângulo 30° e frequência de 100 Hz. Na fase C tensão de 4000 Volts, ângulo 180° e frequência de 50 Hz.

Quando isso acontece os gráficos de tensão, corrente e potência perdem a simetria. Observa-se nas simulações que se seguem.

7.1.2.1 - Vetor Espacial Instantâneo Tensão com a fonte de tensão desequilibrado

A figura 7.9 esta representando o gráfico do vetor espacial instantâneo tensão, no regime permanente, por uma fonte de tensão desequilibrada. Esta ilustração corresponde do instante inicial de simulação ate o instante de 0.25

segundos. Neste instante o bloco atua com curto-circuito, provocando o transitório.

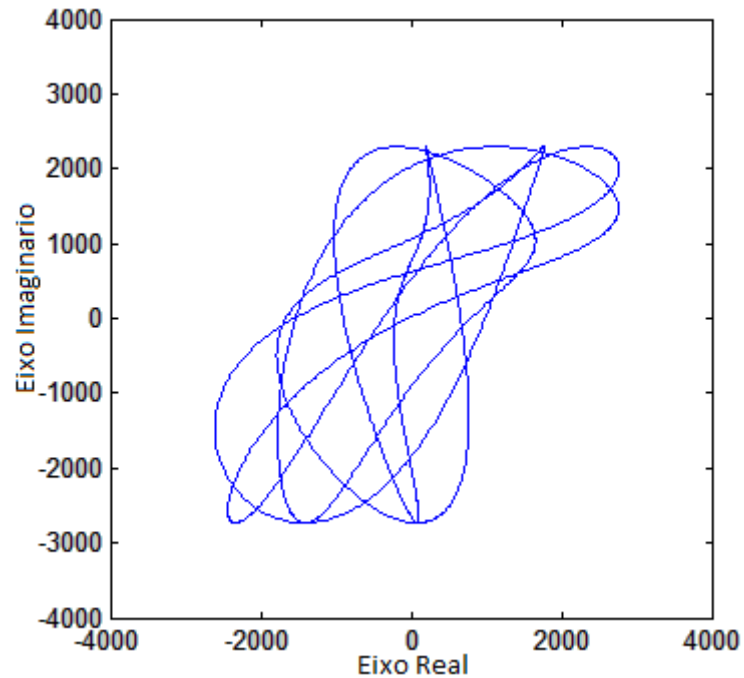


Figura 19 – Vetor espacial instantâneo tensão no regime permanente

A figura 7.10 da continuidade a figura 7.9. Porém, representando o transitório eletromagnético. Após, o instante que o bloco atua. O sistema oscila ocasionando o transitório eletromagnético, durante alguns segundos.

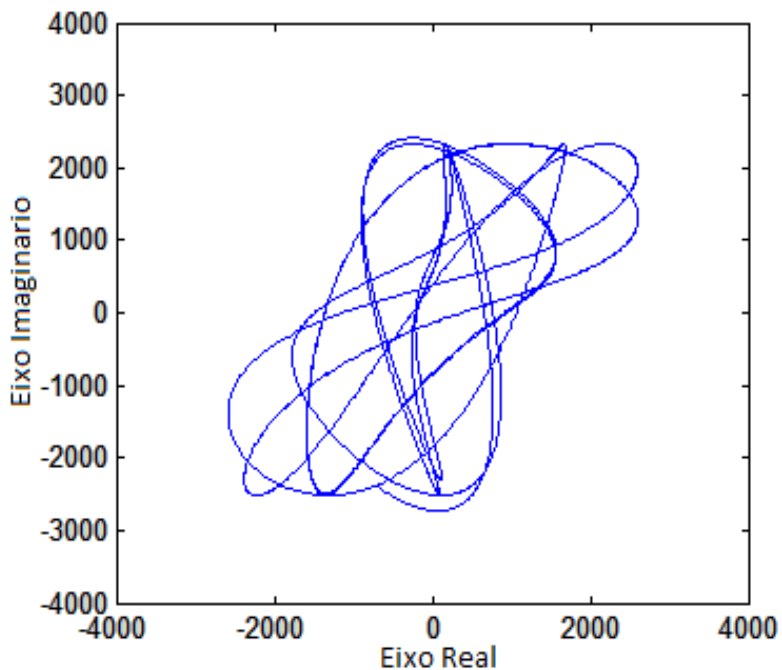


Figura 20 – Vetor espacial instantâneo tensão transitório

Na figura anterior o sistema estava em regime permanente, as linhas estavam com certa conformidade, no transitório, figura 7.10 observa-se o contrário. A região de maior contorno, região mais forte, representa o retorno do vetor espacial instantâneo tensão para o seu estado permanente.

7.1.2.2 – Vetor Espacial Instantâneo corrente com a fonte de tensão desequilibrado

A figura 7.11 esta representando o gráfico do vetor espacial instantâneo corrente, no regime permanente, por uma fonte de tensão desequilibrada. Esta ilustração corresponde do instante inicial de simulação ate o instante de 0.25 segundos. Neste instante o bloco atua provocando o curto-circuito trifásico.

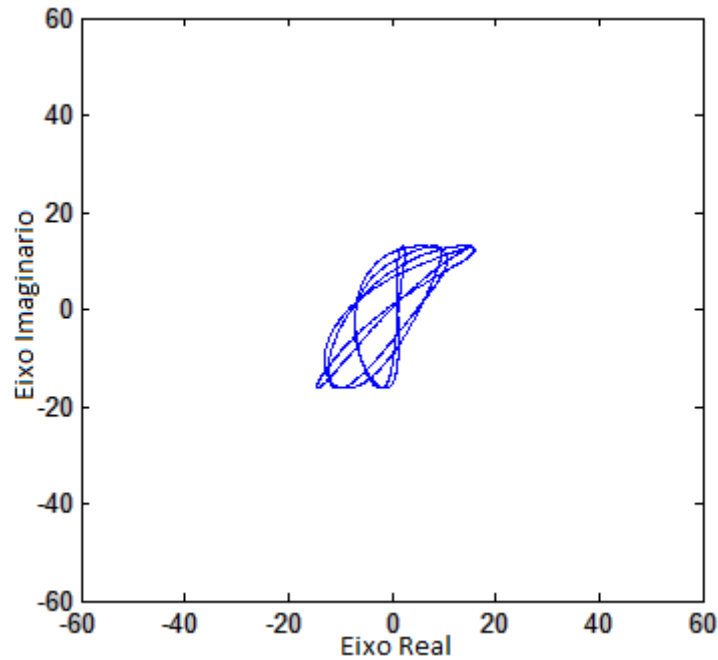


Figura 21 – Vetor espacial instantâneo corrente regime permanente

Como as simulações foram divididas em estágios, antes e após o transitório eletromagnético. A figura 7.12 da continuidade a figura 7.11. Porém, nessa ocasião representa o transitório eletromagnético. Após, o instante que o bloco atua, simulando um curto-circuito trifásico no sistema elétrico, este oscila ocasionando o transitório eletromagnético, durante alguns segundos.

No transitório ocorrem picos de corrente além dos seus valores nominais. Observa-se isso pela escala dos gráficos.

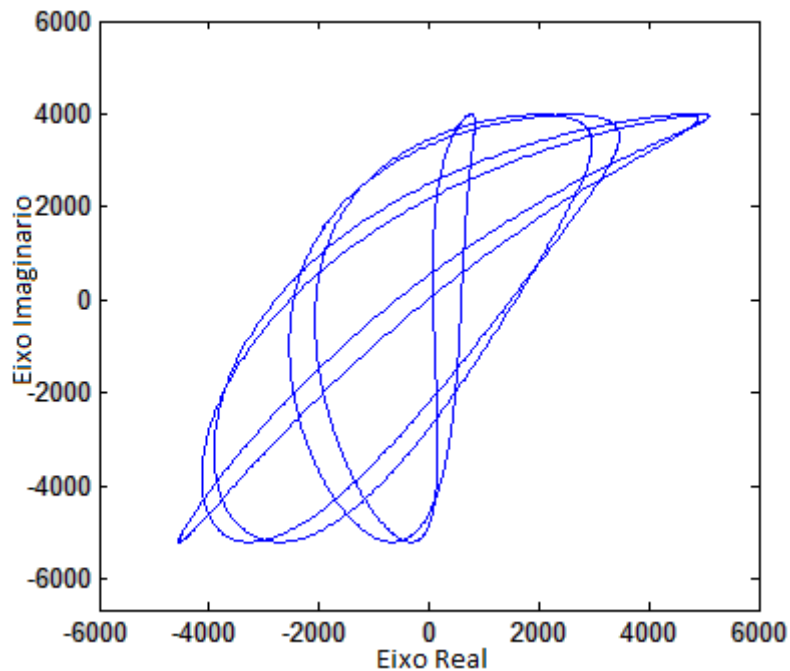


Figura 22 – Vetor espacial instantâneo corrente transitório

7.1.2.3 - Potencia Complexa Instantânea no sistema desequilibrado

A análise da potência complexa instantânea para o sistema desequilibrado foi semelhante ao sistema equilibrado. Obteve apenas um gráfico na simulação para representar os dois estágios, ou seja, regime permanente e transitório eletromagnético. Observa-se o gráfico 7.13, no instante que se inicia a simulação, instante zero até o instante que acontece a falta trifásica no sistema, 0.25 segundos, o gráfico vai para seu regime permanente.

Após, a falta trifásica acontece o transitório, a representação que se observa é na maior parte o transitório eletromagnético, logo depois, o gráfico caminha para se estabilizar. Quando este está no regime pós transitório, a potência complexa instantânea, fica circulando na região inferior do gráfico. Observa-se o fenômeno pela região mais escura no gráfico, região de maior contorno. A potência complexa instantânea mostra a cada instante no plano complexo a potência ativa e reativa e o balanceamento de energia durante a falta. Como o sistema é desequilibrado a potência complexa não se estabiliza em um ponto.

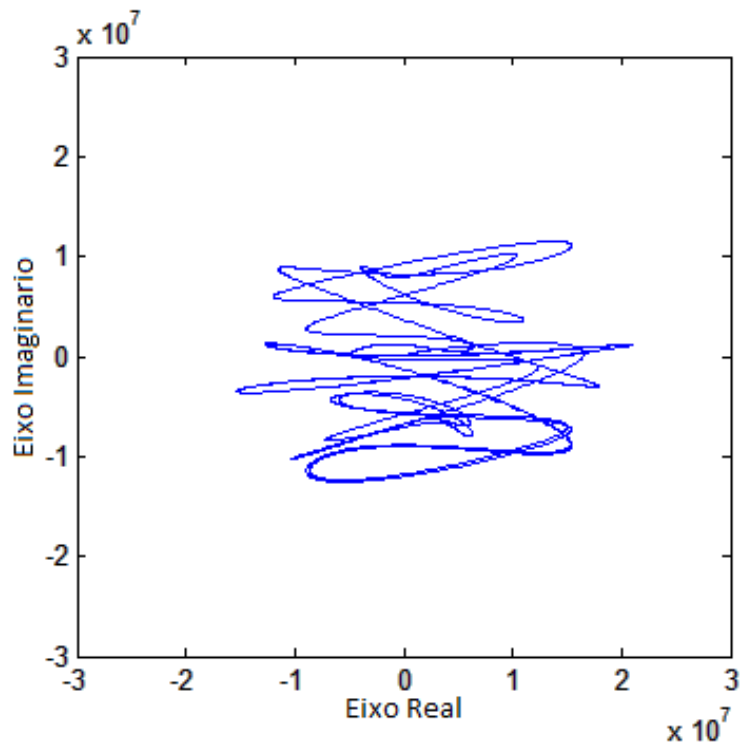


Figura 23 – Potencia Complexa Instantânea sistema desequilibrado

7.2 – Simulações da abertura e fechamento do sistema elétrico em linhas de transmissão

Como o intuito do trabalho é analisar o transitório eletromagnético, utilizamos o bloco “*Three-Phase Breaker*” Disjuntor Trifásico do Simulink, para obter tal efeito.

O bloco funciona como o próprio nome sugere um disjuntor trifásico, com apenas algumas distinções de um disjuntor propriamente dito. Nesta aplicação ele não fará a função de proteção, e sim, de ligar e desligar o sistema elétrico no tempo pré-programado.

O usuário tem a opção de fazer a configuração do bloco com a escolha de configurar quais fases será ligadas, com quais resistências, capacitâncias, qual será o tempo em que o bloco ira atuar, e se o circuito já começa ligado ou desligado. Como mostrada na figura 7.14.

Nas simulações obtidas o bloco foi pré-programado, para que realize a função de iniciar o sistema elétrico normalmente, em regime permanente, bloco fechado. Após, alguns milissegundos, no instante de 0,066 segundos, este abre, gerando assim, um transitório na rede, como podemos perceber na análise dos gráficos. O bloco, no instante 0,166 segundos, fecha, causando um novo transitório.

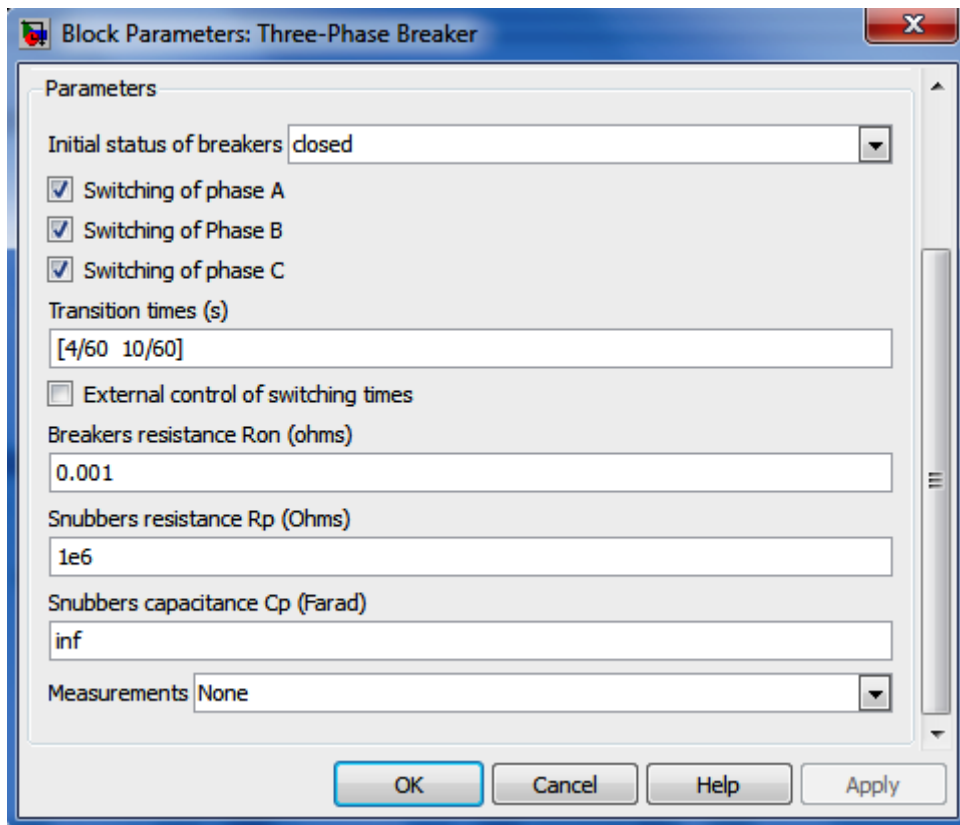


Figura 24 - Configurações do bloco do Simulink responsável por causar o transitório.

Comparando o fato analisado na simulação com a realidade do sistema elétrico, poderíamos interpretar ambos os casos como ocorrências do meio ou entrada de cargas no sistema.

Nesta simulação, o bloco foi conectado em serie com a fonte de tensão. Logo no início do sistema elétrico impedindo ou transmitindo o sinal elétrico.

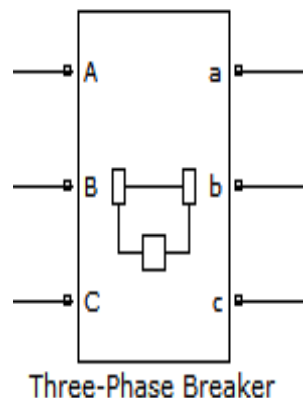


Figura 25 - Bloco do Simulink responsável pelo transitório

7.2.1 – Sistema trifásico equilibrado

7.2.1.1 – Vetor Espacial Instantâneo tensão com a fonte de tensão equilibrada

Como realizado anteriormente com as simulações de faltas trifásicas, nas simulações de abertura e fechamento do sistema elétrico, também foram divididos as análises em estágios de simulações. Esses estágios ficaram sendo: O primeiro estágio antes da abertura do sistema, representando o regime permanente. Segundo o estágio quando é feita a abertura do sistema, ocasionando assim o primeiro transitório eletromagnético. Terceiro estágio com o fechamento do sistema elétrico, ocasionando novamente o segundo transitório eletromagnético.

No primeiro estágio representado pela figura 7.16, a simulação do vetor espacial instantâneo tensão pelo o bloco “*Three-Phase Breaker*” encontra-se fechado dando início a simulação normalmente.

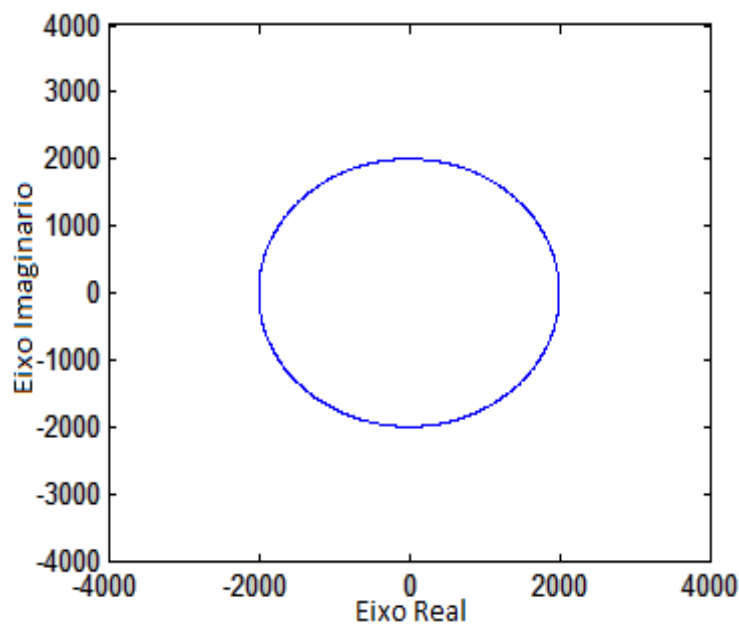


Figura 26 – Vetor espacial instantâneo tensão primeiro estágio

Observa-se que a tensão está em regime permanente e que suas fases possui simetria, por estar conectados a uma fonte de tensão equilibrada. O vetor espacial instantâneo tensão esta representado do instante inicial de simulação até próximo ao instante 0,0666 segundos.

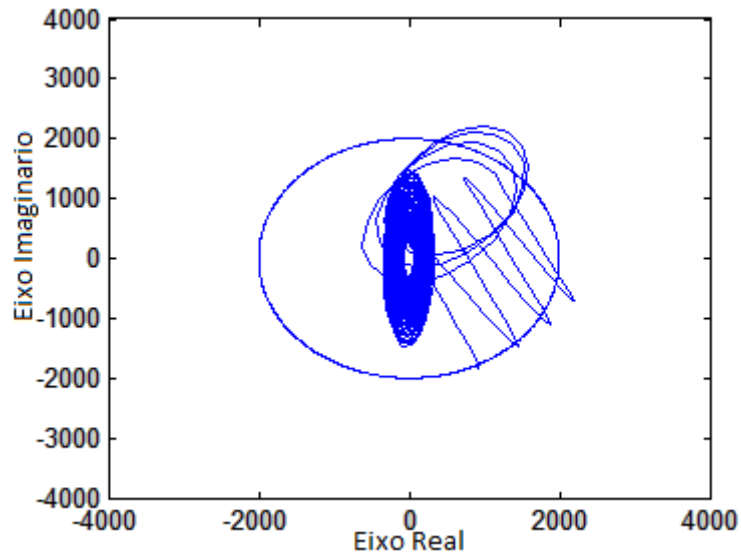


Figura 27 – Vetor espacial instantâneo tensão segundo estágio

A figura 7.17 faz referência ao segundo estágio de simulação, quando o bloco é aberto. O bloco sendo aberto não há circulação de corrente, tensão, ou potencia pelo circuito. Isso é o que observa – se no vetor espacial instantâneo tensão da figura 7.17 a tensão saiu do regime permanente e esta caminhando para zero. Esta irá permanecer em zero até o sistema ser religado.

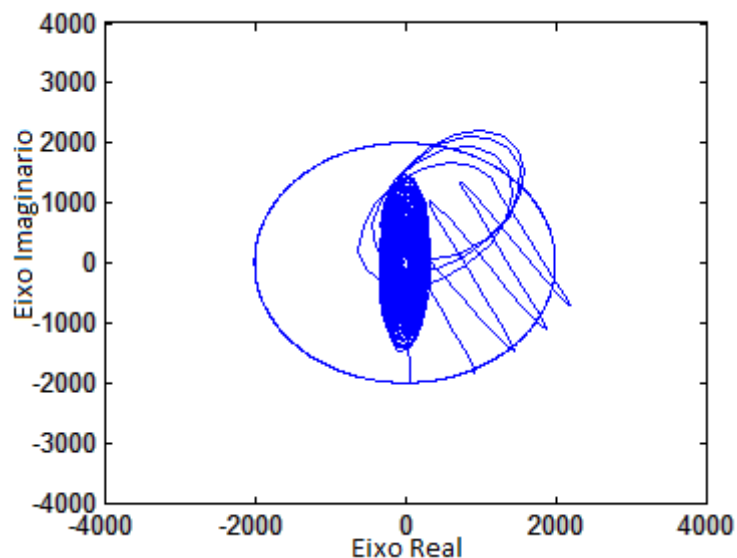


Figura 28 - Vetor espacial instantâneo tensão terceiro estágio

O sistema sendo religado, terceiro estágio de simulação é representado pela figura 7.18. Quando a tensão sai do valor zero, regime permanente, e

sobre a variação de um segundo transitório, ate novamente se estabilizar.

7.2.1.2 – Vetor espacial instantâneo corrente com a fonte de tensão equilibrada

Na representação do vetor espacial instantâneo corrente, a análise é feita da mesma maneira, como na análise do vetor espacial instantâneo tensão. Compreendido pelos três estágios.

No primeiro estágio representado pela figura 7.19, compreende os primeiros instantes de simulação, quando o bloco encontra-se fechado dando inicio normalmente. Observa-se que o vetor espacial instantâneo corrente esta em regime permanente e que suas fases possui simetria, por ser estar conectados a uma fonte de tensão equilibrada.

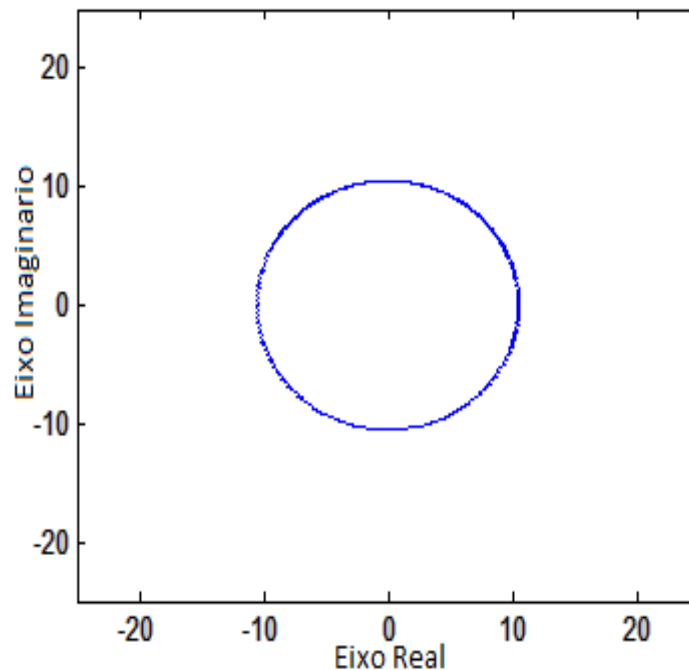


Figura 29 - Vetor espacial instantâneo corrente primeiro estágio

A figura 7.20 ilustra o segundo estágio de simulação, quando mostra o vetor espacial instantâneo corrente, sofrendo a ação da abertura de sistema, pelo bloco “*Three-Phase Breaker*”. Este quando abre não permite a passagem de corrente pelo sistema, é o que se observa-se na análise do gráfico, a corrente esta indo para zero e permanecendo neste valor ate que a simulação passe para o estágio seguinte.

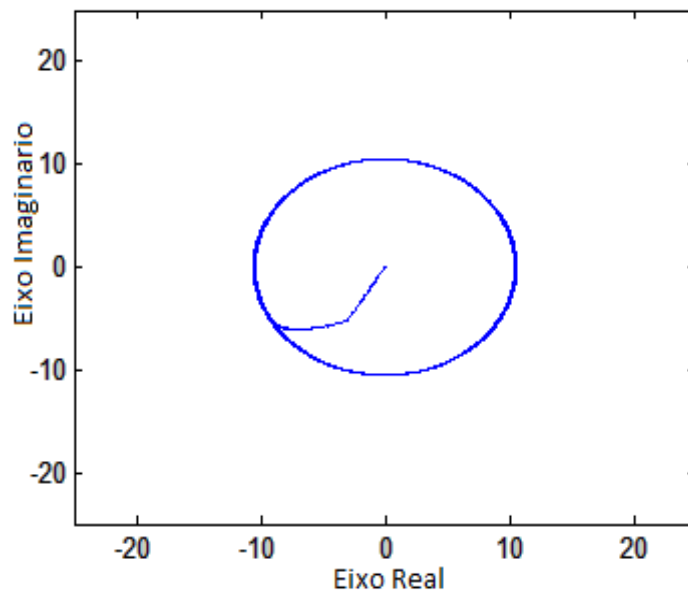


Figura 30 - Vetor espacial instantâneo corrente segundo estágio

O gráfico da figura 7.21 representa o terceiro estágio da simulação, compreendido do instante 0.166 até 1 segundo, quando em 1 segundo encerra a simulação. No instante que o bloco é novamente fechado, retorna a corrente no sistema, ocasionando assim, um transitório eletromagnético. Observa-se, quando a corrente sai do valor zero, sofre por alguns instantes a ação do transitório eletromagnético, retornando ao seu regime permanente, região mais escura no gráfico de maior contorno. Observa-se o efeito mais interno do transitório com módulo maior que 20 A.

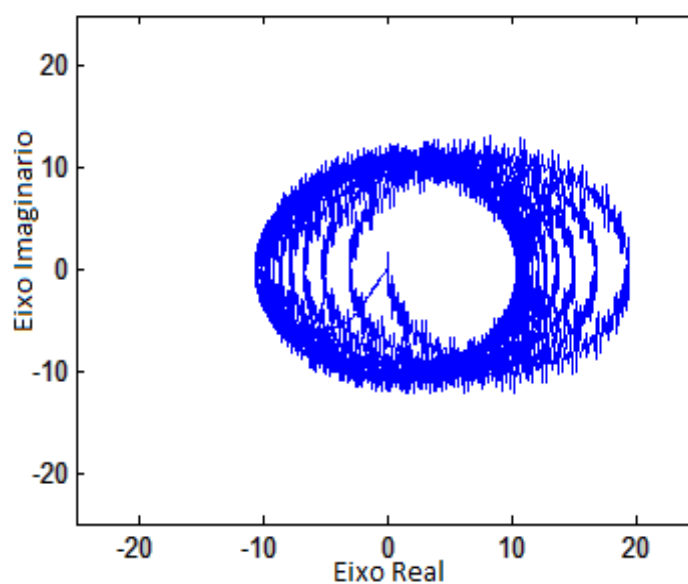


Figura 31 - Vetor espacial instantâneo corrente terceiro estágio

7.2.1.3 – Potência Complexa Instantânea no sistema equilibrado

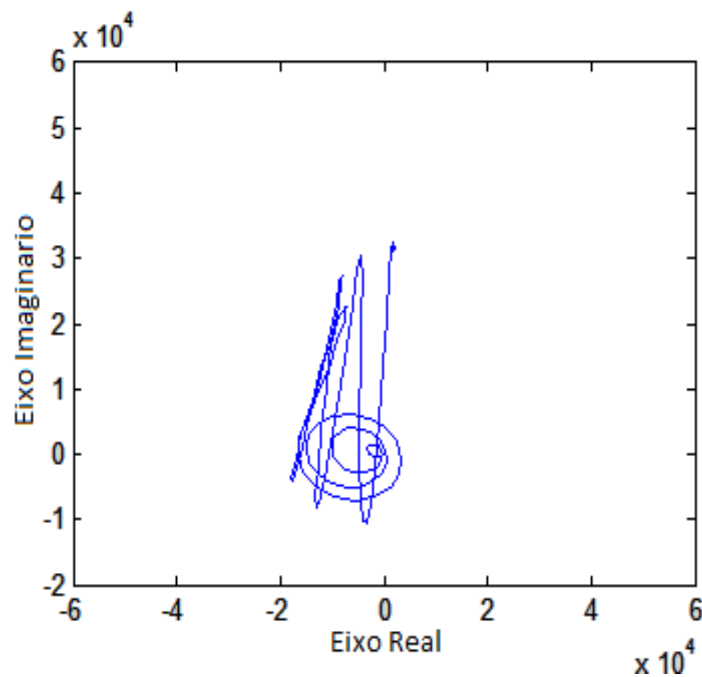


Figura 32 - Potencia Complexa Instantânea segundo estágio

Na análise da potência complexa instantânea com o auxílio do bloco “*Three-Phase Breaker*” e o sistema sendo equilibrado. Obteve-se o gráfico da figura 7.22 representando o segundo e o primeiro estágio de simulação, já que, o primeiro estágio, como a potência está em seu regime permanente quase não é perceptível nesse tipo de análise.

Observa-se que todo o desenho formado pelo gráfico da figura 7.22 está representando o primeiro transitório eletromagnético. O transitório se encerra quando o gráfico forma a espiral central e caminha para o valor zero, eixo real e eixo imaginário zero.

Partindo do valor zero inicia a terceira etapa de simulação quando no instante 0.166 o bloco fecha as três fases e se inicia o segundo transitório eletromagnético representado pela figura 7.23.

Nesta parte, o transitório eletromagnético também desenha uma espiral e em sua região central que representa as suas oscilações.

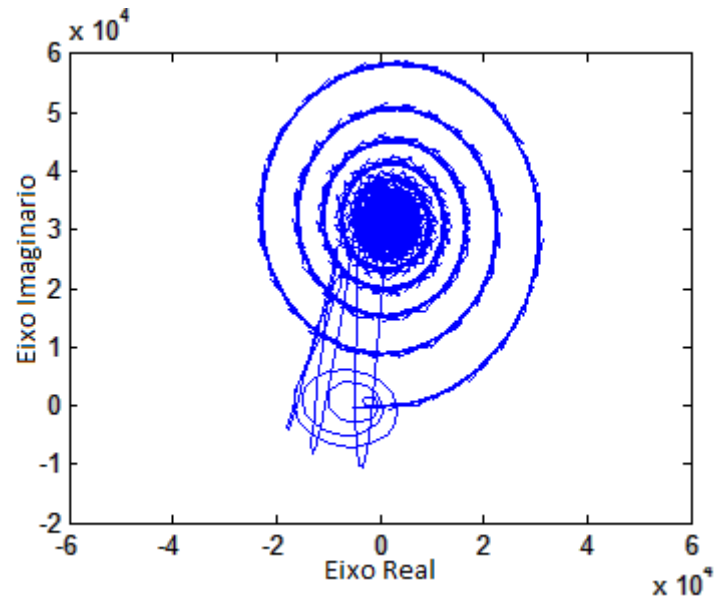


Figura 33 - Potência complexa instantânea terceiro estágio

O transitório de ligação das cargas é mais severo, a cada instante é possível analisar a potência ativa (eixo real) e potência reativa (eixo imaginário).

7.2.2 – Sistema Trifásico desequilibrado

7.2.2.1 – Vetor Espacial Instantâneo tensão com a fonte de tensão desequilibrada

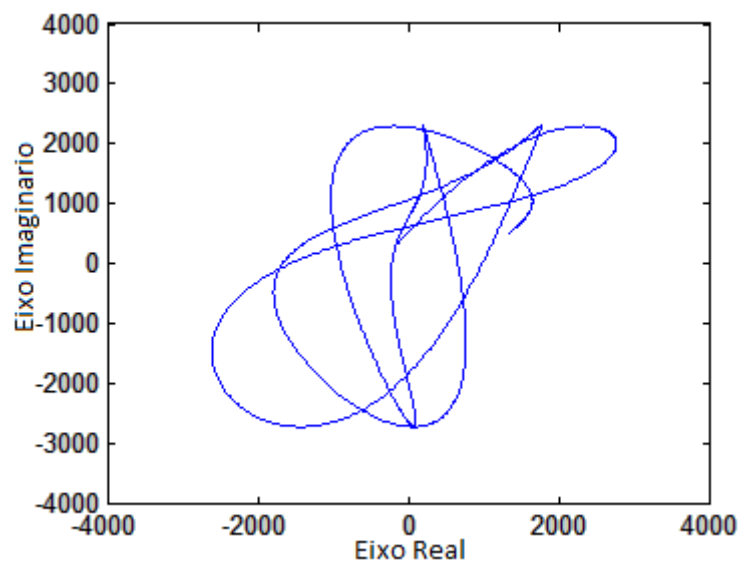


Figura 34 – Vetor espacial instantâneo tensão primeiro estágio

A simulação sendo realizada com a fonte de tensão desequilibrada não há simetria entre as fases, com isso, o gráfico não é uma circunferência, indicando assimetria entre as fases.

A figura 7.24 ilustra o vetor espacial instantâneo tensão no primeiro estágio de simulação. Quando o sistema ainda esta em seu regime permanente, sem sofrer a abertura das fases pelo bloco, compreendido dos instantes 0 ate 0.166.

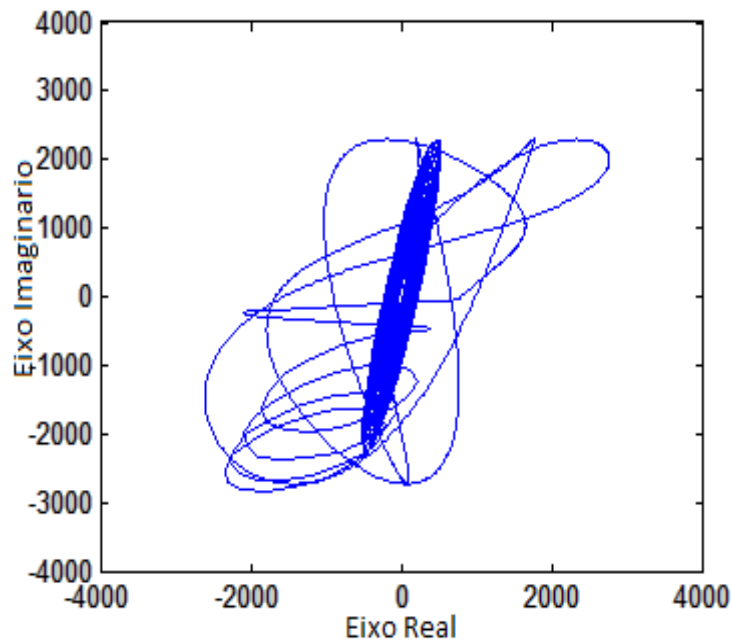


Figura 35 – Vetor espacial instantâneo tensão segundo estágio

O segundo estágio de simulação é representado pela figura 7.25, vetor espacial instantâneo tensão, sofrendo a ação do primeiro transitório eletromagnético. No segundo estágio o bloco é aberto, ficando assim, sem tensão nas três fases do sistema. Observa-se essa ocorrência no gráfico, quando este sai do seu regime permanente, fazendo um espiral da região de fora pra dentro, ate chegar ao valor zero de tensão.

O terceiro estágio de simulação, compreendido do instante 0.166 segundos até 1 segundo, quando o bloco fecha as três fases novamente, fazendo com que o sistema elétrico fique ativo. Com isso, o sistema passa por um segundo transitório eletromagnético, como se observa no gráfico da figura 7.26.

O vetor espacial instantâneo tensão sai do valor zero, passa por alguns instante de transitório eletromagnético e caminha para o seu período permanente novamente.

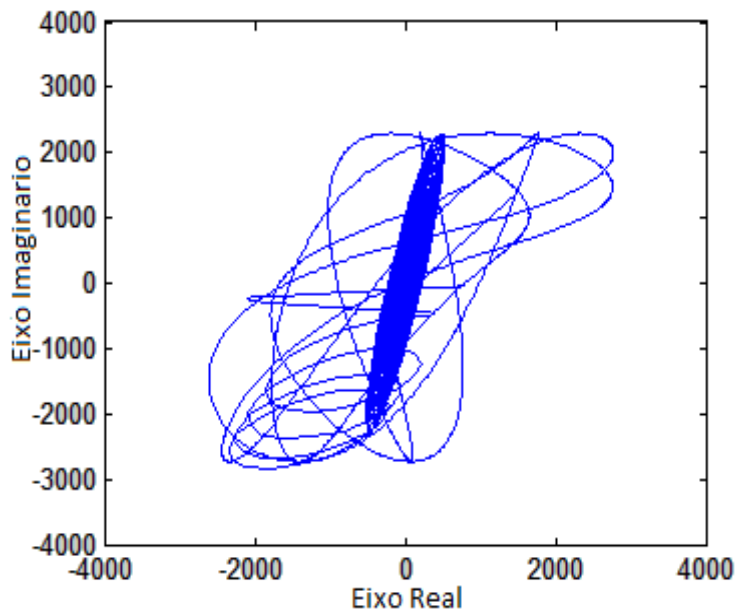


Figura 36 - Vetor espacial instantâneo tensão terceiro estágio

7.2.2.2 – Vetor Espacial Instantâneo corrente com a fonte de tensão desequilibrada

A análise feita no vetor espacial instantâneo tensão é a mesma feita no vetor espacial instantâneo corrente, ou seja, por estágios de simulação.

O primeiro estágio ilustrado na figura 7.27, quando o sistema está em seu regime permanente, sem a abertura das fases. Como a fonte de tensão usada não está balanceada não há simetria entre as fases, com isso, o gráfico não é uma circunferência.

O gráfico representa o primeiro estágio de simulação do instante inicial até o instante 0,066 segundos, quando o bloco interrompe a passagem de corrente pelas fases. Esta permanece estática no valor zero do eixo real e valor zero no eixo imaginário até que comece o terceiro estágio de simulação, quando o bloco novamente fecha as fases, transmitindo sinal. O terceiro estágio de simulação é representado pela figura 7.28.

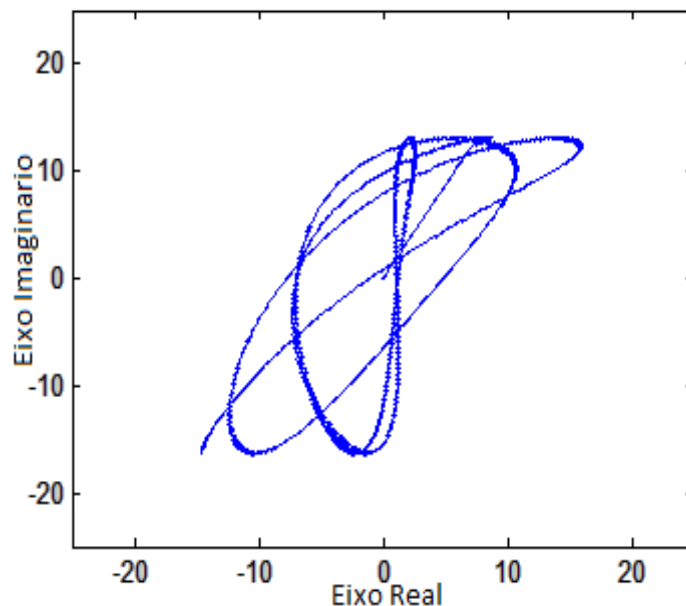


Figura 37 – Vetor espacial instantâneo corrente primeiro e segundo estágio

No terceiro estágio de simulação, compreendido do instante 0.166 segundos até 1 segundo, quando o bloco fecha as três fases novamente, fazendo com que o sistema elétrico fique ativo. Com isso, o sistema passa por um segundo transitório eletromagnético, como se observa no gráfico da figura 7.28. O vetor espacial instantâneo corrente sai do valor zero, passa por alguns instantes de transitório eletromagnético, atingindo assim, o seu regime permanente, região mais escura no gráfico de maior contorno.

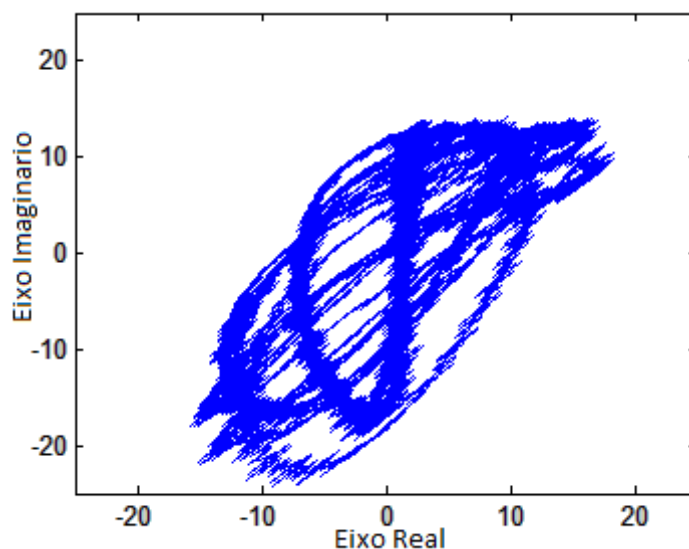


Figura 38 - Vetor espacial instantâneo corrente terceiro estágio

7.2.2.3 – Potência Complexa Instantânea no sistema desequilibrado

A potência complexa instantânea para um sistema desequilibrado foi analisada em três estágios, como em alguns casos anteriores. O primeiro estágio representado pelo gráfico da figura 7.29 ilustrando o seu regime permanente.

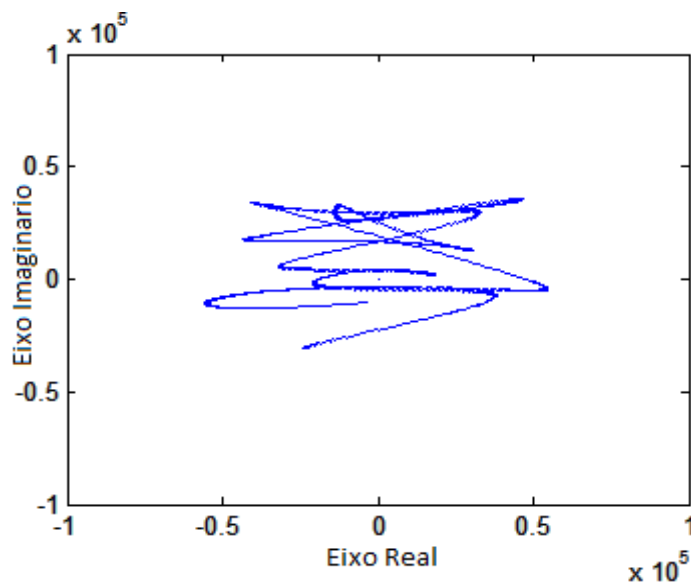


Figura 39 - Potência complexa instantânea primeiro estágio

No segundo estágio de simulação, representando o primeiro transitório eletromagnético, figura 7.30. Nesta ilustração os traços que se acrescenta da figura 7.29 representa o instante do transitório eletromagnético no sistema que tende a zero.

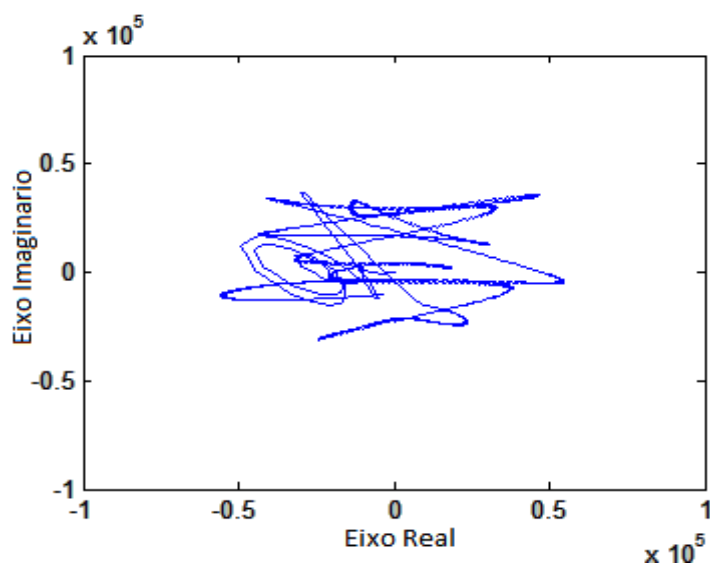


Figura 40 - Potência complexa instantânea segundo estágio

Quando o bloco “*Three-Phase Breaker*” fecha as fases colocando o sistema novamente em operação, ocasiona um segundo transitório eletromagnético no sistema elétrico, representado pela figura 7.31. Neste segundo transitório a potência complexa instantânea sofreu bruscas oscilações, como observa-se no gráfico.

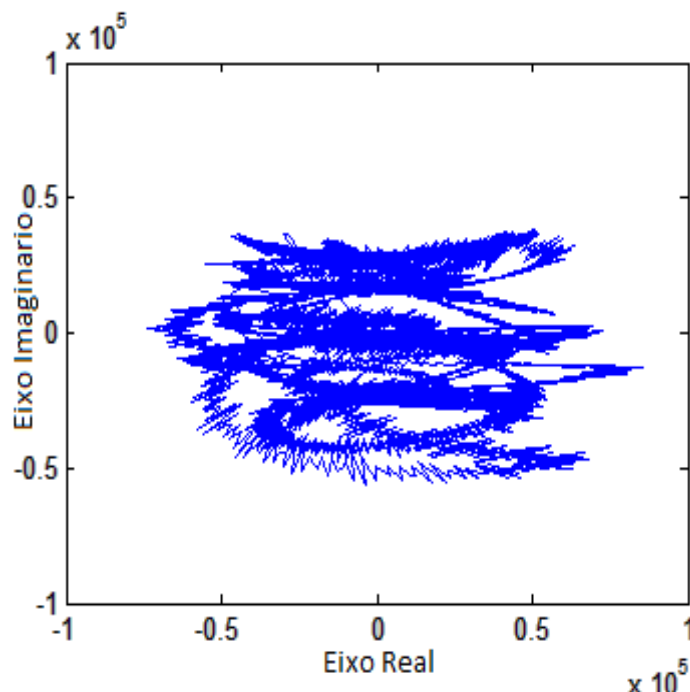


Figura 41- Potência Complexa Instantânea terceiro estágio

A simulação por variáveis de estado para uma linha transmissão com 100 modelos PI's distribuídos em cascata foi simulado através do Matlab. Foi simulado uma linha em vazio de 100 km com os parâmetros dados abaixo:

$V_0 = 20 \text{ KV}$ (Tensão de entrada na linha)

$R = 0,1 \text{ } \Omega/\text{km}$

$L = 1 \text{ mH/km}$

$C = 11,11 \text{ nF/km}$

$G = 0,556 \text{ } \mu\text{S/km}$

$d = 100 \text{ km}$ (Comprimento da linha)

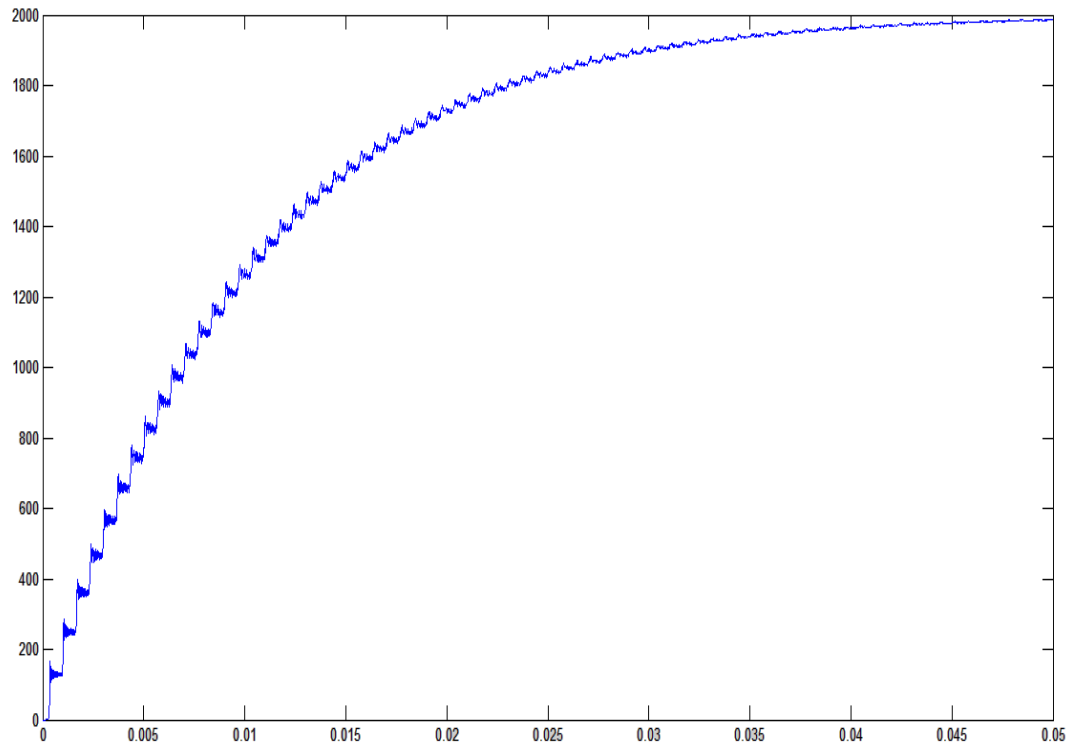


Figura 7.32 – Gráfico corrente em relação ao tempo na linha de transmissão

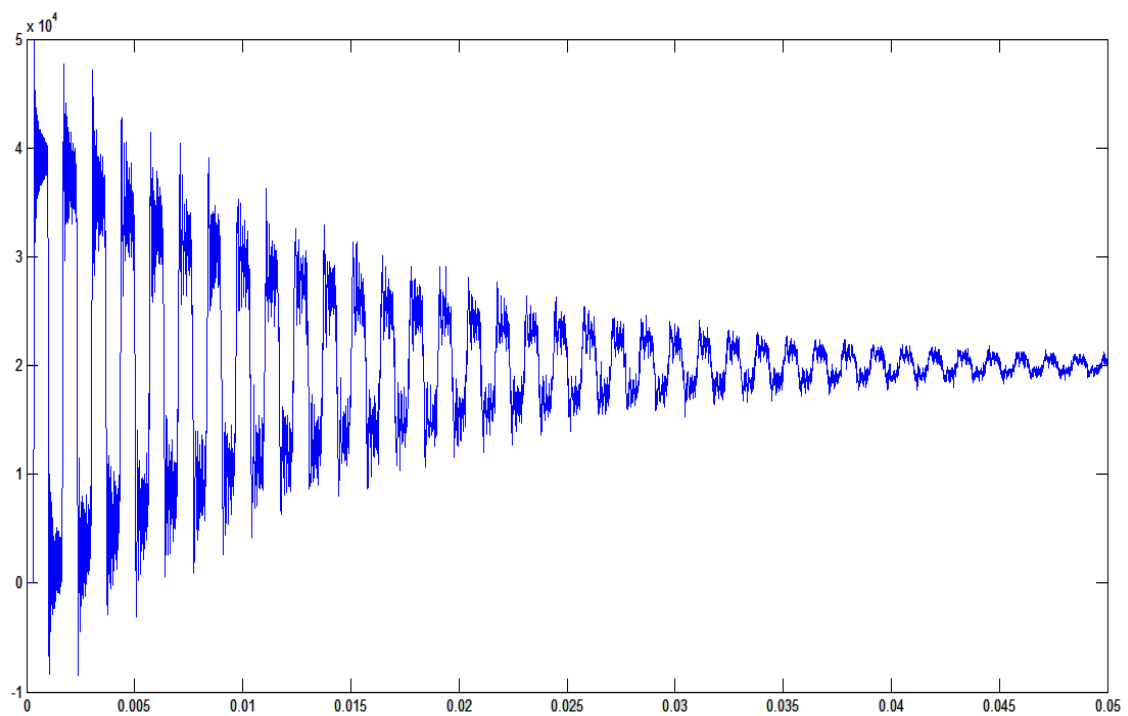


Figura 7.33 – Gráfico tensão em relação ao tempo na linha de transmissão

8 - CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi a aplicação da Teoria da Potência Complexa Instantânea para análise do transitório eletromagnético em linhas de transmissão no modelo Pi.

Pelos gráficos do vetor espacial instantâneo tensão, corrente e o gráfico da potência complexa instantânea é possível visualizar os picos que são extremos no período transitório, pois, são estes que causam os maiores prejuízos.

Foi possível analisar o transitório tanto para o sistema equilibrado, quanto desequilibrado. O sistema equilibrado apresentou simetria em relação a sua corrente e tensão. A potência depois do transitório atingiu o ponto de regime. Já para as condições desequilibradas, as tensões e correntes não são simétricas e os transitórios mais severos. A potência complexa não atingiu um ponto de regime, mas oscila balanceando as potências em desequilíbrio.

Através da potência complexa instantânea é possível observar o comportamento da potência ativa e reativa durante o transitório, tanto para sistemas equilibrados quanto desequilibrados.

Esta é uma nova teoria da potência complexa instantânea para ser aplicada em transitórios, diferentemente de outras simulações como o transitório obtido por variáveis de estado.

O balanço de potência, no entanto, nesta teoria é diferente da potência convencional.

O trabalho é uma sugestão para análise de transitórios em sistemas trifásicos com fontes balanceadas ou não.

O trabalho ilustrou o comportamento de uma linha de transmissão em situações adversas.