

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* FORMIGA
ENGENHARIA ELÉTRICA

Rudji Mayal Costa

**UTILIZAÇÃO DA TOOLBOX SIMSCAPE ELECTRICAL DO MATLAB
COMO FERRAMENTA DE ENSINO DE DISCIPLINAS DA ÁREA DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Formiga - MG

2023

RUDJI MAYAL COSTA

**UTILIZAÇÃO DA TOOLBOX SIMSCAPE ELECTRICAL DO MATLAB
COMO FERRAMENTA DE ENSINO DE DISCIPLINAS DA ÁREA DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Formiga* para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Patrick Santos de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura

Formiga - MG
2023

Costa, Rudji Mayal

C837u Utilização da ToolBox Simscape Electrical do MATLAB como ferramenta de ensino de disciplinas da área de sistemas elétricos de potência / Rudji Mayal Costa – Formiga : IFMG, 2023.
145p. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Patrick Santos de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus*
Formiga.

1. Simscape electrical. 2. Tutorial. 3. Sistemas elétricos. 4. Simulação. 5. Simulink. I. Oliveira, Patrick Santos de. II. Moura, Renan Souza. III. Título.

CDD 621.3

Rudji Mayal Costa

**UTILIZAÇÃO DA TOOLBOX SIMSCAPE ELECTRICAL DO MATLAB
COMO FERRAMENTA DE ENSINO DE DISCIPLINAS DA ÁREA DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Formiga* para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 01/12/2023

Nota: 92

BANCA EXAMINADORA

Patrick Santos de Oliveira

Prof. Dr. Patrick Santos de Oliveira (Orientador)

Renan Souza Moura

Prof. Dr. Renan Souza Moura (Coorientador)

Mariana Guimarães dos Santos

Prof.^a Ma. Mariana Guimarães dos Santos

Marcus Vinícius de Paiva

Prof. Me. Marcus Vinícius de Paiva

Gabriel Santiago Raimundo Rodrigues

Eng. Gabriel Santiago

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Joe e Ethel por sempre estarem presentes, mesmo que distantes, me apoiarem e continuamente me incentivarem a continuar sempre estudando. As minhas irmãs Mayra, Tabata e Erin e meu irmão Jimmy que mesmo estando longe sempre torceram pelas minhas conquistas.

A minha noiva Sarah por ter sido a pessoa que me motivou a me esforçar para conseguir uma vaga no IF, pois acreditava no meu potencial, sempre me apoiou e esteve ao meu lado em todos os momentos.

A todos os professores que sempre dedicaram seu tempo para nos passar não apenas conhecimento teórico mas também experiências de vida e dicas sobre o mercado de trabalho. Agradeço em especial meu orientador Dr. Patrick pelo incentivo e oportunidade de desenvolver este trabalho e pela dedicação do seu escasso tempo. E também ao meu coorientador Dr. Renan que sempre conseguiu nos manter motivados mesmo nas matérias difíceis pois como ele sempre disse "Vai dar certo e o importante é ser feliz!"

“O ontem é história, o amanhã é um mistério, mas o hoje, é uma dádiva. É por isso que é chamado de presente.”

Mestre Oogway

RESUMO

O avanço tecnológico tem possibilitado o uso de ferramentas cada vez mais sofisticadas para a visualização de conceitos físicos, facilitando assim, sua compreensão. Atualmente, os cursos de engenharia buscam adaptar seu conteúdo a estas novas ferramentas, com o objetivo de ampliar o interesse dos alunos, além de aprimorar o ensino de matérias que são consideradas complexas, como por exemplo, os sistemas elétricos de potência. O presente trabalho tem como finalidade apresentar a utilização de uma dessas ferramentas, o *Simscape Electrical*, uma *Toolbox* integrada ao *Simulink*, como um instrumento para facilitar o ensino das matérias associadas aos sistemas elétricos de potência. Este trabalho se configura na forma de um tutorial para guiar o leitor no processo de modelagem de sistemas de distribuição de energia, utilizando-se dos mais diversos blocos que compõem o *Simscape Electrical* do MATLAB. O desenvolvimento deste modelo, permite a realização de simulações para a verificação de comportamentos do sistema em diferentes condições de operação. Além da montagem do sistema, estão presentes cinco exemplos de simulações para demonstrar a aplicabilidade das principais ferramentas que compõem o *Simscape Electrical*. Desta forma, o trabalho tem o propósito de familiarizar o leitor com uma nova ferramenta passível de integração no ensino de disciplinas voltadas aos sistemas elétricos de potência, mediante a aplicação de técnicas de modelagem e simulação.

Palavras-chave: *Simulink*. *Simscape Electrical*. Tutorial. Sistemas Elétricos. Simulação.

ABSTRACT

Technological advancement has enabled the use of increasingly sophisticated tools for visualizing physical concepts, thereby facilitating their comprehension. Currently, engineering courses strive to adapt their content to these new tools with the aim of enhancing student interest and improving the teaching of subjects deemed complex, such as power systems. The present work aims to showcase the utilization of one such tool, Simscape Electrical, a toolbox integrated into Simulink, as an instrument to facilitate the teaching of topics associated with power systems. This work takes the form of a tutorial designed to guide the reader through the process of modeling energy distribution systems, employing various blocks comprising Simscape Electrical in MATLAB. The development of this model enables simulations to verify system behaviors under different operating conditions. In addition to system assembly, five simulation examples are provided to illustrate the applicability of key tools within Simscape Electrical. Thus, the work seeks to acquaint the reader with a new tool suitable for integration into the teaching of disciplines related to power systems through the application of modeling and simulation techniques.

Keywords: Simulink. Simscape Electrical. Tutorial. Power Systems. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama unifilar de um sistema elétrico de potência.	25
Figura 2 – Exemplo de curva de carga de consumidor residencial.	27
Figura 3 – Exemplo de um sistema típico de distribuição.	28
Figura 4 – Dimensões da Estrutura M1 em mm.	31
Figura 5 – Diagrama unifilar da subestação de Formiga - MG.	32
Figura 6 – Área de trabalho do <i>Simulink</i>	34
Figura 7 – A <i>Toolstrip</i> do editor <i>Simulink</i>	34
Figura 8 – <i>Library Browser</i> do <i>Simulink</i>	35
Figura 9 – Exemplo de blocos do <i>Simulink</i> e do <i>Specialized Power Systems</i>	36
Figura 10 – Modelo de relé instantâneo sem subsistema.	36
Figura 11 – Modelo de relé instantâneo com subsistema.	36
Figura 12 – Fonte trifásica do <i>Simscape</i>	37
Figura 13 – Parâmetros da fonte trifásica.	38
Figura 14 – Linha de transmissão modelo PI.	39
Figura 15 – Parâmetros da linha de transmissão modelo PI.	39
Figura 16 – configuração do modelo PI.	40
Figura 17 – Bloco do transformador trifásico de dois enrolamentos.	40
Figura 18 – Tela de parâmetros do transformador trifásico.	41
Figura 19 – Bloco de disjuntor trifásico.	41
Figura 20 – Parâmetros para o disjuntor trifásico.	42
Figura 21 – Blocos de carga trifásica.	43
Figura 22 – Parâmetros do bloco de carga RLC trifásica em série.	43
Figura 23 – Bloco tipo máscara de carga dinâmica.	44
Figura 24 – Parte interna do bloco tipo máscara de carga dinâmica.	44
Figura 25 – Bloco de medição de tensão e corrente.	45
Figura 26 – Parâmetros para medição de tensão e corrente.	45
Figura 27 – Bloco medidor de potência.	46
Figura 28 – Bloco gerador de falta.	46
Figura 29 – Parâmetros do bloco gerador de falta.	47
Figura 30 – Bloco <i>load flow bus</i>	47
Figura 31 – Parâmetros do bloco <i>load flow bus</i>	48
Figura 32 – Tipos de bloco do <i>load flow bus</i>	48
Figura 33 – Bloco <i>Powergui</i>	49

Figura 34 – <i>Powergui Load Flow Tool</i>	50
Figura 35 – <i>Powergui Power Line Parameters</i>	50
Figura 36 – Bloco <i>From</i>	51
Figura 37 – Parâmetros do bloco <i>From</i>	51
Figura 38 – Bloco <i>Signal Builder</i>	52
Figura 39 – Parâmetros <i>Signal Builder</i>	52
Figura 40 – Bloco <i>Scope</i>	53
Figura 41 – Tela do <i>Scope</i>	53
Figura 42 – Bloco <i>Display</i>	54
Figura 43 – Parâmetros do bloco <i>Display</i>	54
Figura 44 – Bloco de função MATLAB	55
Figura 45 – Editor do bloco de função MATLAB	55
Figura 46 – Blocos Mux e Demux	56
Figura 47 – Parâmetros <i>Mux</i> e <i>Demux</i>	56
Figura 48 – Blocos dos relés 50 e 51.	57
Figura 49 – Parâmetros do relé 51.	57
Figura 50 – Blocos de geração fotovoltaica.	58
Figura 51 – Parâmetros do bloco <i>Solar Array (PQ Model)</i>	58
Figura 52 – Interior da máscara do bloco <i>Solar Array (EMT Model)</i>	59
Figura 53 – Parâmetros do bloco <i>Solar Array (EMT Model)</i>	59
Figura 54 – Rede de distribuição da cidade de Formiga com carga estática	60
Figura 55 – Rede de distribuição da cidade de Formiga com carga variável	61
Figura 56 – <i>Scope</i> para tomada das grandezas com carga estática.	61
Figura 57 – <i>Scope</i> para tomada das grandezas com carga variável.	62
Figura 58 – Subsistema contendo relés 50/51.	63
Figura 59 – FMA05 e FMA07 com chave faca normalmente aberta.	63
Figura 60 – Bloco GD tipo PQ no alimentador FMA 03.	64
Figura 61 – Bloco GD tipo EMT no alimentador FMA 03.	64
Figura 62 – Blocos <i>Load flow bus</i> inseridos no sistema.	65
Figura 63 – Blocos de falta inserido no alimentador FMA 07.	65
Figura 64 – Curvas de tensão, corrente e potências com carga estática.	66
Figura 65 – Resultados obtidos no alimentador FMA03	67
Figura 66 – Resultados obtidos no alimentador FMA04	68
Figura 67 – Resultados obtidos no alimentador FMA05	68

Figura 68 – Resultados obtidos no alimentador FMA06	69
Figura 69 – Resultados obtidos no alimentador FMA07	69
Figura 70 – Resultados obtidos na subestação.	70
Figura 71 – Relés em funcionamento normal.	70
Figura 72 – Sistema sem acionamento de relés.	71
Figura 73 – Curva IEC normal inversa.	71
Figura 74 – Tempo de operação do relé 51 em sobrecorrente.	72
Figura 75 – Relé 51 comutando por sobrecorrente.	72
Figura 76 – Fornecimento interrompido por sobrecorrente.	73
Figura 77 – Acionamento dos relés 50 e 51 devido curto-circuito.	73
Figura 78 – Fornecimento interrompido por curto-circuito.	74
Figura 79 – Efeito da inserção de uma GD no alimentador.	74
Figura 80 – Efeito da GD visto pela SE de Formiga.	75
Figura 81 – GD injetando harmônicos na rede.	75
Figura 82 – harmônicos gerados pela GD na SE de Formiga.	76
Figura 83 – Resultado obtido pelo <i>FFT Analysis</i> utilizando o bloco tipo PQ.	76
Figura 84 – Resultado obtido pelo <i>FFT Analysis</i> utilizando o bloco tipo EMT.	77
Figura 85 – Blocos <i>Load Flow Bus</i> mostrando queda de tensão entre os barramentos.	77
Figura 86 – Tela do <i>Load Flow Analyzer</i> com valores calculados.	78
Figura 87 – Ângulos de tensão alterados mostrando a nova direção de fluxo de potência.	78
Figura 88 – Potência e fator de potência se tornando negativos devido a inversão de fluxo.	79
Figura 89 – Efeitos da inversão de fluxo na subestação.	80
Figura 90 – Curto entre as fases A e B visto pelo barramento 5 da FMA 07.	80
Figura 91 – Curvas de tensão e corrente isoladas visto pelo barramento 5 da FMA 07.	81
Figura 92 – Curto entre as fases A e B visto pela subestação.	82
Figura 93 – Curto entre as fases A e B visto pelo alimentador FMA 03.	82
Figura 94 – Curto entre fase C e terra visto pelo alimentador FMA 07.	83
Figura 95 – Curto entre fase C e terra visto pela subestação.	83
Figura 96 – Curto entre fase C e terra visto pelo alimentador FMA 03.	84
Figura 97 – Aba inicial <i>Home</i> do MATLAB.	91
Figura 98 – Tela inicial do ambiente de trabalho do <i>Simulink</i>	91
Figura 99 – Janela do editor <i>Simulink</i>	92
Figura 100–Localização do botão <i>Save</i>	92
Figura 101–Localização do botão <i>Library Browser</i>	92

Figura 102–Janela do <i>Library Browser</i>	93
Figura 103–Localização do <i>Specialized Power Systems</i>	93
Figura 104–Adicionando blocos por arrasta e solta.	94
Figura 105–Adicionando blocos por meio do nome.	94
Figura 106–Blocos base para a montagem do sistema.	95
Figura 107–Criando conexão entre os blocos do sistema.	96
Figura 108–Falha na conexão entre blocos.	96
Figura 109–Conexão entre blocos por proximidade.	96
Figura 110–Criando derivação entre conexões.	97
Figura 111–Redimensionamento do bloco de medição.	97
Figura 112–Troca de cor do bloco.	98
Figura 113–Bloco de medição modificado.	98
Figura 114–Bloco de carga dinâmica.	99
Figura 115–Criação de um subsistema.	99
Figura 116–Caminho atual subsistema.	100
Figura 117–Alteração de parâmetros do bloco de carga.	100
Figura 118–Voltar para o nível do projeto principal.	101
Figura 119–Adicionando porta de entrada de sinal.	101
Figura 120–Menu para criação de um bloco tipo máscara.	101
Figura 121–Configurações da aba <i>Icon & Ports</i>	102
Figura 122–Configurações da aba <i>Parameters & Dialog</i>	103
Figura 123–Adicionando valor padrão para um parâmetro.	104
Figura 124–Configuração do <i>popup</i>	104
Figura 125–Adicionando itens no <i>popup</i>	104
Figura 126–Alterando a posição do <i>popup</i>	105
Figura 127–Configurações da aba <i>Initialization</i>	105
Figura 128–Criando a documentação do bloco.	106
Figura 129–Bloco montado com tela de parâmetros.	106
Figura 130–botão para entrar no bloco tipo máscara.	107
Figura 131–Blocos no interior da máscara.	107
Figura 132–Configuração do bloco <i>Constant</i>	108
Figura 133–Blocos <i>Simulink</i> para execução de cálculos.	108
Figura 134–Montagem base dos multiplicadores.	109
Figura 135–Conexão com os blocos ao quadrado.	109

Figura 136–Alterção dos sinais no bloco <i>Subtract</i>	110
Figura 137–Conexão com a variável do fator de potência.	110
Figura 138–Sistema de carga completo.	111
Figura 139–Criando um subsistema para organização.	112
Figura 140–Alterando valores por variáveis.	112
Figura 141–Adicionando um <i>Terminator</i> a saída do bloco.	113
Figura 142–Bloco pronto para ser utilizado.	113
Figura 143–Janela de <i>Signal Builder</i>	114
Figura 144–Alterando o tempo total do <i>Signal Builder</i>	114
Figura 145–Criando uma nova curva com 24 pontos.	114
Figura 146–Deletando curva que não será utilizada.	115
Figura 147–Alterando o nome da curva.	115
Figura 148–Curva de carga residencial.	116
Figura 149–Salvando a curva de carga.	116
Figura 150–Blocos para montagem do sistema.	117
Figura 151–Construção do sistema até os alimentadores.	117
Figura 152–Localização da ferramenta <i>Power Line Parameters</i>	118
Figura 153–Tela principal do <i>Power Line Parameters</i>	119
Figura 154–Alterando de unidade imperial para métrico.	119
Figura 155–Inserindo informações dos condutores.	120
Figura 156–Removendo os para-raios.	121
Figura 157–Variáveis para configurar a geometria da torre.	121
Figura 158–Calcular os valores de RLC dos condutores.	122
Figura 159–Enviando valores calculados para o bloco modelo PI.	122
Figura 160–Inserindo as cargas estáticas.	123
Figura 161–Disposição das curvas de carga no alimentador FMA 06.	124
Figura 162–Estrutura do subsistema de calculo de fator de potência.	125
Figura 163–Tela de edição de código do bloco de função MATLAB.	126
Figura 164–Código do bloco de função MATLAB alterado.	126
Figura 165–Cálculo de fator de potência com bloco de função MATLAB.	127
Figura 166–Subsistema para cálculo de fator de potência.	127
Figura 167–Conexão dos sinais de tensão e corrente no <i>scope</i>	127
Figura 168–Conexão do medidor de potências.	128
Figura 169– <i>Scope</i> finalizado.	128

Figura 170–Configurando a disposição dos gráficos.	129
Figura 171–Ativando as legendas dos gráficos.	129
Figura 172–Alterando o tipo de simulação.	130
Figura 173–Alterando a duração e executando a simulação.	130
Figura 174–Site da <i>MathWorks</i>	130
Figura 175–Criando uma conta na <i>MathWorks</i>	131
Figura 176–Tela da comunidade da <i>MathWorks</i>	131
Figura 177–Página do <i>File Exchange</i>	132
Figura 178–Busca no <i>File Exchange</i> pelo relé 50.	132
Figura 179–Informações do relé 50.	133
Figura 180–Criando subsistema do disjuntor.	134
Figura 181–Copiando relé 50 para subsistema do disjuntor.	134
Figura 182–Subsistema do disjuntor com relés 50 e 51.	135
Figura 183–Biblioteca com os blocos de geração fotovoltaica.	136
Figura 184–Erro de bloco desconectado da biblioteca.	136
Figura 185–Quebrando a conexão entre o bloco e a biblioteca.	137
Figura 186–Parâmetros utilizados no bloco de onda senoidal.	137
Figura 187–Bloco gerador fotovoltaico tipo PQ pronto.	138
Figura 188–Bloco gerador fotovoltaico tipo EMT pronto.	138
Figura 189–Conexão dos blocos <i>Load Flow Bus</i> nos barramentos.	139
Figura 190–Parâmetros da ferramenta <i>Load Flow Analyzer</i>	139
Figura 191–Valores calculados pela ferramenta <i>Load Flow Analyzer</i>	140
Figura 192–Criando registro do sinal para análise.	140
Figura 193–Localização do <i>Data Inspector</i>	141
Figura 194–Janela principal do <i>Data Inspector</i>	141
Figura 195–Seleção entre as simulações que serão comparadas.	142
Figura 196–Resultado entre as simulações comparadas.	142
Figura 197–Conexão de sinal em <i>scope</i> para utilização do <i>FFT Analysis</i>	143
Figura 198–Configuração do <i>scope</i> para aquisição de dados.	143
Figura 199–Criando uma variável com os valores do sinal conectado ao <i>scope</i>	144
Figura 200–Localização da ferramenta <i>FFT Analysis</i>	144
Figura 201–Tela da ferramenta <i>FFT Analysis</i>	145
Figura 202–Ferramenta <i>FFT Analysis</i> com resultados obtidos.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da fonte trifásica.	29
Tabela 2 – Condutores utilizados nos alimentadores da subestação.	29
Tabela 3 – Principais parâmetros dos condutores da subestação.	30
Tabela 4 – Comprimento e área de distribuição dos alimentadores.	30
Tabela 5 – Parâmetros dos transformadores da SE Formiga.	31
Tabela 6 – Valores obtidos nos alimentadores e subestação.	66
Tabela 7 – Valores obtidos entre arcos e a linha de transmissão.	67
Tabela 8 – Valores de tensão nos barramentos do alimentador FMA 03.	78
Tabela 9 – Valores dos ângulos de tensão com e sem GD.	79
Tabela 10 – Nomenclatura das <i>Lables</i> nos medidores.	118
Tabela 11 – Valores para os condutores do alimentador FMA 03.	120
Tabela 12 – Valores para a geometria do poste com estrutura M1.	122
Tabela 13 – Valores de potências atribuídas as cargas por alimentador.	124
Tabela 14 – Valores de potência e fator de potência dos blocos.	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
GD	Geração Distribuída
AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
SE	Subestação
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
EMT	<i>Electromagnetic Transients</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos	22
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	22
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	22
1.3	Estrutura do trabalho	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1	Sistemas Elétricos de Potência	24
2.2	Equipamentos do Sistema Elétrico de Potência	25
2.2.1	<i>Chave de aterramento</i>	25
2.2.2	<i>Disjuntores e Relés</i>	26
2.2.3	<i>Transformadores de potência</i>	26
2.2.4	<i>Transformadores de corrente e de potencial</i>	26
2.3	Curvas de carga	26
2.4	A subestação de Formiga	27
2.4.1	<i>Diagrama unifilar da subestação de Formiga</i>	31
3	SIMULINK E SIMSCAPE ELECTRICAL	33
3.1	<i>Simulink</i>	33
3.2	<i>Simscape Electrical</i>	33
3.3	Editor <i>Simulink</i>	34
3.3.1	<i>Toolstrip</i>	34
3.3.2	<i>Library Browser</i>	34
3.4	Tipos de conexões dos blocos	35
3.5	Blocos tipo Subsistema e Máscara	36
3.6	Blocos do <i>Specialized Power Systems</i> e <i>Simulink</i>	37
3.6.1	<i>Fonte trifásica</i>	37

3.6.2	<i>Linhas de transmissão ou de distribuição</i>	38
3.6.3	<i>Transformador</i>	40
3.6.4	<i>Disjuntor ou chave</i>	41
3.6.5	<i>Carga</i>	42
3.6.6	<i>Medidor de tensão e corrente</i>	44
3.6.7	<i>Medidor de potência</i>	45
3.6.8	<i>Gerador de falta trifásica</i>	46
3.6.9	<i>Load flow bus</i>	47
3.6.10	<i>Powergui</i>	48
3.6.11	<i>From</i>	50
3.6.12	<i>Signal Builder</i>	51
3.6.13	<i>Scope</i>	53
3.6.14	<i>Display</i>	54
3.6.15	<i>Bloco de função do MATLAB</i>	55
3.6.16	<i>Bloco Mux e Demux</i>	56
3.6.17	<i>Relé 50/51</i>	57
3.6.18	<i>Gerador fotovoltaico</i>	58
4	METODOLOGIA	60
4.1	Construção do sistema de distribuição	60
4.1.1	<i>Rede de distribuição com carga estática</i>	60
4.1.2	<i>Rede de distribuição com carga variável</i>	60
4.2	Exemplo 01 - Sistema em funcionamento normal	61
4.3	Exemplo 02 - Relés de proteção 50/51	62
4.4	Exemplo 03 - Geração distribuída	64
4.5	Exemplo 04 - Fluxo de potência	64
4.6	Exemplo 05 - Falta no sistema	65
5	RESULTADOS	66

5.1	Exemplo 01 - Sistema em funcionamento normal	66
5.2	Exemplo 02 - Relés de proteção 50/51	70
5.3	Exemplo 03 - Geração distribuída	74
5.4	Exemplo 04 - Fluxo de potência	77
5.5	Exemplo 05 - Falhas no sistema	80
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	85
6.1	Trabalhos Futuros	86
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXO A – MONTAGEM DETALHADA DO SISTEMA	91
A.1	Iniciando um projeto <i>Simulink/Simscape</i>	91
A.2	Adicionando os blocos <i>Simscape</i> no projeto	92
A.3	Como criar conexões entre os blocos	95
A.4	Modificando o Medidor V-I Trifásico (<i>Three-Phase V-I Measurement</i>)	97
A.5	Carga variável: Montagem de blocos tipo subsistema e máscara	99
A.6	Criando as curvas de carga	113
A.7	Iniciando a montagem do sistema	116
A.8	Usando o <i>Power Line Parameters</i>	118
A.9	Inserindo as cargas e finalizando os sistemas	123
A.10	Criação do medidor de fator de potência	125
A.11	Configurando o scope	127
A.12	Configurando e rodando a simulação	129
A.13	Utilizando o <i>File Exchange</i> da <i>MathWorks</i>	130
A.14	Criação do subsistema dos relés 50/51	133
A.15	Configurando os geradores fotovoltaicos	135
A.16	Utilizando o <i>Load Flow Analyzer</i>	138
A.17	Utilizando o <i>Data Inspector</i> para comparações	140
A.18	Utilizando o <i>FFT Analysis</i>	142

1 INTRODUÇÃO

O mundo atual experimenta uma revolução tecnológica. Questões e debates encontram-se, direta ou indiretamente, conectados aos conhecimentos científicos e tecnológicos. Neste contexto, o conhecimento sobre tais tópicos se tornam de suma importância para um melhor entendimento do mundo a sua volta (MACÊDO; DICKMAN; ANDRADE, 2012). Estes avanços têm modificado a maneira como o conhecimento é disponibilizado e apresentado, implicando, assim, em um desafio para escolas e professores ao incorporar a tecnologia como uma forma de aumentar a eficácia do ensino aos seus alunos (ANDRADE; BUFFON; JUNIOR, 2018).

Uma tecnologia que apresenta crescimento contínuo e tem promovido a melhora do ensino, de forma digital em salas de aula, são as simulações de computador (WIDIYATMOKO, 2018). Uma área que tem explorado amplamente as simulações, são os Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Estas simulações podem facilmente calcular o regime permanente de SEPs, através de simples definições de parâmetros e demonstrar o comportamento dos equipamentos que compõem este sistema (FOLTIN; ERNEK; HNÁT, 2006).

A infraestrutura que compõe a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, também conhecida como Sistemas Elétricos de Potência, passa por um desenvolvimento tecnológico desde o início do século XX. Atualmente a energia elétrica se tornou uma necessidade básica (ANDRADE; CASTILLA; BONATTO, 2020), fundamental no desenvolvimento de atividades cotidianas e um fator determinante quando se fala sobre prosperidade, produtividade e força de uma nação.

A demanda por energia só aumenta conforme os anos passam, porém, a geração não tem sido capaz de acompanhar, gerando assim, falta de energia (KALBANDHE; BHASME, 2016). A interconexão das redes elétricas desempenhou um papel crucial na estabilização da infraestrutura e na otimização dos custos de fornecimento. Contudo, devido à expansão dessas redes para dimensões continentais, a análise tornou-se extraordinariamente complexa, já que não existe uma forma direta para executar experimentos (DELAVARI; KAMWA; BRUNELLE, 2018). Para isto o uso de simulação computacional é essencial para que se faça o estudo de fluxo de potência, plano de operação e estabilidade do sistema (ALLEN et al., 2001).

Softwares capazes de realizar tais simulações, normalmente são programas profissionais complexos que demoram um certo tempo para se aprender ou de difícil acesso e normalmente não são indicados para educação. No entanto, é importante ressaltar que o MATLAB é reconhecido pelos estudantes e amplamente empregado em ambientes acadêmicos de engenharia. (VOURNAS et al., 2004).

No final dos anos 90 a Universidade de Bolonha em parceria com a ULg (*Université de Liège*) iniciaram o desenvolvimento de um pacote educativo, feito em *Simulink*, para estudo de SEP, através da modelagem de vários componentes como, geradores, reguladores, motores, etc. (VOURNAS et al., 2004). Assim como essas universidades, outros pesquisadores e educadores também procuram por novas alternativas para modelagem destes sistemas (DELAVARI; KAMWA; BRUNELLE, 2018).

Desenvolvido pela *MathWorks* e *Hydro-Québec Research Institute* (IREQ) o *Simscape* é uma *toolbox* do MATLAB/*Simulink* que contém componentes como geradores, linhas de transmissão, transformadores, máquinas elétricas e eletrônica de potência, desenvolvidos para modelagem destes sistemas. Estes foram validados em experiências laboratoriais pela concessionária de energia canadense *Hydro-Québec* (DELAVARI; KAMWA; BRUNELLE, 2018).

O *Simscape* é uma ferramenta de modelagem de sistemas por meio de blocos, sendo possível a modelagem de sistemas elétricos, mecânicos, hidráulicos e térmicos. Cada bloco desta *toolbox* representa um componente do sistema, como por exemplo, resistores, motores, linhas de transmissão, etc. Entretanto nem todos os componentes fazem parte dessa *toolbox*, sendo assim o *Simscape* permite que seu usuário seja capaz de montar seu próprio componente utilizando outros blocos fundamentais. Tais blocos criados pelo usuário podem conter parâmetros de acordo com suas necessidades (MOKHTARI; MARTAJ, 2012).

Desta forma, este trabalho apresenta uma forma de utilização da *toolbox* do *Simscape*, em especial o sub-componente chamado *Specialized Power Systems*, como uma nova ferramenta para o ensino de SEP por meio de exemplos e tutoriais.

1.1 Justificativa

Existe um decréscimo da quantidade de engenheiros eletricitistas que se especializam na área de sistemas elétricos de potência. Essa condição é motivada, normalmente, pela dificuldade no entendimento de tais assuntos que requerem um alto conhecimento de matemática e física, e a manipulação de equações diferenciais complexas (FOLTIN; ERNEK; HNÁT, 2006).

Neste contexto, a simulação torna-se uma ferramenta para facilitar o aprendizado. Assim, é cada vez mais comum a utilização de ferramentas para simulação nas salas de aulas, seja para pesquisas ou simples atividades nas quais alunos e professores são capazes de prever, por meio de simulações, situações que possam vir a ocorrer na operação de sistemas reais, evitando possíveis incidentes ou acidentes com perdas materiais ou humanas (LODER; BENDER, 2007).

O MATLAB é uma ferramenta que, normalmente, já é utilizada por alunos e professores, o qual contém a linguagem de programação gráfica chamada *Simulink* onde encontrasse a *toolbox Simscape* que será a ferramenta utilizada neste trabalho. Como este *software* é uma *toolbox* do MATLAB, é fácil encontrar em faculdades, institutos e universidades de engenharia.

O presente trabalho tem como motivação a instrução de como o *Simscape* pode ser utilizado para melhorar a capacidade de entendimento sobre conceitos físicos, pertinentes as matérias de SEP, por meios de simulações. Assim como dito por Tejado (2016), apesar do *Simscape* ser um *software* extremamente hábil para simulações, ainda se encontram poucos exemplos de sua utilização como uma ferramenta para educação.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

O objetivo desta monografia é apresentar um referencial para utilização do *Simscape Electrical*, como uma ferramenta de ensino de sistemas elétricos de potência.

1.2.2 *Objetivos específicos*

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- a) Apresentar base teórica para o leitor que não tenha conhecimento sobre *Simulink/Simscape*, seja capaz de desenvolver os exemplos que serão apresentados;
- b) Demonstrar, através de um tutorial com passos simples, como iniciar uma simulação básica do *Simscape*;
- c) Apresentar uma quantidade significativa de blocos que fazem parte do *Simulink* e *Simscape*, além de suas configurações necessárias para que façam parte de uma simulação;
- d) Capacitar o leitor para que este tenha conhecimento suficiente para alterar simulações, ou até mesmo, criar uma nova simulação com base em outros sistemas elétricos;
- e) Apresentar a construção de blocos customizados utilizando elementos já presentes no *Simulink*, para que o leitor tenha a capacidade de construir modelos de dispositivos físicos, que não fazem parte da biblioteca padrão, para serem utilizados nas simulações.
- f) Demonstrar a utilização de ferramentas incorporadas ao *Simscape Electrical* como o *FFT Analysis*, *Load Flow Analyzer* e o *Power Line Paramaters*.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho de conclusão de curso está organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução e justificativa ao problema, além dos objetivos a serem alcançados. No capítulo dois é realizada uma revisão teórica acerca dos SEP's, cujas informações serão utilizadas para que o leitor seja capaz de configurar os blocos do *Simscape*, além de apresentar o sistema de distribuição de Formiga - MG, que será utilizado como exemplo nas simulações.

O capítulo três apresentará os blocos utilizados para a construção do sistema de distribuição de Formiga, além de suas configurações para serem utilizados nas simulações. No capítulo quatro será descrito a metodologia do trabalho, com a montagem dos dois modelos base do sistema de distribuição, um com carga estática e outro com carga variável, assim como os exemplos de simulações.

O capítulo cinco apresentará os resultados obtidos nas simulação dos exemplos. Em seguida, no capítulo seis, será apresentada a conclusão geral sobre o trabalho. O anexo A, apresenta de forma detalhada a configuração dos blocos, montagem avançada de um bloco com parâmetros customizados e a montagem do sistema por completo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados conceitos essenciais sobre SEP para a correta utilização e criação do modelo para simulações do *Simscape* e a configuração de seus blocos que compõem o seu sistema de distribuição.

2.1 Sistemas Elétricos de Potência

A definição geral de um SEP inclui uma fonte geradora, um sistema de transmissão e um sistema de distribuição de energia elétrica (GONEN, 2015), contendo todos os equipamentos necessários para suprir seus consumidores (SALLAM; MALIK, 2011).

As usinas geradoras são aquelas que transformam uma fonte de energia, seja ela mecânica, térmica ou hidráulica em energia elétrica. São encontradas distantes das cidades, normalmente próximas das fontes de energia primária (ZANETTA, 2006).

Para transporte da energia elétrica gerada para os consumidores, uma subestação próxima aos geradores utiliza transformadores que possibilitam o aumento dos níveis de tensão para que as linhas de transmissão possam transportar grandes pacotes de potência a longas distâncias, desta forma, reduzindo perdas (OLIVEIRA et al., 1996).

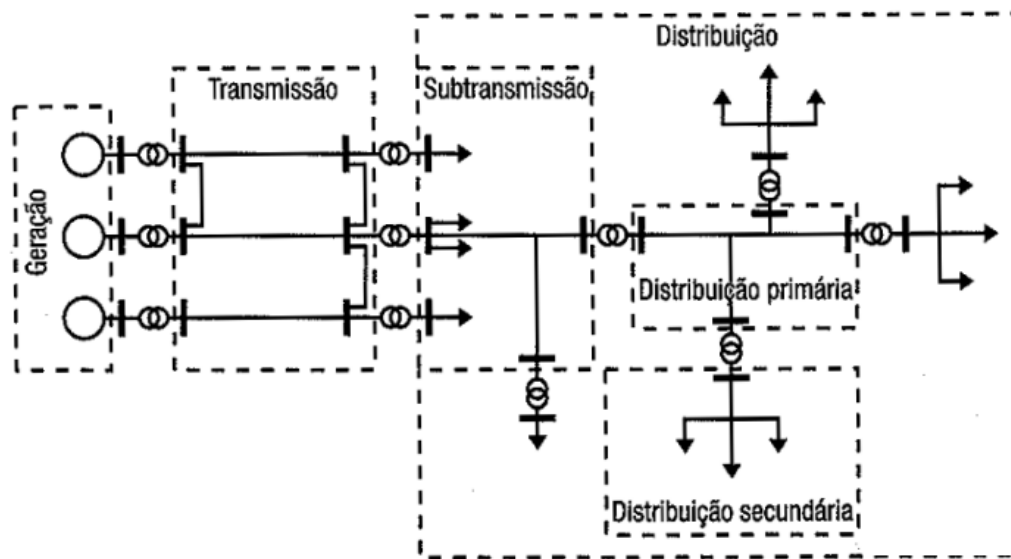
Por fim, o sistema de distribuição realiza a entrega da energia demandada pelos seus usuários. Nas subestações, os níveis de tensão no sistema de distribuição são ajustados, por meio de transformadores, para atendimento aos diversos tipos de consumidores (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

Sendo assim, um SEP tem como principal função entregar energia elétrica de qualidade e nas quantidades demandadas por consumidores pequenos, médios ou grandes (ROBBA et al., 2020). A Figura 1 mostra um diagrama unifilar de um sistema elétrico de potência.

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), é a parte da infraestrutura do sistema elétrico de potência que retira a eletricidade dos circuitos de transmissão interligados de alta tensão e faz a entrega aos seus usuários (SHORT, 2003).

Os SDEE's podem ser divididos em duas categorias: um sistema de transmissão que envia energia a longas distâncias, com altas tensões na ordem de centenas de quilo-volts (kV), que variam geralmente entre 60 e 500 kV, e um sistema de distribuição local que distribui a energia em tensões intermediárias, variando entre 11,9 a 34,5 kV. Este sistema de distribuição local é chamado de distribuição primária (MEIER, 2006).

Figura 1 – Diagrama unifilar de um sistema elétrico de potência.



Fonte: (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

Na distribuição primária, os transformadores da subestação rebaixam a tensão vinda diretamente da transmissão para os circuitos alimentadores. Estes circuitos saem da subestação e se espalham para distribuir a energia para seus ramais e para os consumidores primários. A distribuição secundária acontece, normalmente, nos ramais da distribuição primária, através de um transformador de distribuição que rebaixa a tensão novamente, entre 110 e 380 V, para a alimentar os consumidores de baixa tensão (SHORT, 2003).

2.2 Equipamentos do Sistema Elétrico de Potência

A seguir, uma breve explicação de alguns dos principais equipamentos elétricos que fazem parte de um sistema elétrico de potência e que serão utilizados durante a modelagem do sistema de distribuição da cidade de Formiga neste trabalho.

2.2.1 Chave de aterramento

A chave de aterramento é um dispositivo utilizado para a proteção de sistemas elétricos que, ao receber o comando de um relé, irá provocar o aterramento de uma fase ou das três fases o que provocará o acionamento de um disjuntor de retaguarda que normalmente está localizado em outro ponto do sistema (FILHO, 2013).

2.2.2 Disjuntores e Relés

A principal função de um disjuntor é causar a interrupção dos curtos-circuitos o mais rápido possível para evitar que os equipamentos e instalações elétricas sofram o mínimo dano causado pelas elevadas correntes. Já os relés tem o objetivo de detectar estas condições anormais perigosas e atuar em um ou mais disjuntores (SATO; FREITAS, 2017).

2.2.3 Transformadores de potência

Os transformadores de potência são máquinas elétricas estáticas que, por meio de indução eletromagnética, transformam corrente e tensão alternada, reduzindo ou elevando, entre um circuito chamado de primário para um ou mais circuitos normalmente chamados de secundário (FILHO, 2013).

São utilizados nos sistemas de distribuição nas redes de média ou de baixa tensão. Para média tensão, são utilizados transformadores trifásicos e na baixa tensão, bancos compostos por transformadores monofásicos (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

2.2.4 Transformadores de corrente e de potencial

Os Transformadores de Corrente (TC's), possibilitam que instrumentos de medição, ou de proteção, funcionem corretamente sem que sua corrente nominal seja elevada para os níveis do circuito em que estão instalados. Assim como os transformadores de potência, o TC possui um enrolamento primário de poucas espiras e um secundário no qual a corrente é reduzida para 5 A na maioria das vezes. Sendo assim os instrumentos de medição e proteção podem ter tamanhos reduzidos (FILHO, 2013).

Assim como os TC's, os Transformadores de Potencial (TP's), são utilizados para o funcionamento de outros equipamentos no sistema de distribuição por meio da redução da tensão. Este dispositivo é muito empregado em voltímetros, relés de tensão e medidores de energia. (FILHO, 2013).

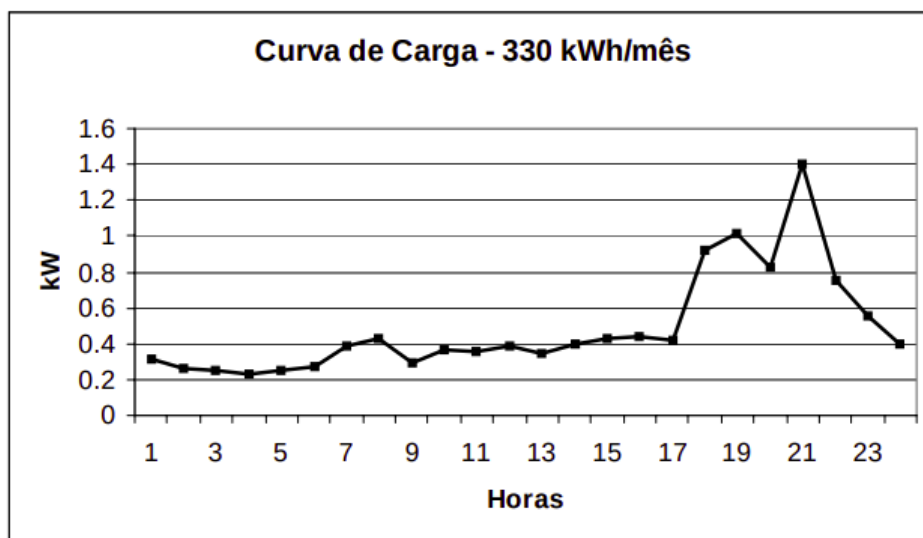
2.3 Curvas de carga

As curvas de carga são registros de medidas de potência obtidas utilizando-se de instrumentos adequados durante o funcionamento de um sistema elétrico, com o objetivo de ilustrar o consumo e o comportamento de uma carga variável alimentada por uma fonte. É utilizada para

planejamento de sistemas de distribuição ou para todos os tipos de consumidores, sejam eles industriais, residenciais ou comerciais (OSETORELÉTRICO, 2023).

Através destas curvas, é possível representar o consumo dos usuários analisados em várias escalas de tempo, seja em horas, dias, ou até mesmo, períodos mais longos como meses e estações do ano. Estes gráficos fornecem informações importantes para as concessionária de energia, sendo a mais importante delas a demanda máxima, também chamada de pico de demanda (MEIER, 2006). A Figura 2 apresenta um exemplo de curva de carga tipicamente residencial.

Figura 2 – Exemplo de curva de carga de consumidor residencial.



Fonte: (FRANCISQUINI, 2006).

2.4 A subestação de Formiga

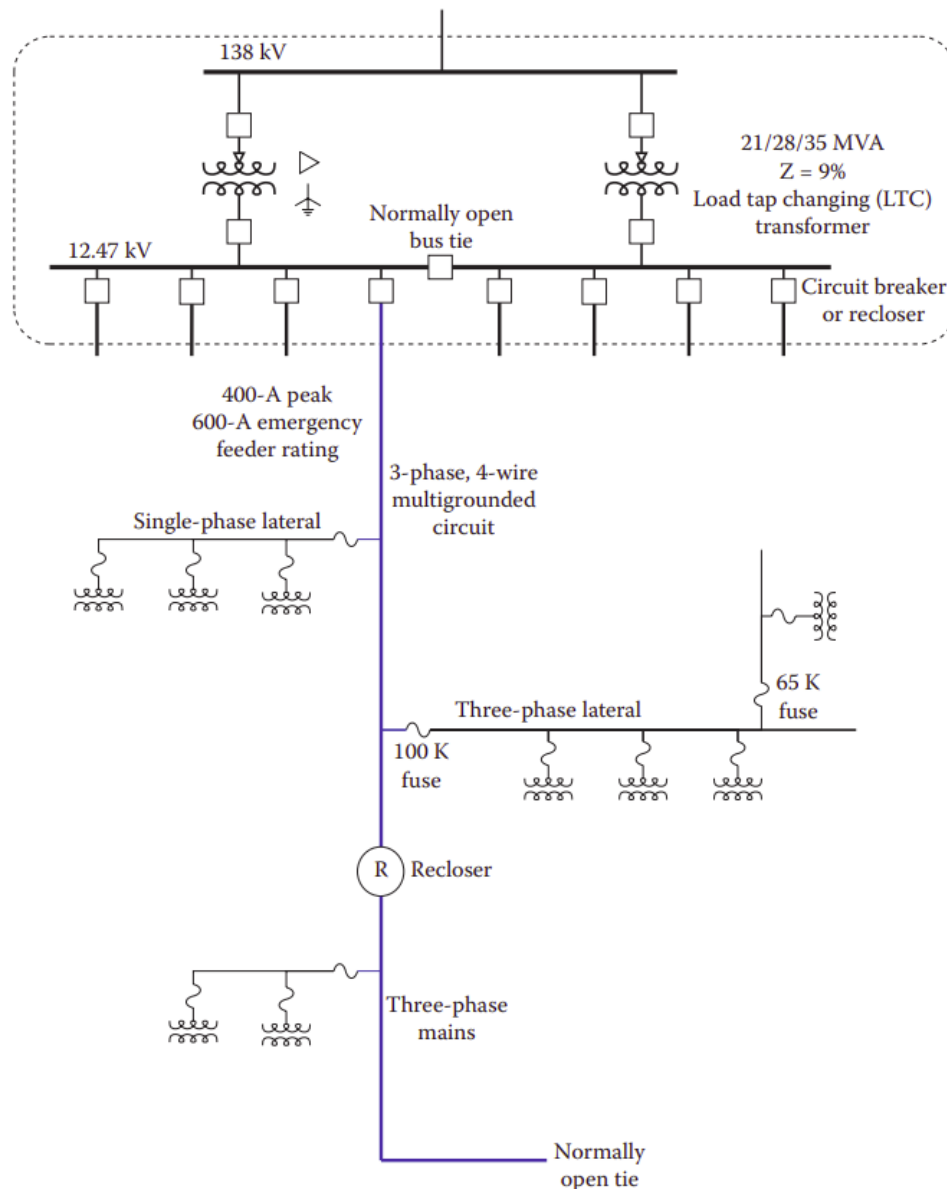
A Subestação (SE) da cidade de Formiga será utilizada como objeto de estudo neste Trabalho de Conclusão de Curso. Ela será modelada no *Simulink* utilizando-se o *Simscape Electrical Specialized Power Systems* para a realização dos exemplos.

Segundo Filho (2021), uma SE pode ser definida como, um conjunto de dispositivos, equipamentos e condutores elétricos, com a finalidade de modificar as características da energia elétrica para que possa ser distribuída aos seus consumidores de forma adequada.

A Figura 3 mostra um exemplo de um sistema de distribuição partindo da subestação com seu alimentador primário e os ramais monofásicos e trifásicos que alimentam os transformadores de distribuição secundário.

Existem quatro tipos de subestações, sendo elas:

Figura 3 – Exemplo de um sistema típico de distribuição.



Fonte: (SHORT, 2003).

- Elevadoras, que normalmente estão localizadas próximas a geração e elevam os níveis de tensão para que a energia seja transmitida aos centros de consumo com menores perdas.
- Abaixadoras, que são localizadas próximas a entrada de uma cidade e rebaixam a tensão para níveis seguros as estruturas da cidade e alimentam as subestações de distribuição.
- As subestações industriais ou de consumidores finais, que ficam localizadas no próprio terreno da indústria e reduzem a tensão para que seja utilizada em equipamentos de média tensão.
- A subestação de distribuição é considerada a mais comum nos sistemas elétricos de potência

sendo a responsável por energizar os alimentadores que transportaram a energia diretamente aos consumidores (MCDONALD; SAFARI; COMPANY, 2012).

A subestação de Formiga, que fica localizada na Rua Hermínio Pio da Silva, no bairro Ouro Negro, é alimentada por uma linha de subtransmissão proveniente da cidade de Arcos, com tensão nominal de 69 kV. Todo o sistema de subtransmissão e distribuição pertence a concessionária de energia CEMIG, que também faz a manutenção preventiva e corretiva do sistema de subtransmissão e das SE's, porém, a manutenção do sistema de distribuição da cidade de Formiga, atualmente é executado por uma empresa terceirizada chamada Engelmig (TEIXEIRA, 2014).

A Tabela 1, apresenta informações sobre a fonte de subtransmissão da SE de Arcos para a SE de Formiga que serão utilizadas para a configuração da simulação.

Tabela 1 – Parâmetros da fonte trifásica.

Tensão	Frequência	Tipo de conexão
69 kV	60 Hz	Y aterrado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A subestação conta com 5 alimentadores que distribuem a energia pela cidade de Formiga e suas zonas rurais. Os alimentadores são nomeados como: FMA 03, FMA 04, FMA 05, FMA 06, FMA 07. Na saída de cada alimentador, encontra-se uma chave-faca normalmente fechada para ser utilizada em casos de manutenção preventiva ou corretiva.

Cada um destes alimentadores utiliza um condutor para a transmissão de energia. A Tabela 2 contém as informações sobre as principais características dos condutores utilizados na distribuição de energia na cidade de Formiga, sendo CA cabos de alumínio, CAA cabos de alumínio com alma de aço e PROT. cabos protegidos.

Tabela 2 – Condutores utilizados nos alimentadores da subestação.

Alimentador	Cabo Primário	Neutro
FMA 03	336,4 – CAA	4/0 – CA
FMA 04	336,4 – CA	1/0 – CA
FMA 05	4/0 – CAA	4/0 – CA
FMA 06	336,4 – CAA	4/0 – CA
FMA 07	150+9,5 – PROT.	1/0 – CA

Fonte: (TEIXEIRA, 2014), 2023.

Para a modelagem deste trabalho são necessários alguns parâmetros destes condutores.

Para isto, a Tabela 3 apresenta estes parâmetros de uma tabela de especificações de produtos da *General Cable*, uma empresa de condutores elétricos pertencente ao grupo *Prysmian*.

Tabela 3 – Principais parâmetros dos condutores da subestação.

Condutor	Diâmetro (cm)	Razão T/D	R. CC (ohm/km)	GMR (cm)
336,4 – CA	1,692	0,5	0,172	0,640
4/0 – CAA	1,431	0,333	0,253	0,312
336,4 – CAA	1,829	0,316	0,173	0,744
150+9,5 – PROT.	1,441	0,5	0,1941	0,321

Fonte: (GERENAL-CABLE, 2016).

Como não foram fornecidos os dados de comprimento total dos alimentadores, estes valores serão definidos pelo autor e não tem relação com o comprimento real dos alimentadores da subestação de Formiga. O presente trabalho especifica cada alimentador da rede com um comprimento diferente para simular diferentes características e áreas atendidas, sendo cada bloco de linha de distribuição separadas de 10 em 10 km. A distribuição destes alimentadores assim como seu comprimento pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4 – Comprimento e área de distribuição dos alimentadores.

Alimentador	Comprimento	Área
FMA 03	30km	Apenas Residencial
FMA 04	20km	Comercial, Residencial
FMA 05	10km	Apenas Industrial
FMA 06	30km	Industrial, Comercial, Residencial
FMA 07	50km	Apenas Residencial (Rural)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O primeiro alimentador distribui energia para a maior área residencial da cidade. O segundo distribui para a área central, composta por áreas comerciais e residenciais. O terceiro atende apenas a área industrial. O quarto, atende a área periférica da cidade, onde encontram-se áreas residenciais, pequenos comércios e pequenas indústrias. O quinto alimentador atende as áreas rurais da cidade.

Já a Linha de Transmissão (LT), foi definida com 22km, após medição manual utilizando o *Google Earth*, saindo da SE de Arcos até a entrada da SE de Formiga.

Segundo Teixeira (2014), a SE de Formiga dispõem de dois transformadores ligados em paralelo para então serem conectados a barra de alimentadores. As configurações dos transformadores pode ser vista na Tabela.

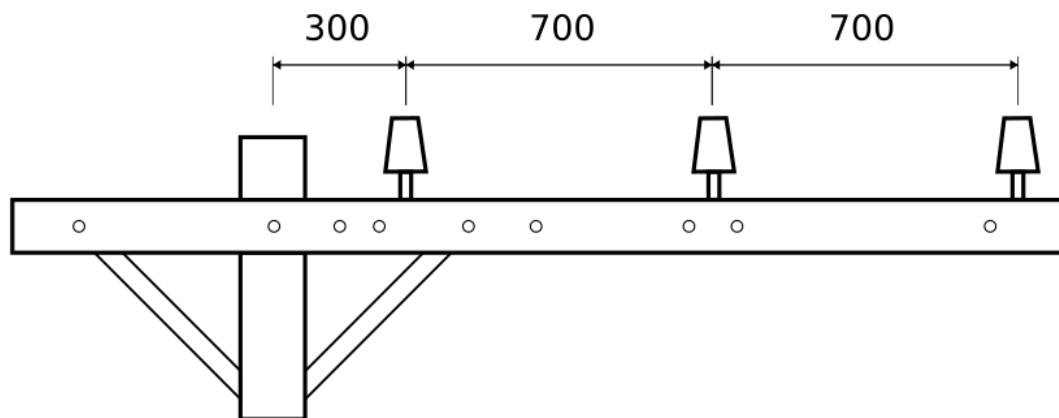
Tabela 5 – Parâmetros dos transformadores da SE Formiga.

Potência	Frequência	Tensão do primário [kV]	Tensão do secundário [kV]
12,5 MVA	60 Hz	69 - Δ	13,8 - Y aterrado

Fonte: (TEIXEIRA, 2014).

Para a modelagem do sistema de distribuição, é necessário especificar a altura do poste e sua estrutura, para que sejam calculadas suas impedâncias. Para simplificar o sistema, apenas um modelo de estrutura de poste será utilizado. O poste terá 11 metros de altura e o modelo de estrutura escolhida será o M1. A geometria da estrutura M1 pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Dimensões da Estrutura M1 em mm.



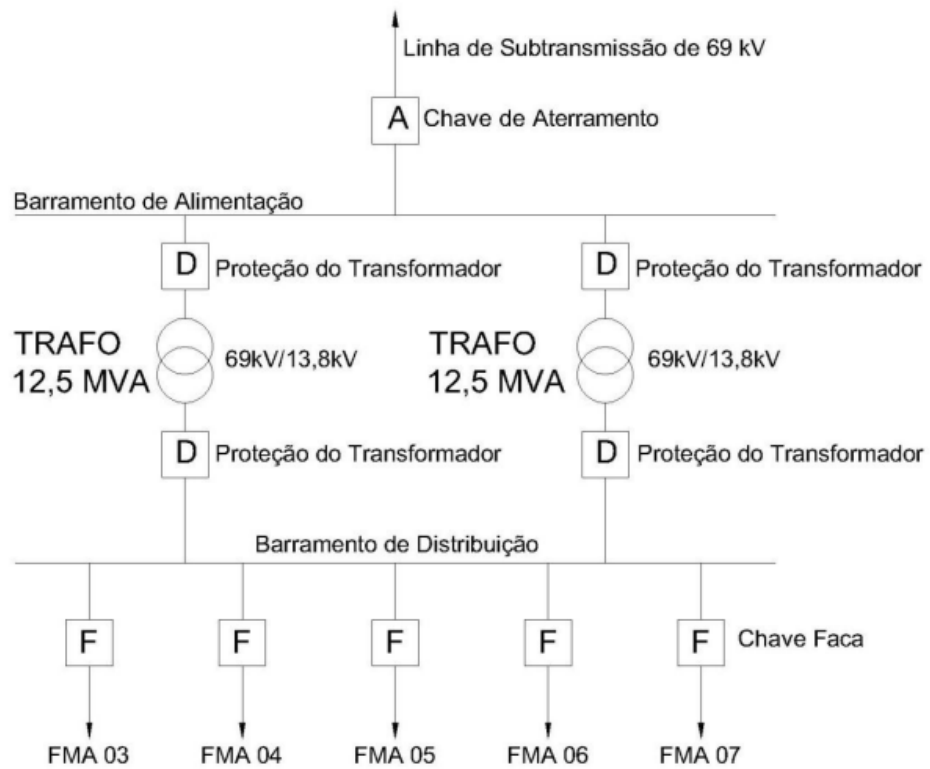
Fonte: (CEMIG, 2002).

2.4.1 Diagrama unifilar da subestação de Formiga

Para a criação do modelo de forma verosímil, será utilizado um diagrama da SE de Formiga. Todas as configurações e equipamentos aparecem neste diagrama e serão recriados no *Simulink* utilizando o *Simscape Electrical Specialized Power Systems*.

O diagrama unifilar da subestação de Formiga - MG que será utilizado na confecção deste trabalho, pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama unifilar da subestação de Formiga - MG.



Fonte: (TEIXEIRA, 2014).

3 SIMULINK E SIMSCAPE ELECTRICAL

Este capítulo tem como objetivo apresentar todos os blocos básicos utilizados durante a modelagem do sistema de distribuição da cidade de Formiga-MG. Também serão apresentadas ferramentas que fazem parte do *Simscape*, como a ferramenta de análise de fluxo de potência assim como a ferramenta para cálculo de impedância, resistência e capacitância em linhas de transmissão. A leitura deste capítulo se faz necessária para a compreensão de como cada bloco básico do *Simscape* pode ser utilizado e configurado para que se consigam os resultados esperados durante a realização das simulações.

Os blocos a seguir fazem parte do *Specialized Power Systems*, uma parte integrante da *toolbox Simscape Electrical*. A versão utilizada do MATLAB durante o desenvolvimento deste trabalho é a R2021b.

3.1 Simulink

O *Simulink* é uma ferramenta de desenvolvimento de simulações de modelos, cujo seu funcionamento é baseado em diagrama de blocos. Ele é capaz de fornecer ao usuário simulações, geração de código automático, testes contínuos, além de verificação de sistemas embarcados. O *Simulink* oferece um editor gráfico e uma biblioteca de blocos para que o usuário possa modelar seu sistema conforme sua necessidade, além da capacidade de customizar seus próprios blocos. Ele está integrado ao MATLAB, o que o torna capaz de interpretar seus códigos, além de ser capaz de exportar os resultados das simulações para serem analisadas no MATLAB (MATHWORKS, 2023c).

O *Simulink* é uma ferramenta que faz parte do MATLAB e que é muito utilizada na indústria automotiva, aeroespacial, eletrônica, de telecomunicações, de energia e muitas outras. Também faz parte da matriz curricular em mais de 3500 universidades ao redor do mundo (MATHWORKS, 2005).

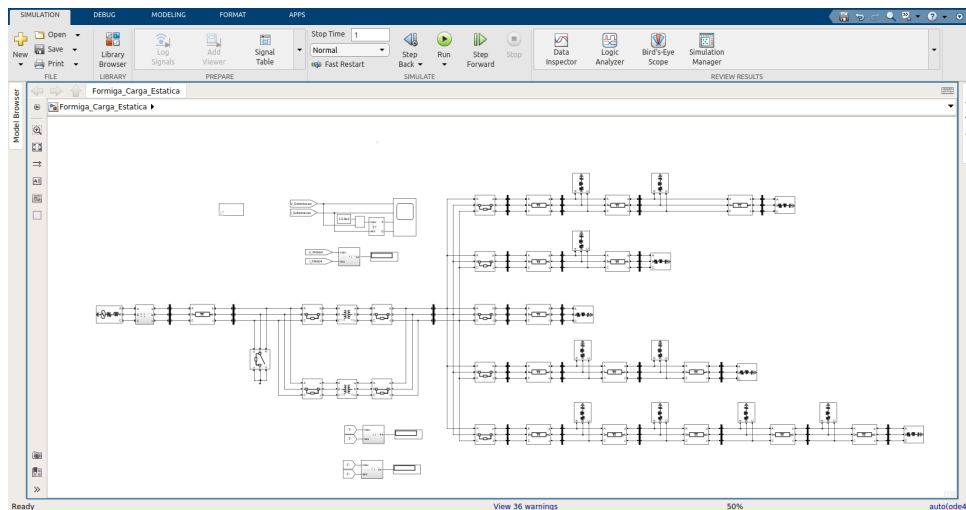
3.2 Simscape Electrical

O *Simscape Electrical*, antes conhecido como *SimPowerSystems*, é uma *toolbox* integrante do *Simulink* que fornece componentes para a modelagem e simulação de sistemas elétricos, eletrônicos e mecatrônicos. É possível parametrizar componentes utilizando variáveis do MATLAB além dos sistemas de controle integrantes do *Simulink* (MATHWORKS, 2023a).

3.3 Editor Simulink

O editor *Simulink*, apresentado na Figura 6, é a principal janela onde o usuário encontra todas as ferramentas para visualização, modelagem e execução das simulações. Esta tela é dividida em seções para melhor organização e fácil utilização pelo usuário.

Figura 6 – Área de trabalho do *Simulink*.

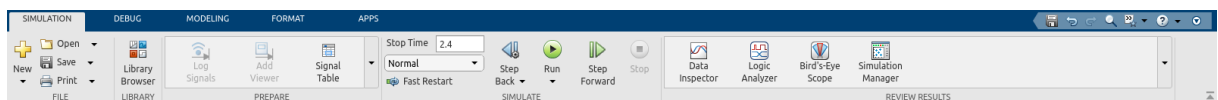


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.3.1 Toolstrip

A *Toolstrip*, mostrada na Figura 7, contém uma série de funções integradas para facilitar a configuração e execução das simulações. Através dela o usuário tem acesso ao botão para rodar a simulação além de aplicativos específicos para cada tipo de simulação.

Figura 7 – A *Toolstrip* do editor *Simulink*.

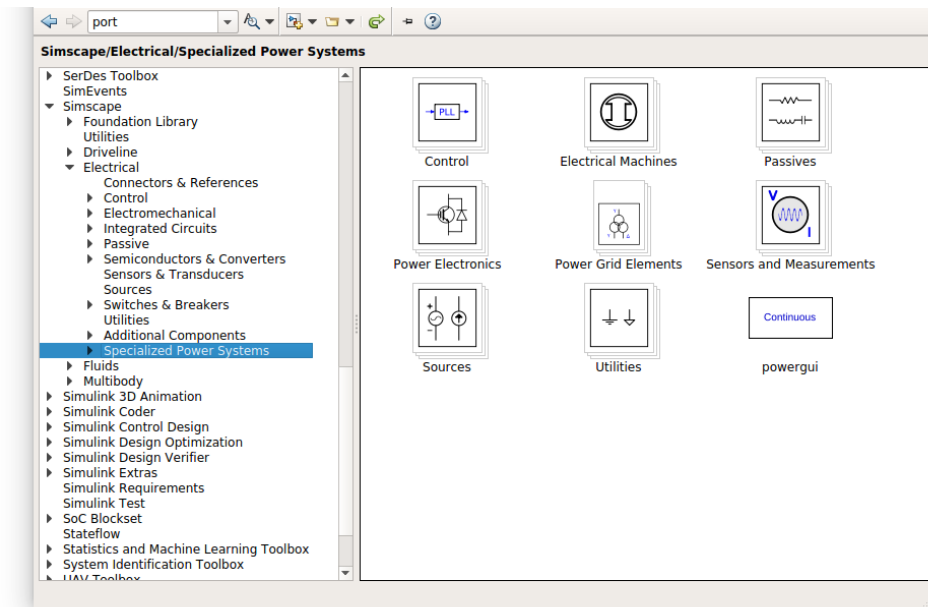


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.3.2 Library Browser

O *Library Browser* contém todos os blocos disponíveis para utilização da construção dos modelos. Nele também se encontram as *Toolbox* que são blocos adicionais com utilidades específicas, sendo uma destas o *Simscape Electrical* que será utilizado neste trabalho, conforme Figura 8.

Figura 8 – Library Browser do Simulink.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

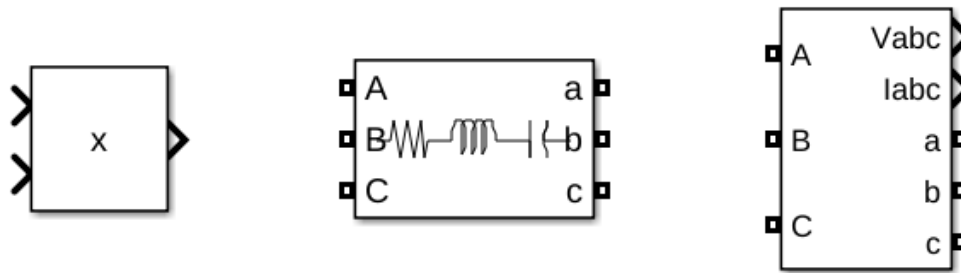
3.4 Tipos de conexões dos blocos

Apesar de fazerem parte do mesmo sistema de simulação, existem diferenças entre os blocos utilizados pelo *Simscape Electrical Specialized Power Systems* e o *Simulink*. Ele possui blocos para serem utilizados como a base da construção de modelos para simulações multidomínio (MATHWORKS, 2023c). Já os blocos do *Simscape Electrical Specialized Power Systems* utilizam os blocos fundamentais do *Simulink* para modelagem de dispositivos elétricos como transformadores, fontes trifásicas e motores elétricos, simulando os fenômenos físicos presentes nestes dispositivos (MATHWORKS, 2023b).

Blocos *Simulink* são caracterizados pelas conexões em formato de seta ">" enquanto os blocos do *Specialized Power System* tem o formato de um quadrado "□". Porém, como os blocos de *Simulink* são a base para a construção dos blocos do *Specialized Power Systems*, alguns deles podem conter ambas as conexões, como visto na Figura 9.

Para a fácil compreensão desta diferença, basta imaginar que as conexões quadradas "□" do *Simscape Electrical Specialized Power Systems* são os condutores de energia elétrica, logo serão conectadas entre os dispositivos para seu funcionamento e transmissão de energia. Já as conexões em seta ">" do *Simulink* são aquelas que transmitem informações, sejam estes valores de tensão e corrente, ou um sinal para o desarme de um disjuntor.

Figura 9 – Exemplo de blocos do Simulink e do Specialized Power Systems.

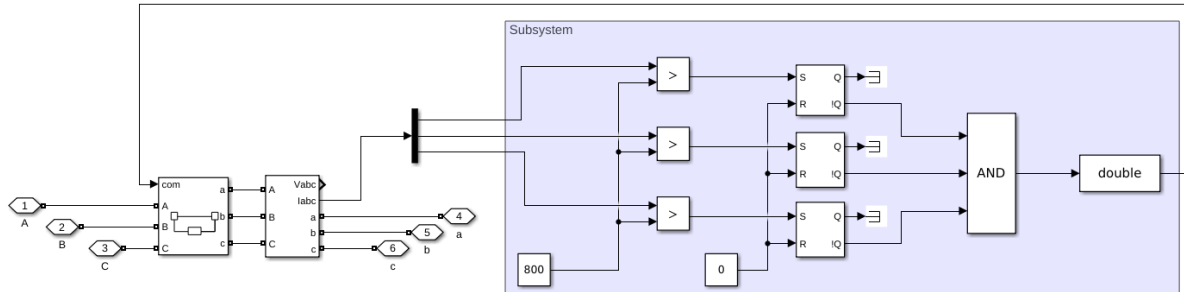


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.5 Blocos tipo Subsistema e Máscara

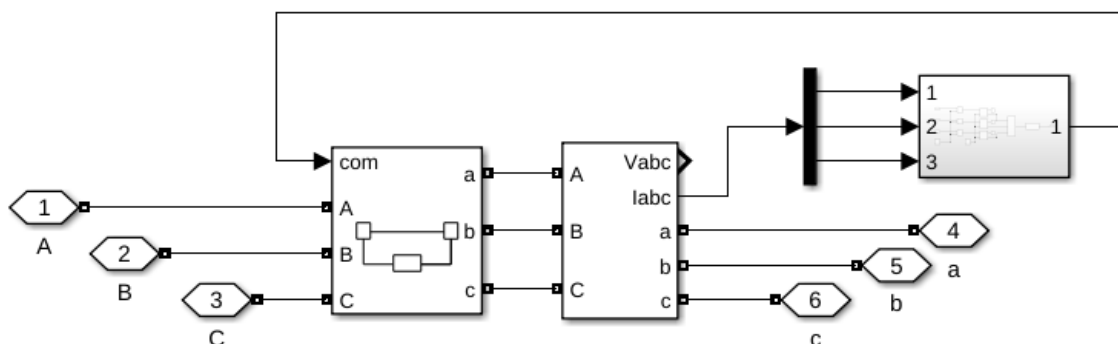
Conforme um modelo começa a aumentar em quantidade de blocos e ficar mais complexo, Figura 10, é possível agrupar certos blocos que fazem parte de um sistema específico dentro de um bloco chamado Subsistema (KARRIS, 2006). Este bloco agrupa outros blocos que compõem uma mesma função simplificando e organizando o modelo, conforme Figura 11.

Figura 10 – Modelo de relé instantâneo sem subsistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 11 – Modelo de relé instantâneo com subsistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Um subsistema também pode ser transformado em um bloco chamado de "máscara", onde seu conteúdo é escondido e ao dar dois cliques sobre este bloco o usuário terá acesso a uma janela de parâmetros para sua configuração, sendo que grande parte dos blocos já presentes na biblioteca do *Simscape Electrical/Simulink* é uma máscara de modelos mais complexos (XUE; CHEN, 2013).

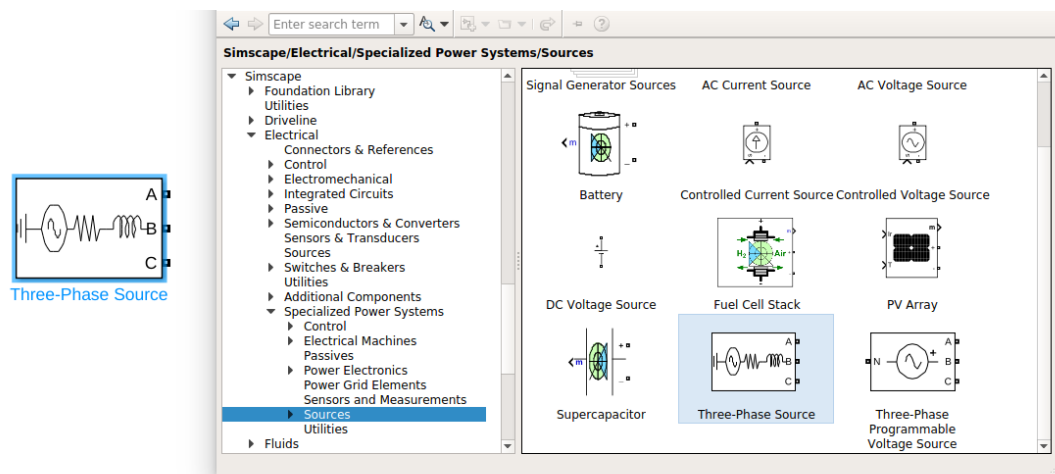
3.6 Blocos do *Specialized Power Systems* e *Simulink*

O grupo de blocos do *Specialized Power Systems* faz parte da *Toolbox Simscape Electrical*. Como o nome sugere, esse grupo de blocos é especializado na simulação de componentes físicos utilizados em SEP. Para modelagem de alguns sistemas, blocos do *Simulink* foram utilizados. Abaixo segue a lista dos blocos e sua configuração que foram utilizados durante a confecção deste trabalho.

3.6.1 Fonte trifásica

A *Three-Phase Source* é utilizada para simular uma fonte trifásica com conexão Y e impedância R-L interna. Este bloco pode ser encontrado na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources* conforme Figura 12.

Figura 12 – Fonte trifásica do *Simscape*.



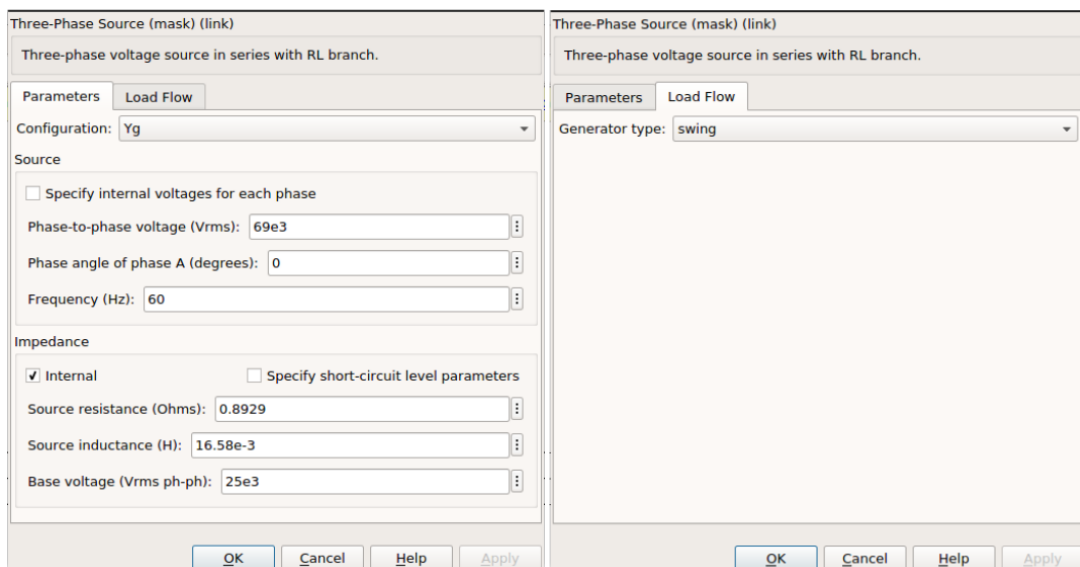
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Nas configurações deste bloco é possível ajustar vários parâmetros da fonte como o tipo de conexão, estrela ou delta, a frequência, a tensão RMS de linha caso esteja trabalhando com a fonte balanceada ou a tensão RMS de cada fase separadamente assim como seus o ângulos.

Para análise de fluxo de potência é possível selecionar o tipo de barramento ao qual a fonte se encontra, sendo este do tipo *Swing*, PV ou PQ, onde o tipo *Swing* é o barramento que estabelece a referência para o estudo de fluxo de potência, o PQ são as barras onde são conhecidos os valores de potência ativa e reativa, e PV são as barras onde são conhecidos os valores do módulo de tensão e a potência ativa.

Para o presente trabalho, a fonte foi ajustada para ser uma fonte em estrela aterrada, ter uma tensão de 69 kV e com a impedância interna padrão já presente no bloco. Na aba *Load Flow*, o tipo de barramento foi selecionado como *Swing* já que este será a referência para os estudos de fluxo de potência.

Figura 13 – Parâmetros da fonte trifásica.



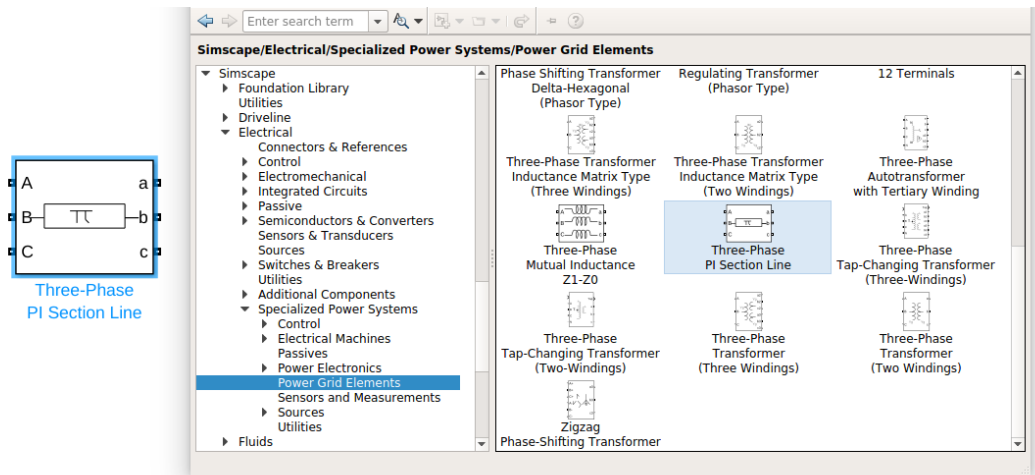
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.2 Linhas de transmissão ou de distribuição

Para simular as linhas de transmissão e distribuição, serão utilizados os blocos de linha modelo pi equivalente, já que se trata de um dos modelos mais utilizados dentro das salas de aula. Este bloco pode ser encontrado na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Grid Elements*, conforme Figura 14.

O bloco necessita da passagem de dados como, o comprimento da linha, a frequência, a resistência, indutância e capacitância, tanto da sequência positiva como da sequência zero, por quilômetro, como pode ser observado na Figura 15. Os dados referentes a sequência positiva e sequência zero foram calculados através da ferramenta *Power Line Parameters*, utilizando

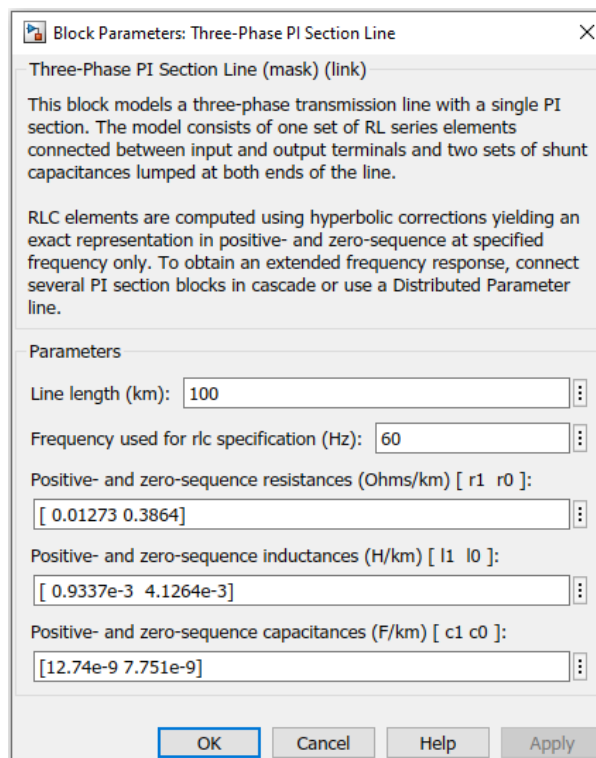
Figura 14 – Linha de transmissão modelo PI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

os dados da Tabela 3, assim como o modelo de poste com estrutura M1, conforme Figura 4. A utilização da ferramenta *Power Line Parameters* será explicada no decorrer do trabalho.

Figura 15 – Parâmetros da linha de transmissão modelo PI.

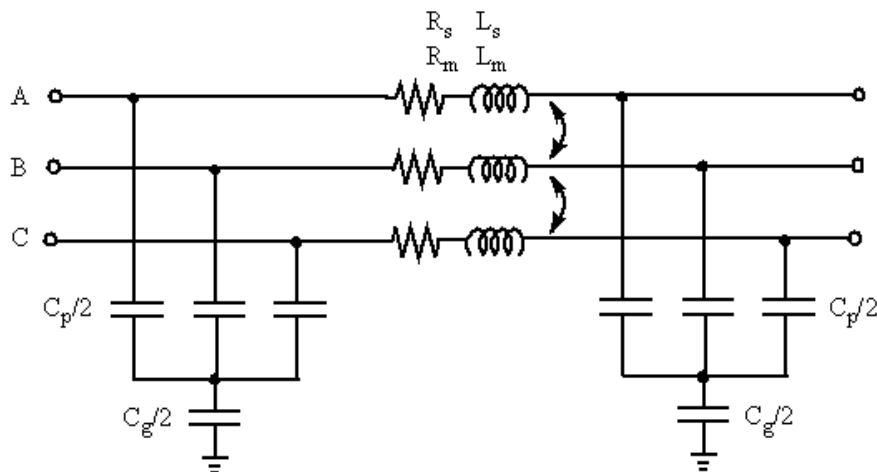


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao contrário do bloco de linha de parâmetros distribuídos, *Distributed Parameters Line*, onde a resistência, indutância e capacitância são distribuídas uniformemente ao longo da linha, o

bloco de linha modelo pi trifásica, agrupa os parâmetros da linha em uma única seção, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 – configuração do modelo PI.

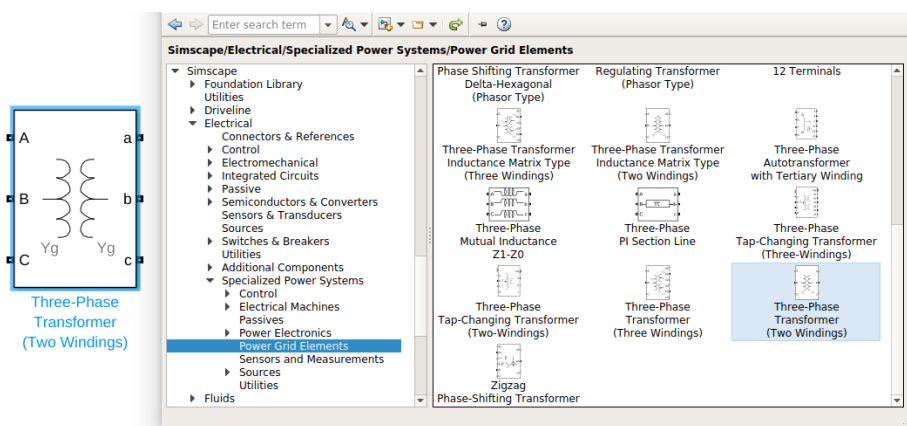


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.3 Transformador

Dentro do *toolbox* do *Simscape*, existem vários modelos de transformadores. O modelo utilizado neste trabalho é o transformador trifásico de dois enrolamentos. Este bloco pode ser encontrado na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Grid Elements* conforme Figura 17.

Figura 17 – Bloco do transformador trifásico de dois enrolamentos.

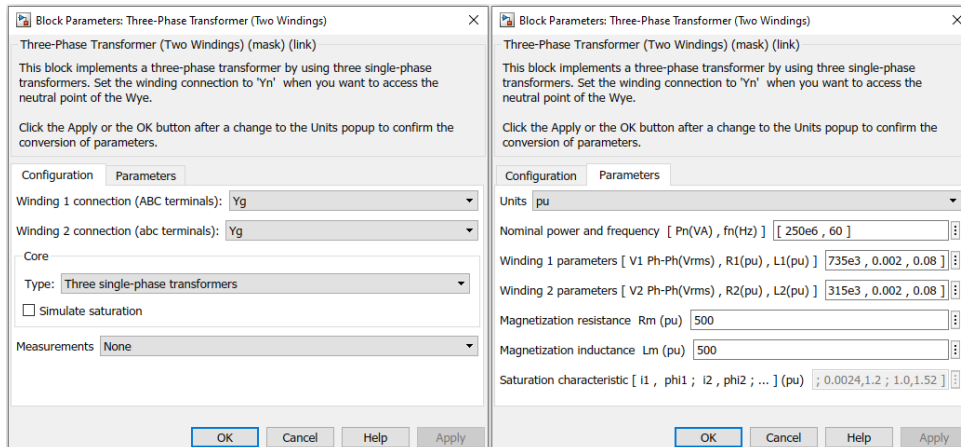


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Este bloco permite a configuração de vários parâmetros do transformador como a conexão dos enrolamentos, se estão conectados em estrela ou delta, o tipo de núcleo do transformador,

potência nominal, frequência, tensão, resistência e indutância de cada enrolamento além de sua resistência e indutância de magnetização. Também é possível simular a saturação do transformador.

Figura 18 – Tela de parâmetros do transformador trifásico.

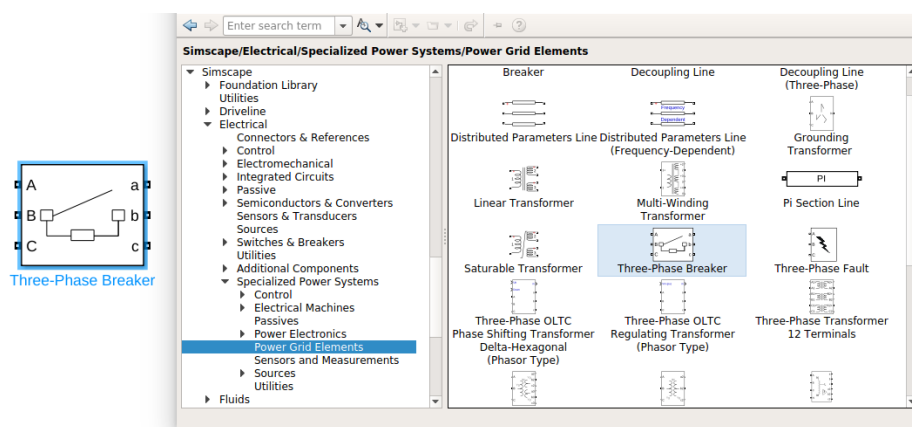


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.4 Disjuntor ou chave

Para a simulação dos dispositivos de proteção como os disjuntores, é utilizado o bloco *Three-Phase Breaker*. Ele pode, tanto ser utilizado como um disjuntor, como uma chave faca. Este bloco pode ser encontrado na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Grid Elements*, conforme Figura 19.

Figura 19 – Bloco de disjuntor trifásico.

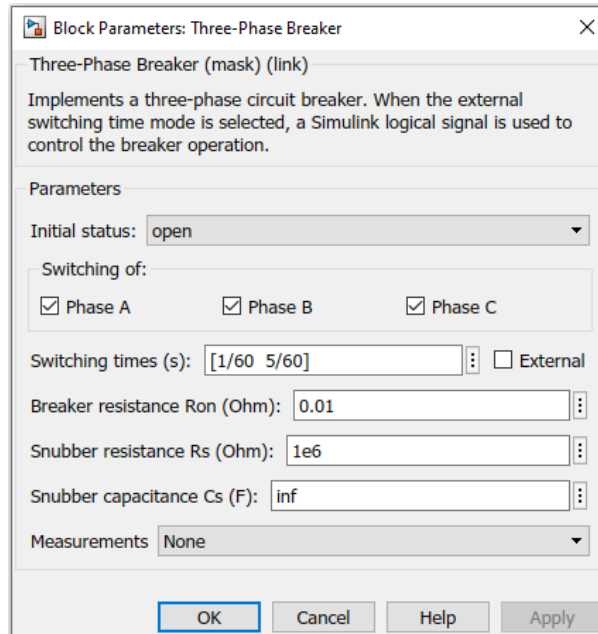


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O disjuntor necessita de poucos parâmetros para seu funcionamento. O primeiro diz respeito ao seu estado inicial, sendo este aberto ou fechado. Em seguida, quais as fases ele deve

comutar, o tempo de comutação, a resistência do disjuntor, a resistência e capacitância *Snubber* do disjuntor.

Figura 20 – Parâmetros para o disjuntor trifásico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para o presente trabalho, os parâmetros padrões foram mantidos. Apenas o tempo de acionamento será modificado para o disjuntor que compõe a proteção da SE de Arcos, pois este será controlado por um relé 50/51.

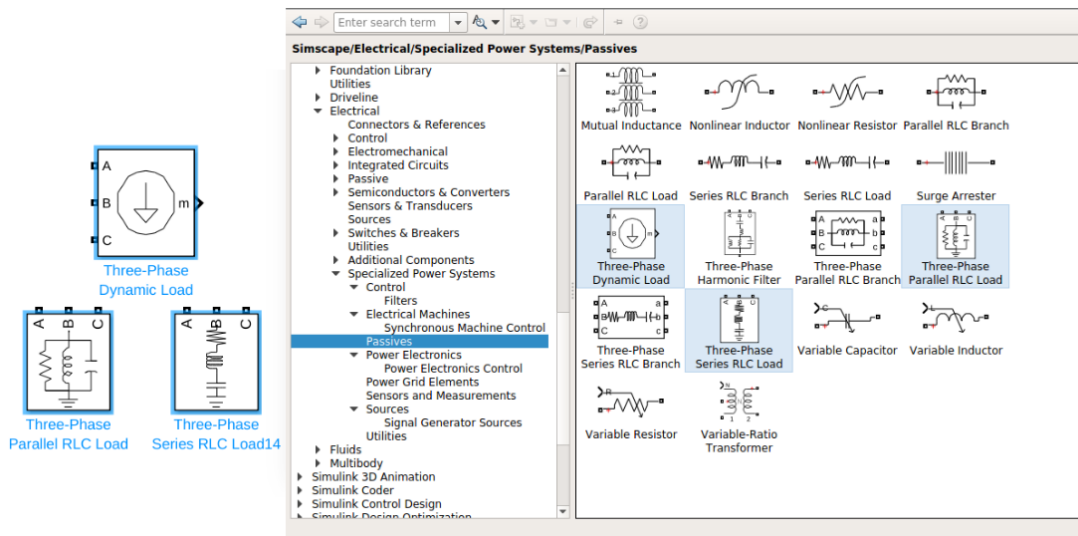
3.6.5 Carga

No *Simscape* existem vários modelos de blocos de carga como, o bloco RLC série, RLC paralelo e carga dinâmica. Estes blocos podem ser encontrados na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives*, conforme Figura 21.

Para a simulação da rede de distribuição com carga estática, foi escolhido o bloco de carga RLC trifásica em série. Já para a simulação com carga variável será utilizado uma máscara desenvolvida especificamente para este propósito, permitindo ao usuário alterar como a potência é absorvida através de uma curva de carga e seu fator de potência.

O bloco de carga RLC trifásica em série possui configurações simples, conforme mostra a Figura 22, se a conexão é estrela ou delta, tensão nominal de linha, frequência nominal e a potência, sendo que este último é separado em potência ativa e reativa indutiva ou capacitiva. O

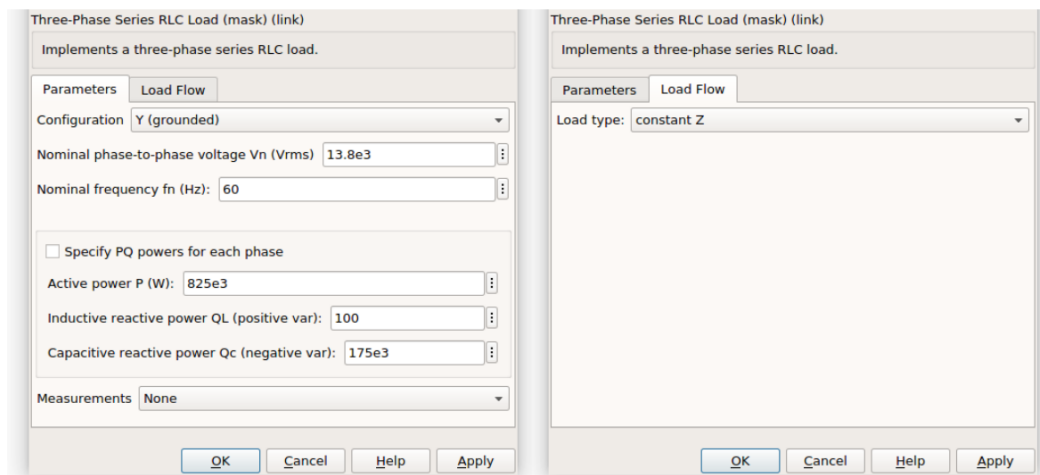
Figura 21 – Blocos de carga trifásica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

usuário também pode optar em definir a quantidade de potência absorvida por fase e definir qual tipo de carga para a análise de fluxo de potência.

Figura 22 – Parâmetros do bloco de carga RLC trifásica em série.

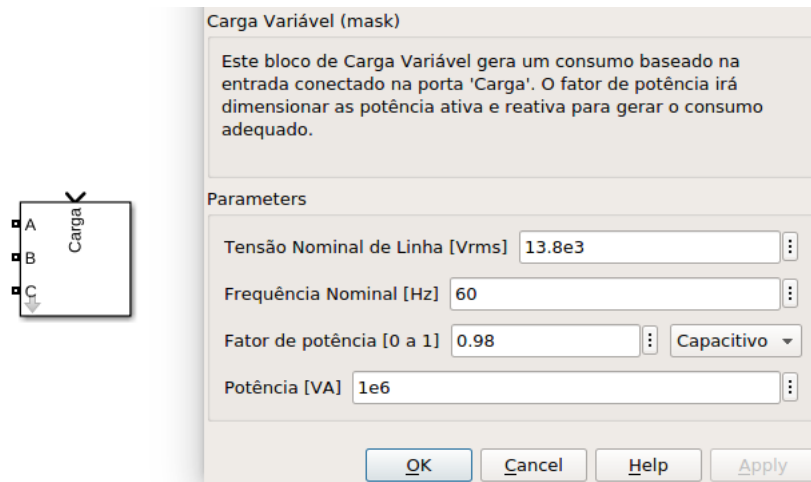


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na carga variável, assim como na carga estática, as configurações necessárias do bloco são apenas informações simples como tensão nominal de linha, frequência nominal, fator de potência, se o fator de potência é indutivo ou capacitivo e carga total em VA, conforme Figura 23.

A parte interna desta máscara, que pode ser vista na Figura 24, é composta por blocos tipo *Connection Port*, nomeadas de A, B e C, um bloco de carga dinâmica e um bloco tipo subsistema, nomeado de PQ, que recebe a entrada da curva de carga e calcula os valores de potência ativa e

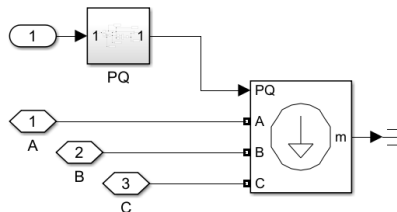
Figura 23 – Bloco tipo máscara de carga dinâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

reativa para alimentar o bloco principal de carga com base no valor do fator de potência inserido pelo usuário.

Figura 24 – Parte interna do bloco tipo máscara de carga dinâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

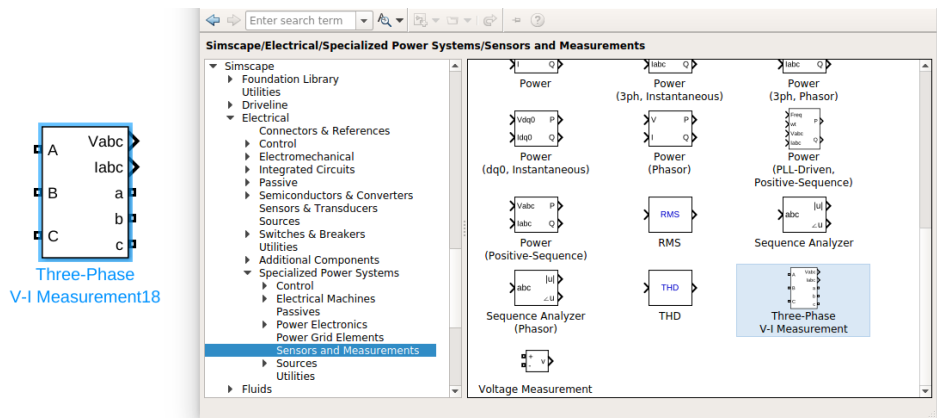
A montagem detalhada deste bloco de carga variável poder ser visto no Anexo A.5.

3.6.6 Medidor de tensão e corrente

Este bloco funciona como um TP e TC fazendo as medições de tensão e corrente durante a simulação. Este bloco pode ser encontrado na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements*, conforme Figura 25.

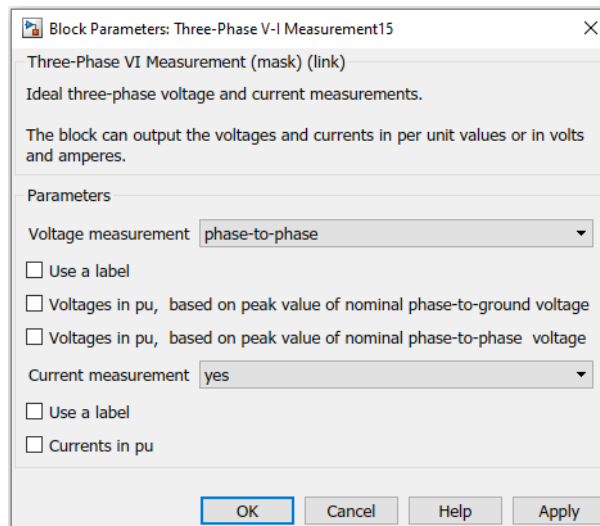
A configuração deste bloco é simples, apenas sendo necessária a seleção do tipo de medição de tensão que será realizada, sendo tensão de fase ou tensão de linha e se será realizada a medição de corrente. Caso o usuário desejar, esta medição pode ser feita em PU, neste caso, sendo necessária a configuração da tensão nominal esperada.

Figura 25 – Bloco de medição de tensão e corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 26 – Parâmetros para medição de tensão e corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Este bloco também permite que seja adicionado uma etiqueta para que a medida de tensão ou corrente sejam passados como uma variável, sendo possível acessar estes valores através de um bloco *From*.

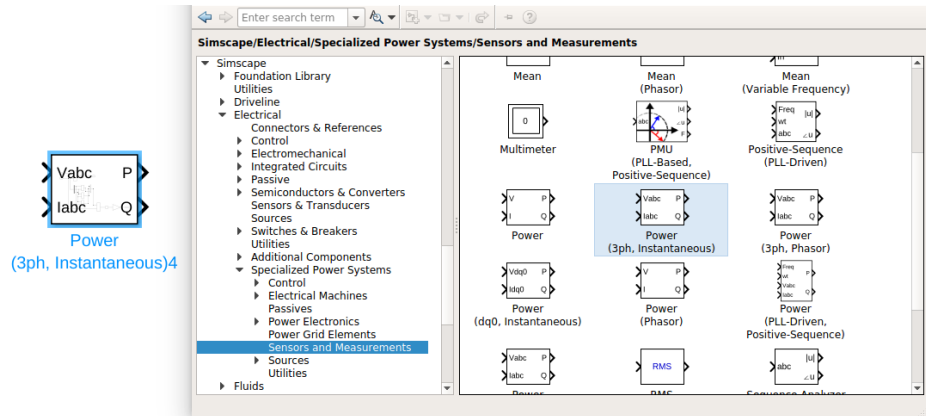
Para o presente trabalho, o bloco de medição foi configurado para obter a tensão de fase (*phase-to-ground*) em PU utilizando um *label* específico para cada ponto do sistema, assim como a corrente também utiliza um *label* específico.

3.6.7 Medidor de potência

Este bloco é utilizado para medir a potência ativa e reativa do sistema. Pode ser encontrado na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements*,

conforme Figura 27. Este bloco não exige qualquer configuração, devendo apenas ter como entrada um sinal trifásico de tensão e corrente.

Figura 27 – Bloco medidor de potência.

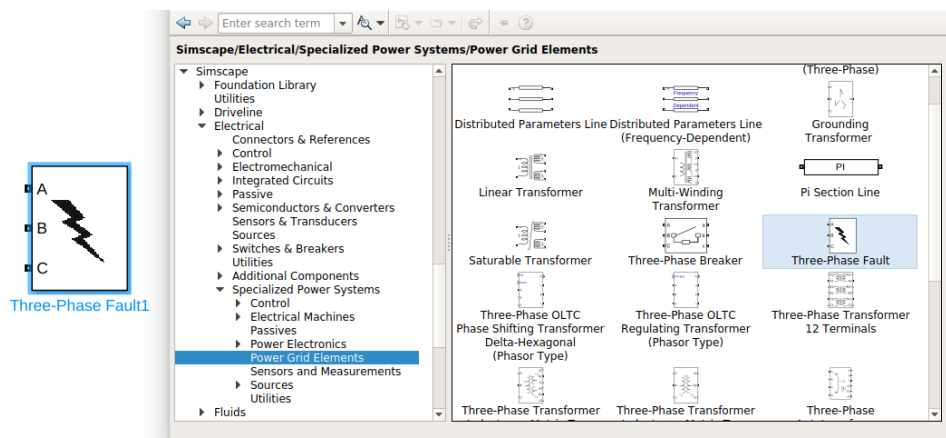


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.8 Gerador de falta trifásica

O bloco de geração de falta trifásica simula um curto-circuito no local onde foi inserido. Este bloco pode ser encontrado na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Grid Elements*, conforme Figura 28.

Figura 28 – Bloco gerador de falta.

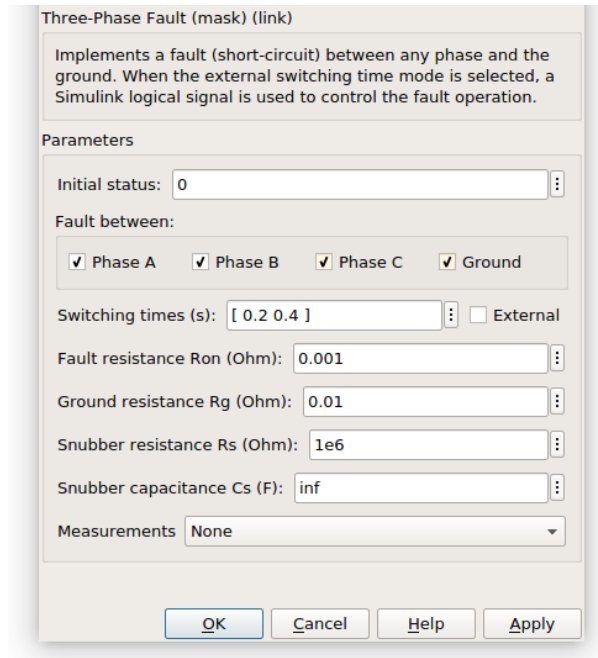


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Em seus parâmetros, o usuário pode definir quais fases sofrerão o curto, se são entre as fases ou entre fase e terra, apenas selecionando os *checkboxes*, além de definir o momento de início e fim do curto ou se estes tempos serão controlados externamente. Também podem ser

definidas as resistências da falta e terra, além da resistência e capacitância *snubber*, conforme Figura 29.

Figura 29 – Parâmetros do bloco gerador de falta.

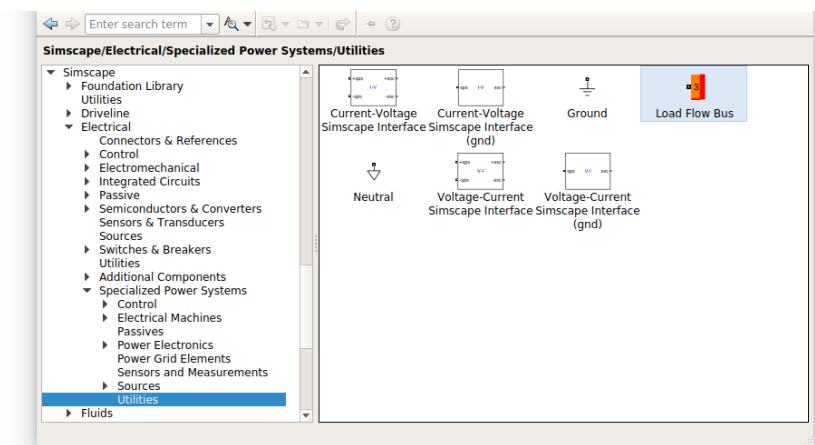


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.9 Load flow bus

O bloco de *Load Flow Bus* é utilizado para que se faça um estudo de fluxo de potência na simulação. Este bloco pode ser encontrado na seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Measurements*, conforme Figura 30.

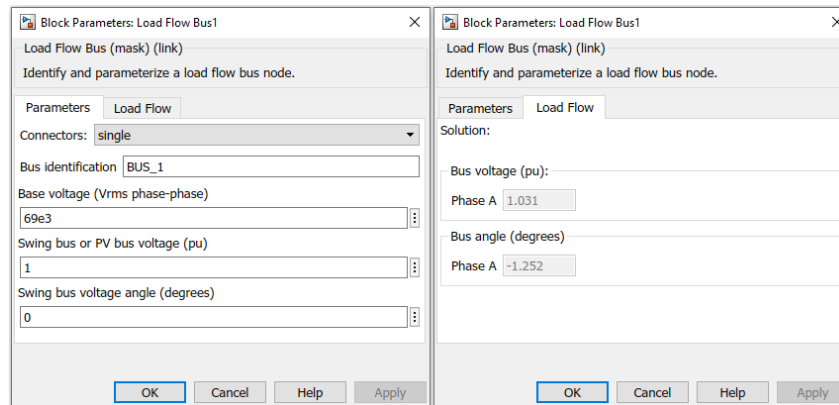
Figura 30 – Bloco *load flow bus*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Este bloco necessita de poucos parâmetros, sendo apenas um nome único e tensão nominal de onde ele estará conectado. Este bloco deve ser utilizado em conjunto com o bloco *powergui*, onde por meio do bloco *powergui* é possível fazer a análise do fluxo de potência.

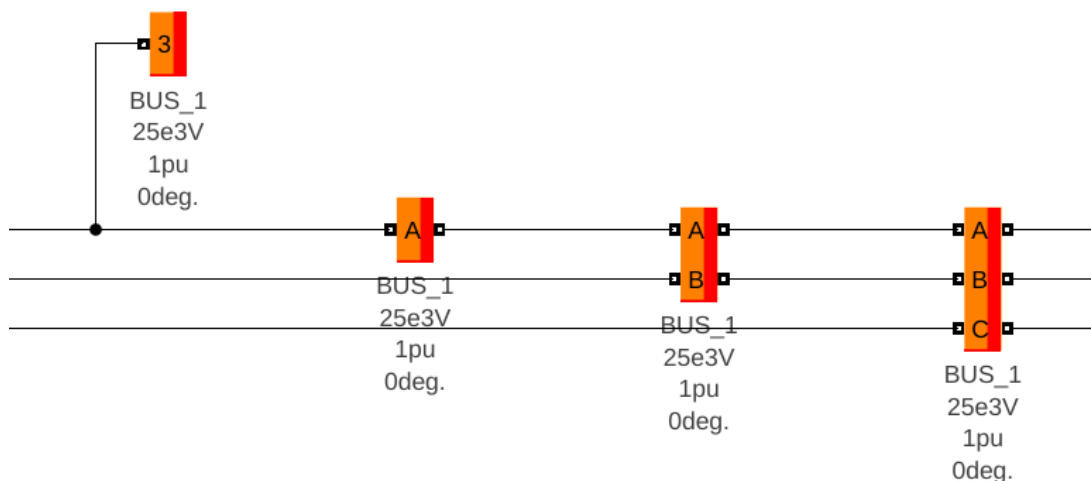
Figura 31 – Parâmetros do bloco *load flow bus*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O bloco pode ser utilizado de forma simples em modelos sem desbalanceamento de carga monofásica, onde deve ser especificado de qual fase será feita a leitura, bifásica e trifásica, sendo que os modos monofásico, bifásico e trifásico podem ser alterados para terem, apenas conexões de entrada, ou conexões de entrada e saída, conforme Figura 32.

Figura 32 – Tipos de bloco do *load flow bus*.



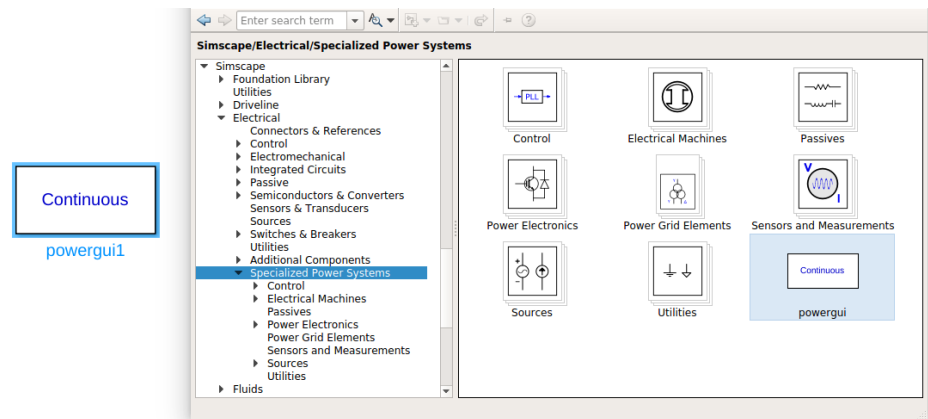
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.10 Powergui

O bloco *powergui* é um bloco utilizado para configuração da simulação além de adequação de parâmetros de outros blocos que fazem parte da simulação. Este bloco pode ser encontrado na

seção do *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems* conforme Figura 33.

Figura 33 – Bloco *Powergui*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A primeira configuração a ser definida pelo usuário é o método de simulação, sendo ele contínuo, discreto, fasorial ou fasorial discreto.

A simulação no modo contínuo utiliza o sistema de passo variável do *Simulink*, sendo assim, é possível obter maior precisão com este método, porém, em sistemas mais complexos, não é recomendado a utilização deste método pois a simulação pode se tornar extremamente lenta.

A simulação no modo discreto possibilita o usuário a configurar o tempo de amostragem da simulação. Desta forma o usuário pode decidir por uma simulação com os passos menores, o que a torna mais precisa, porém mais lenta, ou por uma simulação com passos maiores o que pode acabar diminuindo a precisão da simulação ou até mesmo não detectando fenômenos que ocorrem entre os passos, porém tornando a simulação mais rápida. Este é o modo utilizado para as simulações dos exemplos deste trabalho.

A simulação no modo fasorial funciona como o sistema contínuo, com passo variável, porém, necessita a configuração da frequência do sistema. É normalmente utilizada para estudos de oscilações eletromecânicas de grandes geradores e motores. Alguns dos blocos do *Simscape* são especificamente para este modo de simulação, os quais sempre tem um adendo ao nome do bloco com "(Phasor)" ou "(Phasor Type)". O modo fasorial discreto segue o mesmo conceito do fasorial, porém o usuário pode configurar o tempo de amostragem.

O *powergui* também conta com ferramentas como o *Load Flow Analyzer*, visto na Figura 34, que junto com o bloco *Load Flow Bus* pode ser utilizado para fazer a análise de fluxo de potência na simulação.

Figura 34 – Powergui Load Flow Tool

Block type	Bus type	Bus ID	Vbase (kV)	Vref (pu)	Vangle (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Qmin (Mvar)	Qmax (Mvar)	V_LF (pu)	Vangle_LF (deg)	P_LF (MW)	Q_LF (Mvar)	Block Name	
1	Ysrc	existing	BUS_1	69.00	1	0.00	0.01	0.00	-Inf	Inf	1	0.00	0.56	69kV - Arcos	
2	Bus	-	BUS_2	69.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9985	-0.34	0.00	0.00	Load Flow Bus1	
3	Bus	-	BUS_3	13.80	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9916	-1.69	0.00	0.00	Load Flow Bus2	
4	Bus	-	BUS_4	13.80	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9916	-1.69	0.00	0.00	Load Flow Bus3	
5	RLC load 2	-	BUS_PMA3	13.80	1	0.00	0.43	0.07	-Inf	Inf	0.9780	-2.88	0.41	Carga PMA 03	
6	RLC load 2	-	BUS_PMA4	13.80	1	0.00	0.59	0.23	-Inf	Inf	0.9873	-1.91	0.57	0.23	Carga PMA 04
7	RLC load 2	-	BUS_PMA5	13.80	1	0.00	0.62	0.09	-Inf	Inf	0.9939	-2.35	0.60	0.09	Carga PMA 05
8	RLC load 2	-	BUS_PMA6	13.80	1	0.00	1.10	0.16	-Inf	Inf	0.9666	-3.92	1.03	0.15	Carga PMA 06
9	RLC load 2	-	BUS_PMA7	13.80	1	0.00	1.19	0.36	-Inf	Inf	0.8760	-7.83	0.91	0.28	Carga PMA 07
10	Bus	-	*1*	69.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	LT Arcos - Formiga	
11	Bus	-	*2*	13.80	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9915	-1.69	0.00	0.00	Distribuição PMA 07	
12	Bus	-	*3*	13.80	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9915	-1.69	0.00	0.00	Distribuição PMA 03	
13	Bus	-	*4*	13.80	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9915	-1.69	0.00	0.00	Distribuição PMA 04	
14	Bus	-	*5*	13.80	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9915	-1.69	0.00	0.00	Distribuição PMA 05	
15	Bus	-	*6*	13.80	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9915	-1.69	0.00	0.00	Distribuição PMA 06	
16	Bus	-	*7*	69.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9985	-0.34	0.00	0.00	Trafo 01 11,5MVA - 69//13,8kV	
17	Bus	-	*8*	69.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9985	-0.34	0.00	0.00	Trafo 01 11,5MVA - 69//13,8kV	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Outra ferramenta interessante é a *Power Line Parameters*, Figura 35, no qual é possível passar algumas informações sobre a linha de transmissão e a ferramenta calcula todas variáveis necessárias para a simulação, porém, é necessário utilizar um bloco de linha de transmissão, como por exemplo, o bloco de linha de transmissão modelo pi.

Figura 35 – Powergui Power Line Parameters

Example of a 735 kV three-phase line
 Three bundles of 4 Berstorf ACSR 1355 MCM conductors
 Two 1/2 inch diameter steel grounds wires
 Ytower = Ymin = average heights of conductors

General Parameters
 Units: metric
 Ground Resistivity (ohm.m): 100
 Nominal Frequency (Hz): 60

Frequency-Dependent Line Parameters
 Frequency Range Logspace (Hz): [-2.5, 141]
 Line Length (km): 100

Line Geometry
 Phase conductors (bundles): 3

Label	Phase Number	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Conductor type	
1	p1	1	-12.8016	20.7265	20.7265	1
2	p2	2	0	20.7265	20.7265	1
3	p3	3	12.8016	20.7265	20.7265	1

 Ground conductors (bundles): 2

Label	Phase	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Conductor type	
1	g1	0	-8.9916	32.9185	32.9185	2
2	g2	0	8.9916	32.9185	32.9185	2

Conductors
 Conductor types: 2
 include conductor skin effect
 Internal conductor inductance evaluated from: T/D ratio

D out (cm)	T/D ratio	unused	DC res (Ohms/km)	unused	Nb_cond	Db (cm)	Angle (deg.)	
1	3.556	.375	1.4293	0.043051	1	4	64.6582	45
2	1.27	.5	0.49454	3.1069	1	1	0	0

Computed Parameters
 1. Frequency-dependent line parameters are saved in DATA.WB structure. Select a block in your model and click the 'Send Frequency-dependent parameters to block' button.
 2. RLC matrices, at 60Hz:
 $R_matrix (ohm/km) =$
 0.10710 0.09729 0.09499
 0.09729 0.11050 0.09729
 0.09499 0.09729 0.10710
 $L_matrix (H/km) =$
 0.00158 0.00075 0.00062
 0.00075 0.00157 0.00075
 0.00062 0.00075 0.00158
 $C_matrix (F/km) =$
 1.16613e-08 -2.12683e-09 -5.83623e-10
 -2.12683e-09 1.21174e-08 -2.12683e-09
 -5.83623e-10 -2.12683e-09 1.16613e-08
 Block: - No block specified

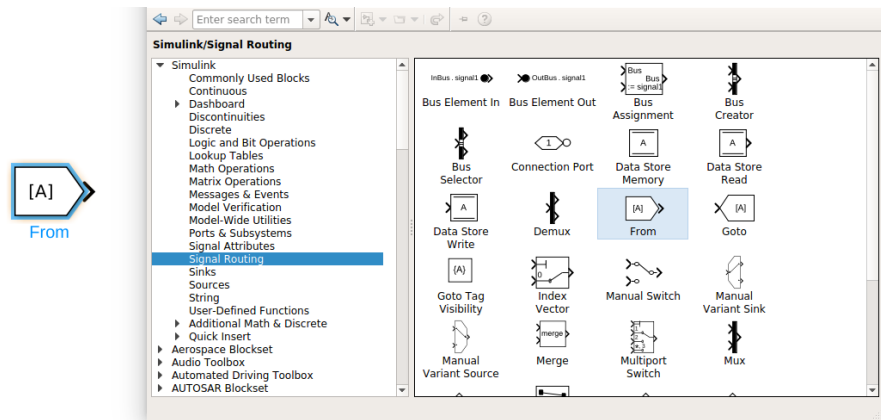
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.11 From

Diferente dos outros blocos acima citados, este bloco não pertence ao *toolbox* do *Simscape*, e sim, ao *Simulink*. Ele pode ser encontrado em *Simulink/Signal Routing*. Ele é utilizado para transmissão de dados entre blocos sem que haja a conexão direta entre esses blocos.

Este bloco precisa de apenas um parâmetro que é o nome da variável do qual ele receberá os dados. Ao selecionar a variável, deve-se conectar o bloco *From* a outro bloco que faça a

Figura 36 – Bloco *From*

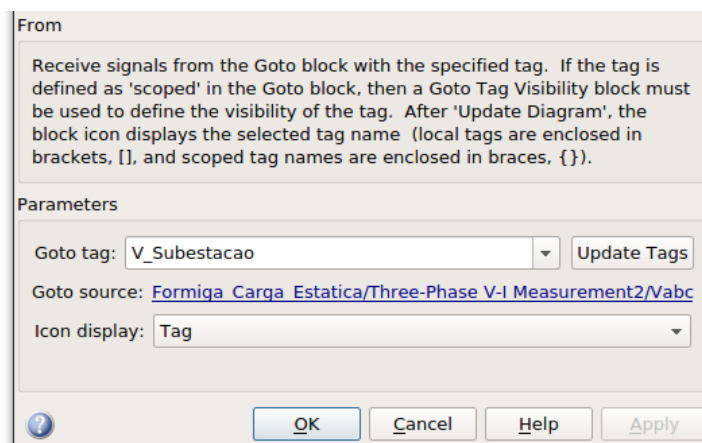


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

utilização destes dados já que o mesmo é apenas um transmissor e não executa qualquer outra operação.

O bloco possui um sistema de auto-completar, sendo assim, conforme o usuário inicia a digitação do nome da *label*, será mostrado uma tabela com todos os nomes parecidos a entrada feita pelo usuário. Caso o bloco não encontre o nome da *label*, o usuário deve atualizar a lista de *labels* clicando no botão *update*.

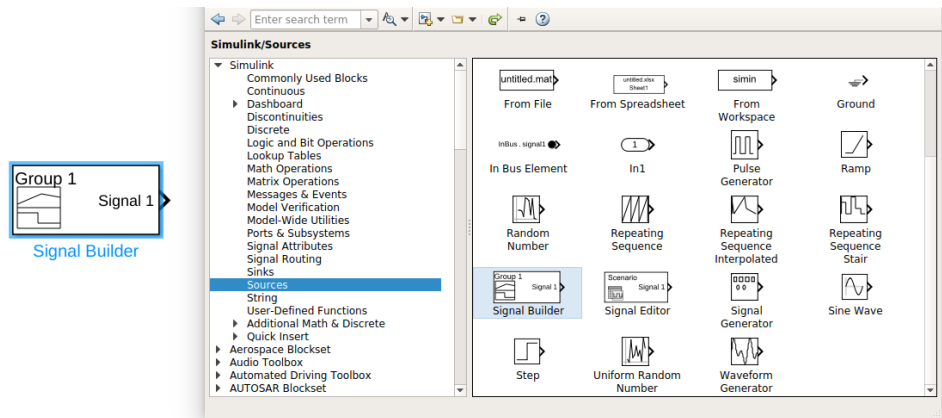
Figura 37 – Parâmetros do bloco *From*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

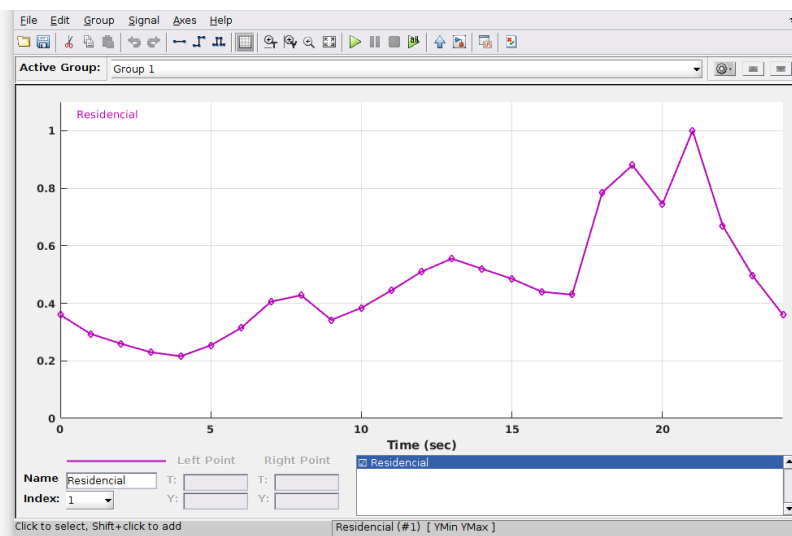
3.6.12 *Signal Builder*

Este bloco pertence aos blocos básicos do *Simulink* e pode ser encontrado em *Simulink/Sources*, conforme Figura 38.

Figura 38 – Bloco *Signal Builder*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O bloco *Signal Builder* é utilizado para gerar ondas arbitrárias definidas pelo usuário. Este bloco pode gerar sinais padrões como um pulso, degrau, dente de serra, quadrada e senoidal, porém, o usuário pode ajustar a onda para a forma que for desejada, conforme Figura 39.

Figura 39 – Parâmetros *Signal Builder*.

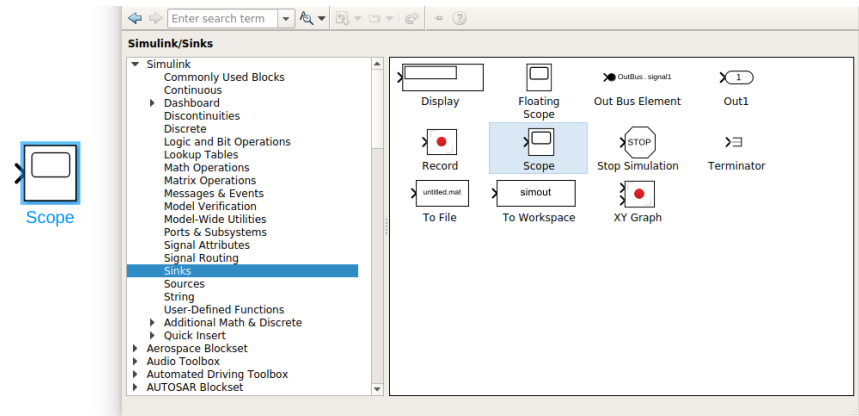
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Outro bloco que também tem esta mesma capacidade de geração de sinais arbitrários é o *Signal Editor*, entretanto, é mais complexo, exigindo maiores configurações, criação de cenários e para os modelos de sinais gerados devem ser salvos antes da sua utilização. Para este trabalho, apenas o *Signal Builder* será utilizado por sua simplicidade e facilidade de configuração.

3.6.13 Scope

Assim como o bloco *From*, o bloco *Scope* pertence ao *Simulink* e pode ser encontrado em *Simulink/Sinks*, conforme Figura 40.

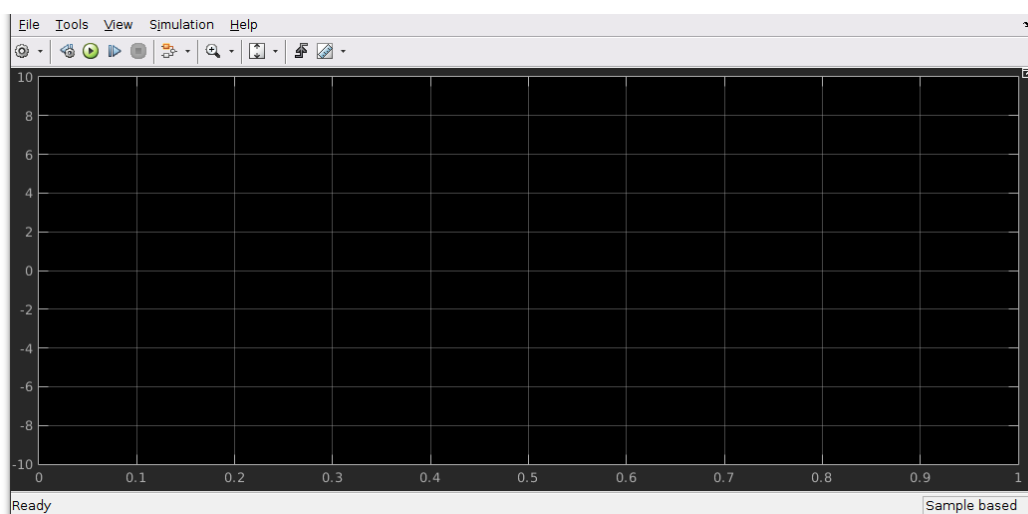
Figura 40 – Bloco *Scope*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O bloco *Scope* deve receber uma entrada de um bloco *Simulink* para seu funcionamento, como por exemplo, o bloco *From*. Conectando um bloco *From* no bloco *Scope*, as informações contidas no bloco *From* serão plotadas no *Scope* gerando um gráfico que pode ser analisado. O bloco *Scope* pode receber mais de uma entrada de uma vez para análise de múltiplos gráficos simultaneamente. Na tela do *Scope*, Figura 41, o usuário tem acesso a várias ferramentas contidas na barra superior de ferramentas para fazer análise do sinal.

Figura 41 – Tela do *Scope*

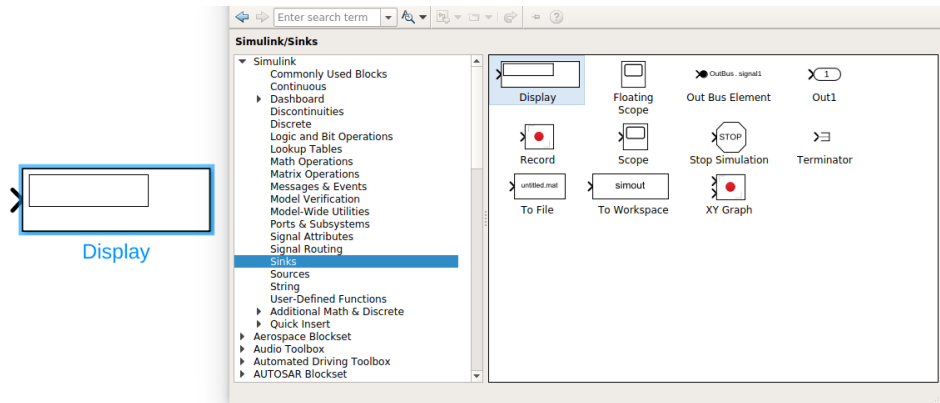


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.14 Display

O bloco *Display* é utilizado para mostrar valores diretamente na tela do editor *Simulink*. Este bloco pode ser encontrado em *Simulink/Sinks*, conforme Figura 42.

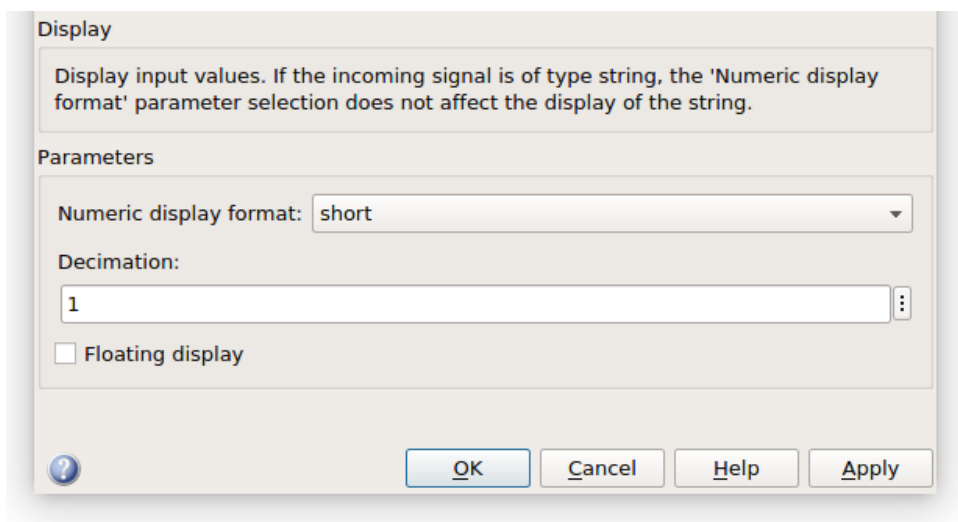
Figura 42 – Bloco *Display*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Este bloco contém poucas configurações, conforme mostra a Figura 43, sendo elas o formato de valor que será apresentado, se este bloco é flutuante ou não, e a dizimação, valor este que informa após quantos ciclos de amostragens da simulação o valor deve ser atualizado. O valor padrão é 1, sendo assim, o *Display* atualizará seu valor a cada ciclo amostragem da simulação.

Figura 43 – Parâmetros do bloco *Display*

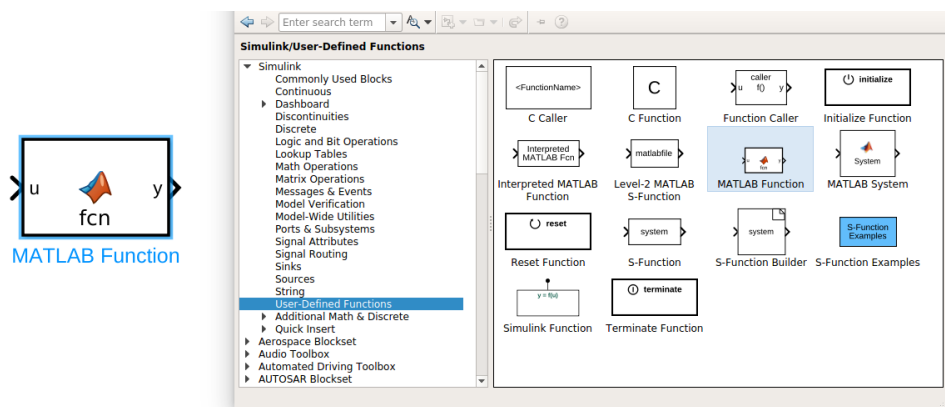


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.15 Bloco de função do MATLAB

O bloco de função do MATLAB é utilizado para quando a implementação de uma função, ou modelagem de um dispositivo possa ser muito complexa utilizando apenas os blocos do *Simulink*. Sendo assim, o leitor pode fazer a programação desse bloco para se comportar da forma que desejar. Este bloco pode ser muito útil nestes casos, porém, requer que o leitor tenha um maior conhecimento em programação MATLAB. Este bloco pode ser encontrado em *Simulink/User-Defined Functions*, conforme Figura 44.

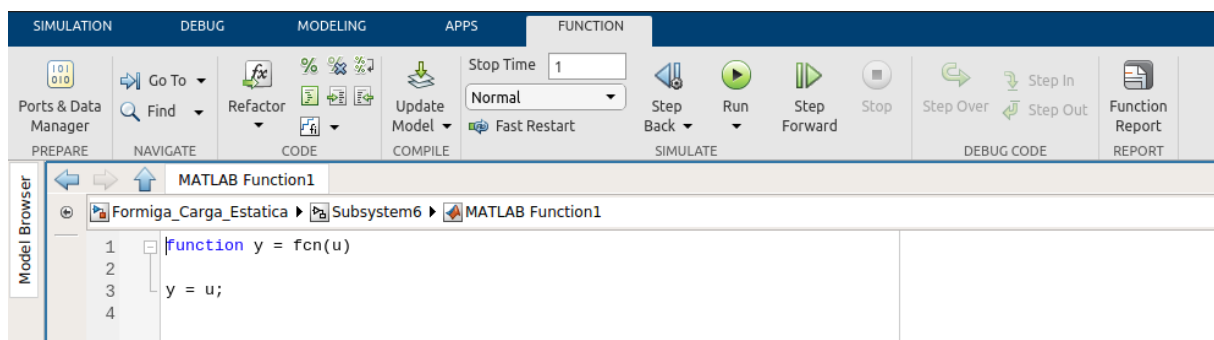
Figura 44 – Bloco de função MATLAB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Este bloco não possui parâmetros, ao invés disso, ao dar dois cliques sobre este bloco, o leitor abrirá o editor de código pertencente a este bloco, conforme Figura 45.

Figura 45 – Editor do bloco de função MATLAB



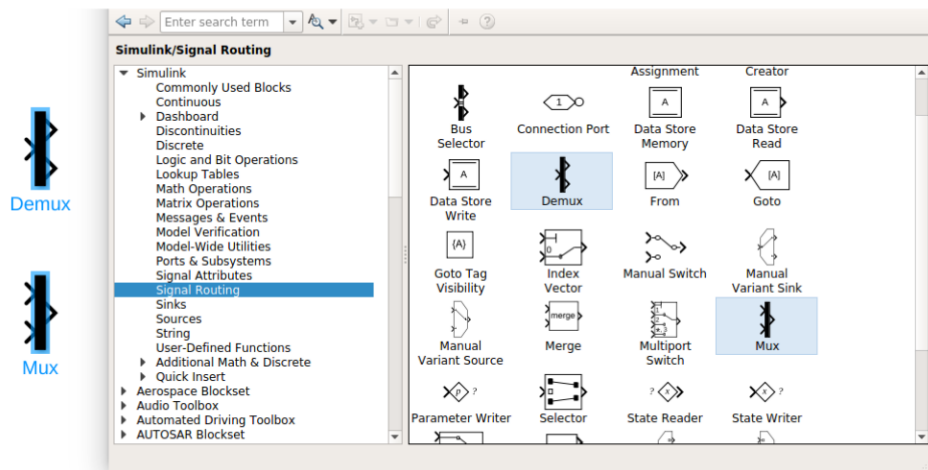
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O bloco já inicia com um código simples, com uma variável de entrada nomeada de 'u' e uma variável de saída chamada de 'y'. O acréscimo de novas variáveis de entrada ou saída, será refletido na quantidade de entradas e saídas do bloco.

3.6.16 Bloco Mux e Demux

Os blocos Mux e Demux são utilizados para juntar ou separar sinais. Enquanto o bloco Mux junta sinais formando um vetor, o bloco Demux separa esse vetor de sinais em sinais escalares. Este bloco pode ser encontrado em *Simulink/Signal Routing*, conforme Figura 46.

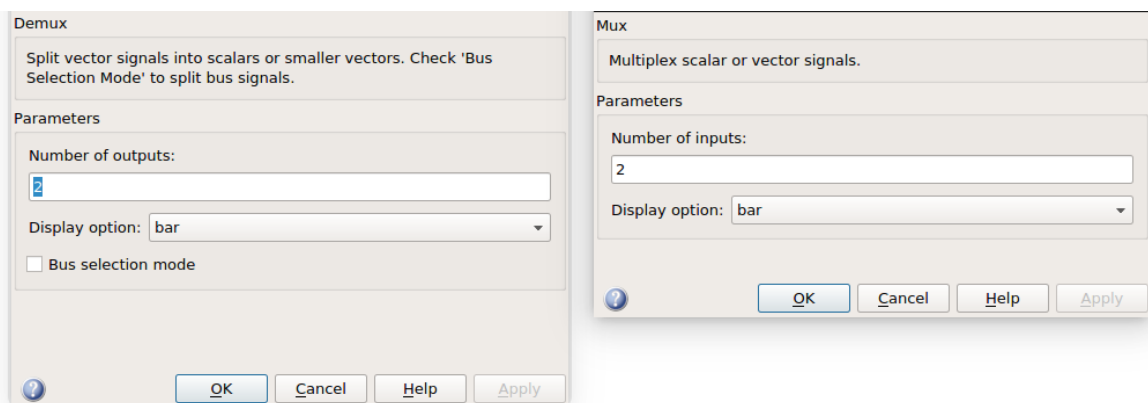
Figura 46 – Blocos Mux e Demux



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ambos os blocos tem configurações simples, como mostra a Figura 47, sendo apenas possível configurar a quantidade de entradas para o bloco Mux e a quantidade de saídas para o Demux, assim como o formato de exibição, sendo que no modo barra, os blocos apenas aparecem na cor preta e no modo normal, apresentam o nome dentro do bloco.

Figura 47 – Parâmetros Mux e Demux

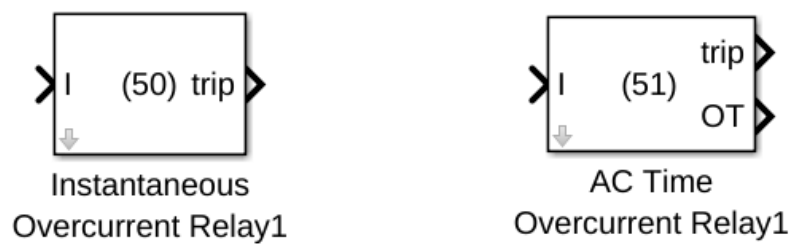


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.17 Relé 50/51

Os blocos de relé 50 e relé 51, apresentados na Figura 48, não fazem parte da biblioteca padrão do *Simulink/Simscape*, porém, fazem parte da comunidade da *MathWorks* onde podem ser baixados gratuitamente. Estes blocos foram criados pelo Prof. Dr. Rodney H. G. Tan, da Universidade UCSI da Malásia.

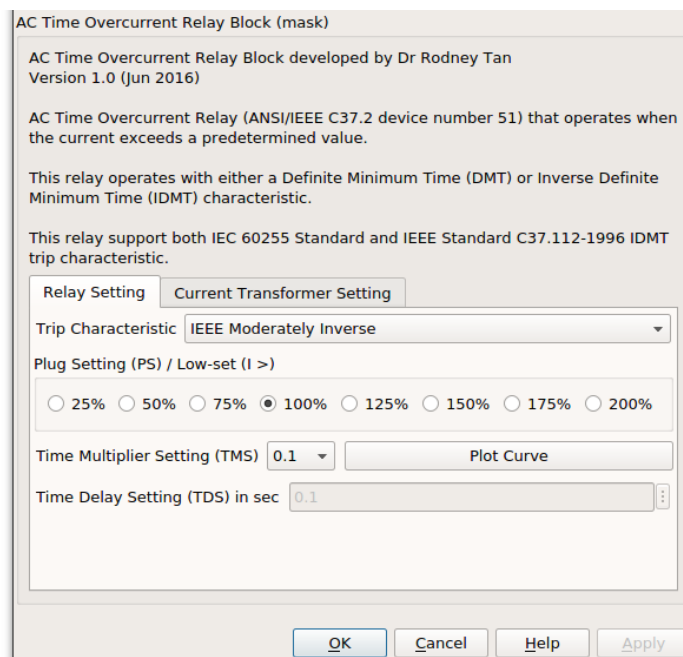
Figura 48 – Blocos dos relés 50 e 51.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ambos são blocos do tipo máscara, onde suas configurações podem ser editadas de forma prática através de uma tela de parâmetros, conforme Figura 49.

Figura 49 – Parâmetros do relé 51.

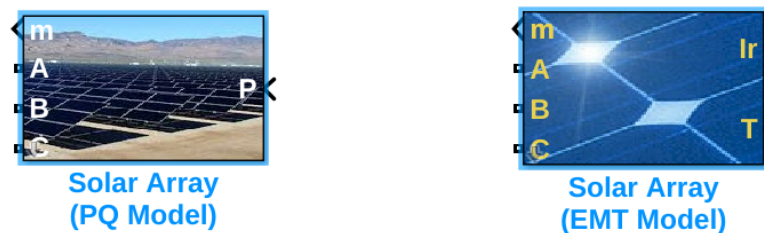


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.6.18 Gerador fotovoltaico

Os blocos de geração fotovoltaica, apresentados na Figura 50, utilizados nesse trabalho, assim como os relés, não fazem parte da biblioteca padrão porém podem ser baixados gratuitamente na comunidade da *MathWorks*. Estes blocos foram criados por Jonathan LeSage, engenheiro sênior de aplicações em energia e automação da *MathWorks*.

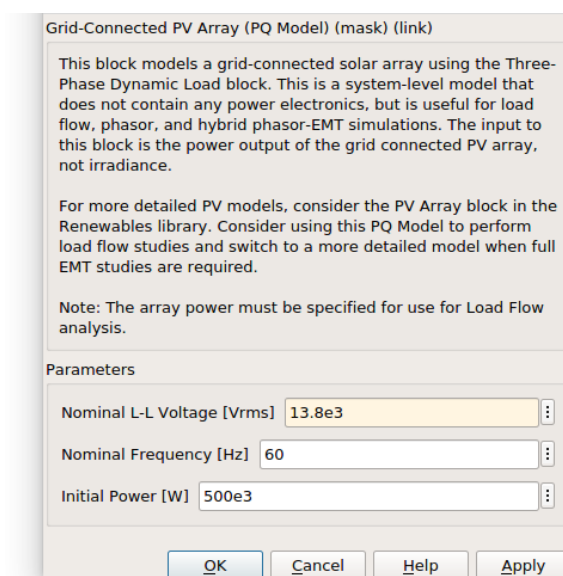
Figura 50 – Blocos de geração fotovoltaica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O bloco *Solar Array (PQ Model)* é uma simplificação do sistema de geração fotovoltaica, contendo apenas tensão nominal, frequência e potência como suas configurações, conforme Figura 51, e uma entrada para a curva de potência. A curva de potência deve ser inserida para o correto funcionamento do bloco, sendo que a potência inserida nas configurações será utilizada apenas para cálculos de fluxo de potência.

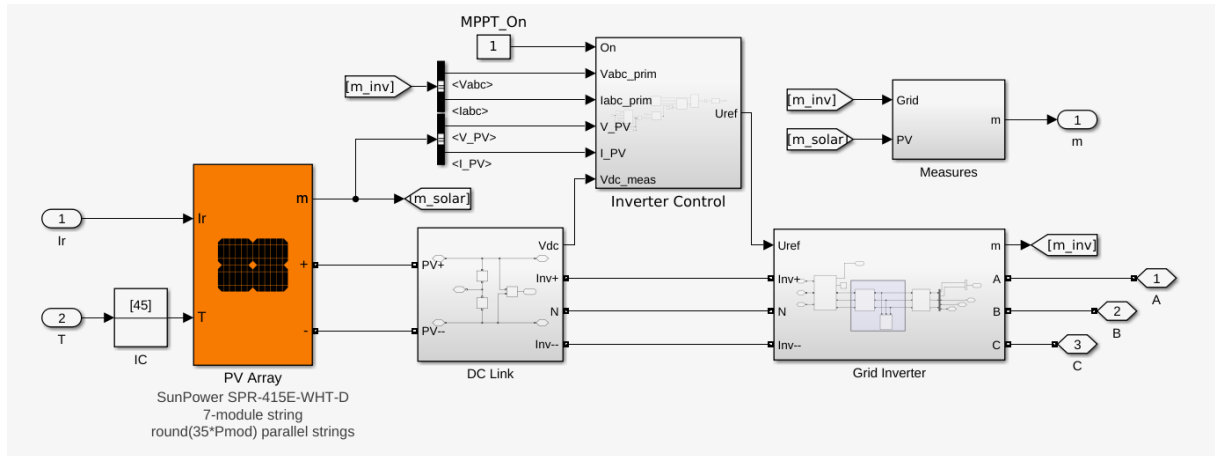
Figura 51 – Parâmetros do bloco *Solar Array (PQ Model)*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Já o modelo *Solar Array (EMT Model)*, ou transiente eletromagnético, é um bloco complexo contando com um inversor de frequência, conforme Figura 52, sendo assim este bloco injeta harmônicos na rede, diferente do bloco PQ.

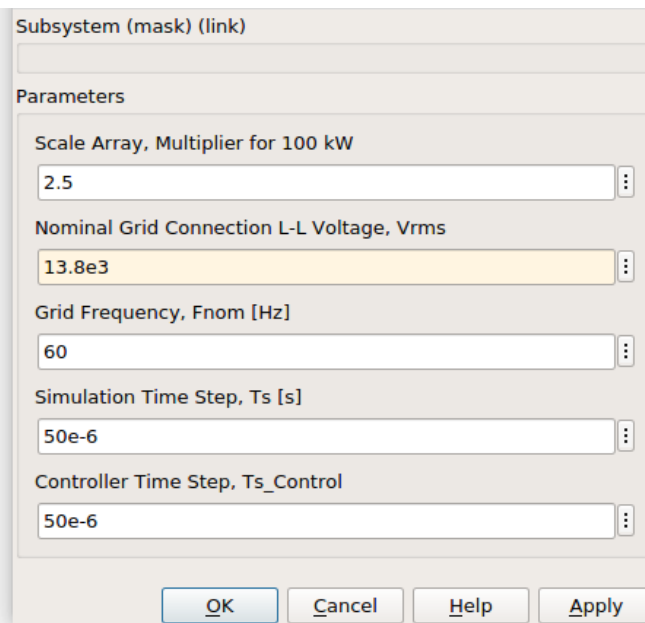
Figura 52 – Interior da máscara do bloco *Solar Array (EMT Model)*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Este bloco requer a configuração de tensão nominal, frequência nominal, a potência em múltiplos de 100 kW e os tempos de *Simulation Time Step* e *Controller time step*, demonstrados na Figura 53.

Figura 53 – Parâmetros do bloco *Solar Array (EMT Model)*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4 METODOLOGIA

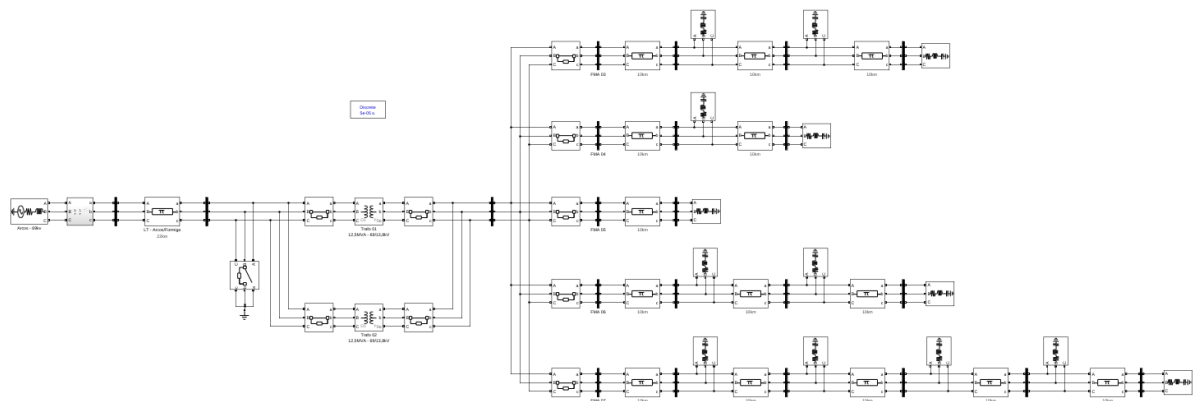
4.1 Construção do sistema de distribuição

Baseando-se no diagrama unifilar da SE de Formiga, duas bases do sistema de distribuição serão desenvolvidos. Uma delas contando com cargas estáticas, e outra com cargas variáveis.

4.1.1 Rede de distribuição com carga estática

A rede de distribuição com carga estática, Figura 54, poderá ser utilizada para fazer análises sobre pontos específicos já que a tensão, corrente e potência se mantém a mesma durante toda a simulação, além de se poder utilizar as ferramentas de estudo de fluxo de potência que fazem parte do *Simscape*. As instruções de como montar este sistema passo a passo pode ser encontradas no Anexo A.

Figura 54 – Rede de distribuição da cidade de Formiga com carga estática

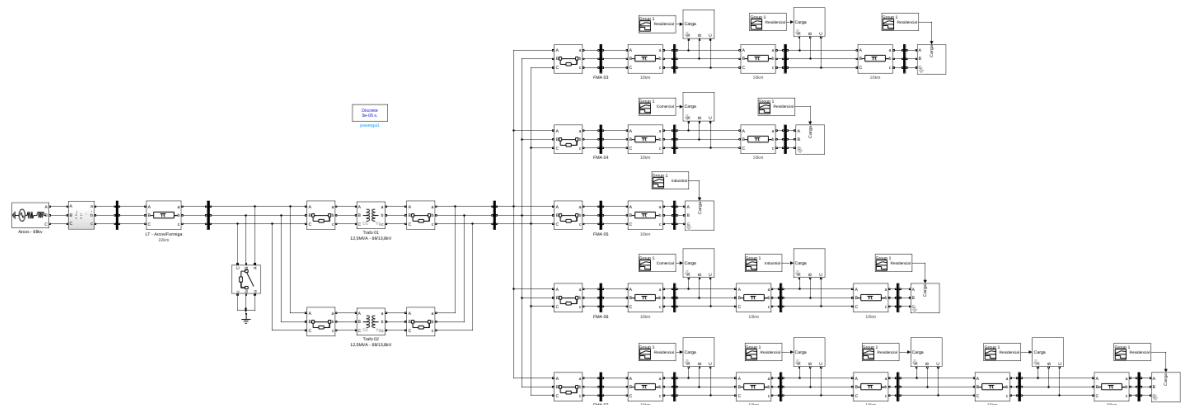


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.1.2 Rede de distribuição com carga variável

A rede de distribuição com carga variável, Figura 55, poderá ser utilizada para simulações mais próximas ao que se espera encontrar no dia a dia, sendo que as curvas de carga alteram totalmente o comportamento da rede a cada instante. Este modelo é simulado por 24 segundos para representar as 24 horas do dia, de modo que, a cada segundo um valor de potência diferente é solicitado com base na curva de carga, sendo ela residencial, comercial ou industrial. As instruções de como montar este sistema, passo a passo, podem ser encontradas no Anexo A.

Figura 55 – Rede de distribuição da cidade de Formiga com carga variável



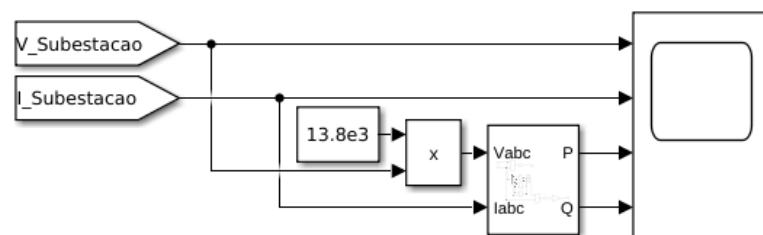
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.2 Exemplo 01 - Sistema em funcionamento normal

O primeiro exemplo tem como objetivo demonstrar o funcionamento normal do sistema de distribuição da cidade de Formiga. Neste exemplo, serão utilizados tanto o sistema com carga estática, como o sistema com carga variável. No sistema com carga estática, um bloco *Scope* com quatro entradas foi utilizado para a tomada das grandezas, sendo elas tensão trifásica, corrente trifásica, potência ativa e potência reativa, conforme Figura 56. Como a tensão é medida em PU, é necessário a multiplicação pela tensão nominal para que seja feito o cálculo de potências de forma correta. Esta simulação foi configurada para durar apenas 1 segundo, já que este tempo é suficiente para entrar em regime permanente.

O bloco *From* foi utilizado para indicar de qual ponto seriam tomadas as grandezas, neste caso foram medidos a tensão e corrente da subestação, de cada um dos alimentadores e também da subestação de Arcos, onde a tensão é de 69 kV.

Figura 56 – *Scope* para tomada das grandezas com carga estática.

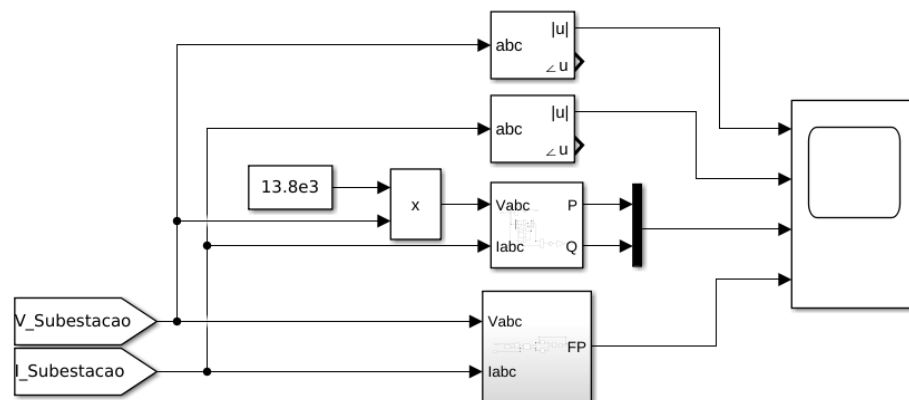


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Já para o sistema com carga variável, o *Scope* foi alterado, plotando a potência ativa e reativa juntas e inserindo o fator de potência como a quarta grandeza, conforme Figura 57. Também foi conectado um analisador de sequência na tensão e na corrente para se obter os valores do módulo dessas grandezas durante a simulação. A simulação com carga variável foi configurada para 24 segundos para simular as 24 horas do dia.

Assim como na simulação com carga estática, foram medidos as grandezas em todos os pontos de interesse, sendo estes a SE de Formiga, a SE de Arcos, a linha de transmissão e todos os cinco alimentadores.

Figura 57 – *Scope* para tomada das grandezas com carga variável.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

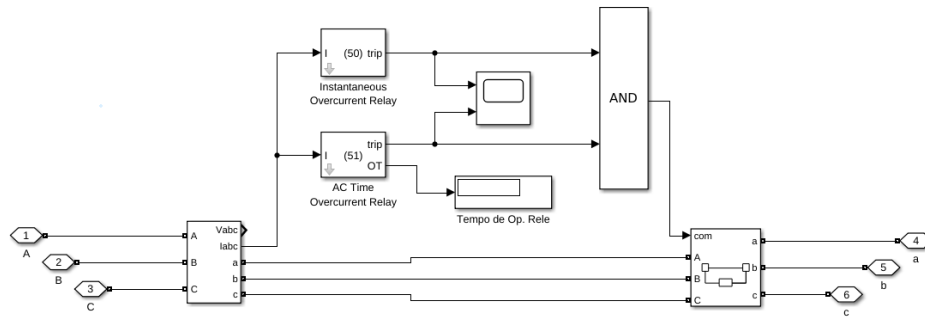
4.3 Exemplo 02 - Relés de proteção 50/51

Neste exemplo, será tratado como os relés 50 e 51 funcionam em dois testes, sendo um o aumento da corrente devido uma demanda maior de carga fazendo com que o relé 51 acione, e um teste com o fechamento da chave de aterramento para causar uma falta fase-terra para acionar o relé 50. Para executar esses testes, o bloco de chave conectado a fonte da SE de Arcos, foi trocado por um subsistema contendo os relés 50 e 51 conectados a um disjuntor, conforme Figura 58.

Neste subsistema, o bloco medidor faz a leitura da corrente e este valor é enviado para os relés. Caso um dos relés seja acionado seu sinal padrão com valor 1 é trocado para 0 e, ao ser enviado para a porta "AND", esta será desequilibrada, já que os sinais agora são diferentes, acionando assim o disjuntor.

Para criar o teste de sobrecorrente temporizada, o relé 51 foi subdimensionado para atuar com uma corrente abaixo da nominal. Nos alimentadores FMA05 e FMA07, as chaves fca foram

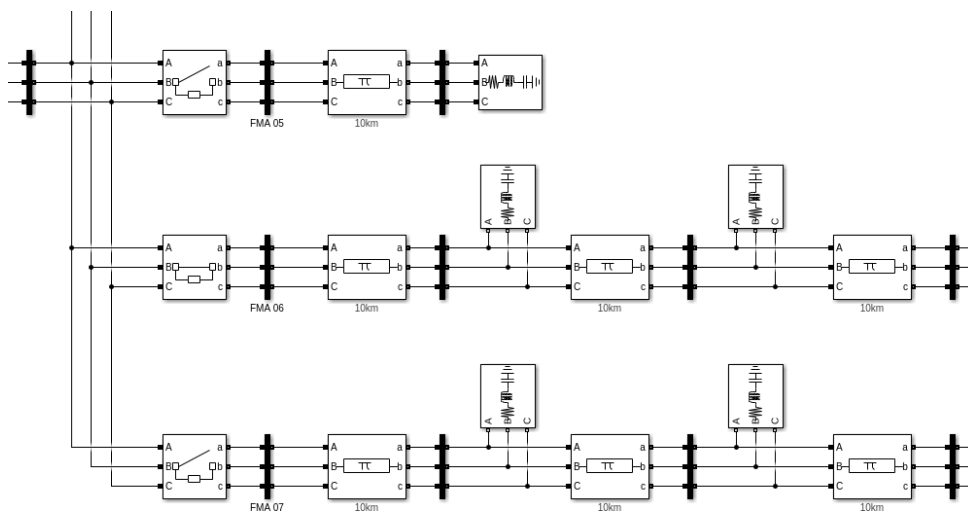
Figura 58 – Subsistema contendo relés 50/51.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

configuradas para normalmente abertas, Figura 59, e com seu fechamento em 0.1 segundos, causando assim um subitico aumento na corrente.

Figura 59 – FMA05 e FMA07 com chave faca normalmente aberta.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

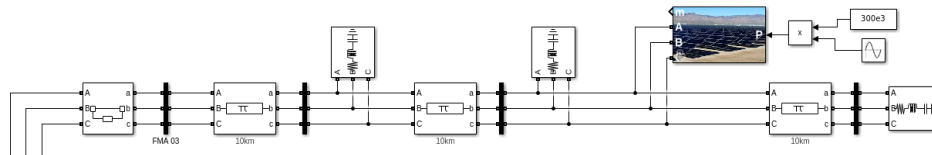
O relé 51 foi configurado com corrente de *pickup* de 60 A, sendo em funcionamento sem os dois alimentadores a corrente é de 50 A, e com o fechamento das chaves faca essa corrente vai para 120 A.

Um segundo teste foi feito para demonstrar o relé 50, ou relé instantâneo. Para acionar este relé a chave de aterramento da SE de Formiga foi configurada para fechar após 0.1 segundos, criando assim uma falta fase-terra elevando a corrente e disparando o relé 50.

4.4 Exemplo 03 - Geração distribuída

Este exemplo, tem como finalidade demonstrar os efeitos causados pela inserção de uma Geração Distribuída, ou GD, no sistema de distribuição. Para isto, os blocos de geração fotovoltaica foram conectadas após a segunda carga do alimentador FMA 03. Cada um dos blocos foi utilizado para um tipo de simulação. O bloco *Solar Array* modelado PQ, Figura 60, foi utilizado para uma simulação mais simples, apenas para verificar a injeção de potência no alimentador utilizando a mesma estrutura de *Scope* da Figura 57. Por simular um gerador fotovoltaico ideal, quase não há injeção de harmônicos na rede por não possuir um inversor de frequência.

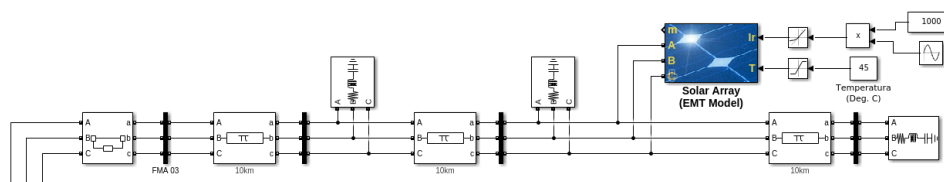
Figura 60 – Bloco GD tipo PQ no alimentador FMA 03.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O segundo teste foi feito utilizando o modelo EMT, que possui um inversor de frequência, conforme Figura 61. Utilizando um bloco *Scope*, que faz a leitura apenas da tensão do barramento onde está conectada a GD, é possível calcular os harmônicos através do ferramenta *FFT Analysis* encontrado no bloco *powergui*.

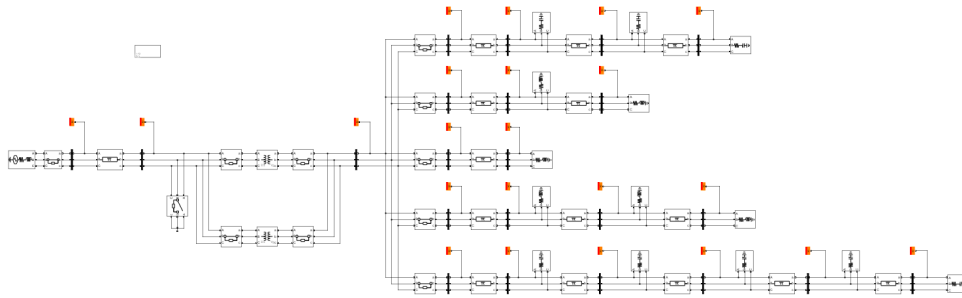
Figura 61 – Bloco GD tipo EMT no alimentador FMA 03.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.5 Exemplo 04 - Fluxo de potência

Neste exemplo o usuário verá a função de cálculo de fluxo de potência do *Simscape* e como a potência flui no sistema quando o sistema está em seu estado normal e quando uma GD injeta potência acima do que a carga no alimentador consome. Utilizando a base de carga estática, foram incluídos blocos *Load flow bus* em cada barramento, Figura 62, para calcular o fluxo de potência que percorre o sistema de distribuição.

Figura 62 – Blocos *Load flow bus* inseridos no sistema.

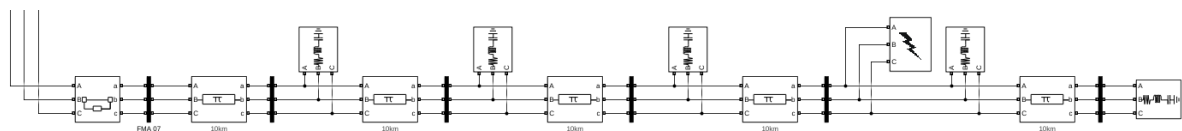
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Como segundo teste, uma GD será inserida no alimentador FMA 06, porém, com potência superior a consumida pelas cargas para observação do fluxo reverso de potência. Para isto, será utilizado a ferramenta *Load Flow Analysis* para realizar estes cálculos.

4.6 Exemplo 05 - Falta no sistema

O propósito no quinto exemplo é o estudo dos efeitos causados por faltas no sistema de distribuição. Um bloco de geração de faltas foi inserido no alimentador FMA 07, conforme Figura 63, para simular uma falta na área rural.

Figura 63 – Blocos de falta inserido no alimentador FMA 07.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Como primeiro teste, o bloco de geração de falta trifásica simulará um curto-circuito entre as fases A e B durante os instantes 0.05 e 0.25 segundos. A simulação terá o tempo total de 0.3 segundos e o *powergui* foi configurado para ter uma resolução maior, passando o tempo de amostragem de $50 \mu s$ para $10 \mu s$.

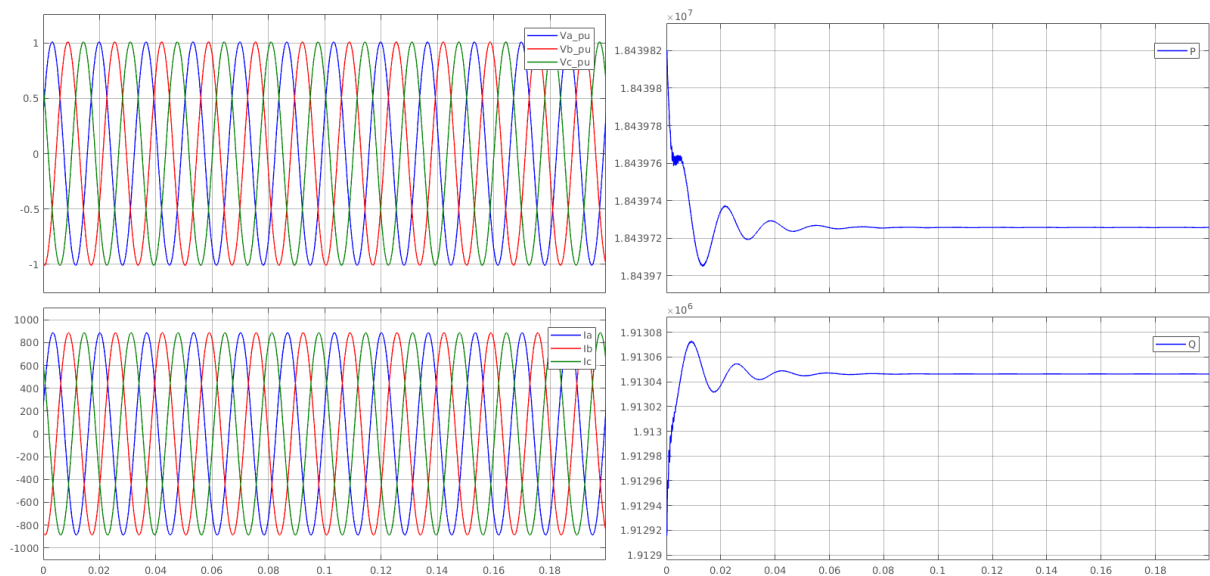
Para o segundo teste, o mesmo bloco simulará um curto entre a fase C e o terra durante os mesmos instantes de tempo do primeiro teste.

5 RESULTADOS

5.1 Exemplo 01 - Sistema em funcionamento normal

A simulação do primeiro exemplo demonstra o comportamento do sistema em funcionamento normal. Como no primeiro teste foram utilizadas cargas estáticas, após 0,1 segundos o sistema entra em regime permanente, como é possível observar na Figura 64

Figura 64 – Curvas de tensão, corrente e potências com carga estática.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os resultados obtidos pelos medidores foram divididos em duas tabelas. A Tabela 6 apresenta os valores obtidos nos alimentadores e subestação com tensão nominal de 13,8 kV.

Tabela 6 – Valores obtidos nos alimentadores e subestação.

Alimentador	Tensão (pu)	Corrente (A)	P. Ativa	P. Reativa	FP
FMA 03	1,048	153,8	3,305 MW	-467,8 KVAR	0,9901
FMA 04	1,048	105,7	2,249 MW	451,5 KVAR	0,9804
FMA 05	1,048	262,0	5,501 MW	1,436 MVAR	0,9676
FMA 06	1,048	139,2	2,938 MW	709,1 KVAR	0,9791
FMA 07	1,048	242,7	5,266 MW	-103,6 KVAR	0,9998
Subestação	1,049	896,9	19,26 MW	2,025 MVAR	0,9945

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Assim como foi configurado, os valores de potência reativa dos alimentadores FMA 03 e FMA 07 estão negativos indicando que a potência reativa é capacitiva, o que pode vir a ocorrer em cargas residenciais e mantêm um fator de potência bem próximo de 1 já que absorve os reativos indutivos da rede.

Já a Tabela 7 mostra os valores obtidos pelos medidores posicionados na SE de Arcos e na linha de transmissão.

Tabela 7 – Valores obtidos entre arcos e a linha de transmissão.

	Tensão (pu)	Corrente (A)	P. Ativa	P. Reativa	Fator de Potência
Arcos	1,033	185,0	19,47 MW	3,926 MVAR	0,9814
LT	1,027	186,4	19,45 MW	4,088 MVAR	0,9798

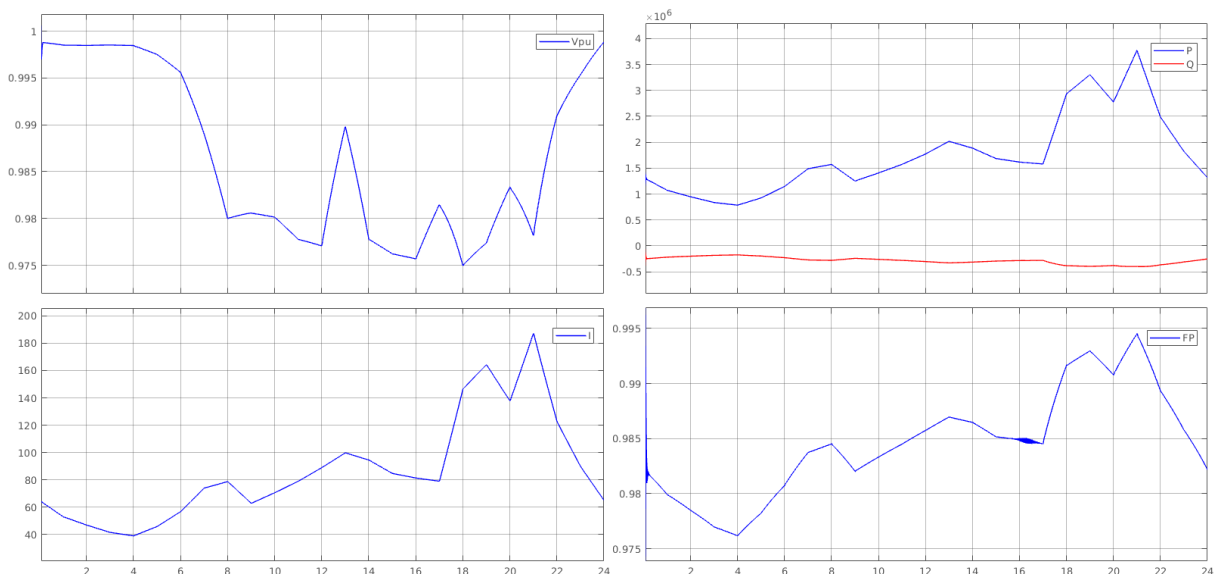
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

É possível observar que a potência reativa, após passar pelos 22 km da linha de transmissão, aumentou em quase 100 kVAR, indicando os reativos indutivos injetados pela LT, fazendo com que o fator de potência diminua.

Para o segundo teste, utilizando o sistema com carga dinâmica, as simulações tem 24 segundos e a cada segundo os valores de tensão e corrente variam devido as curvas de carga.

Ao observar os gráficos da FMA 03, apresentados na Figura 65, vemos as variações na tensão, corrente, potência ativa e reativa e do fator de potência. Observando o gráfico de potências e fator de potência, fica claro que, conforme a potência reativa aumenta negativamente, o fator de potência também aumenta se aproximando de 1, onde seu pico se encontra em 21 segundos.

Figura 65 – Resultados obtidos no alimentador FMA03

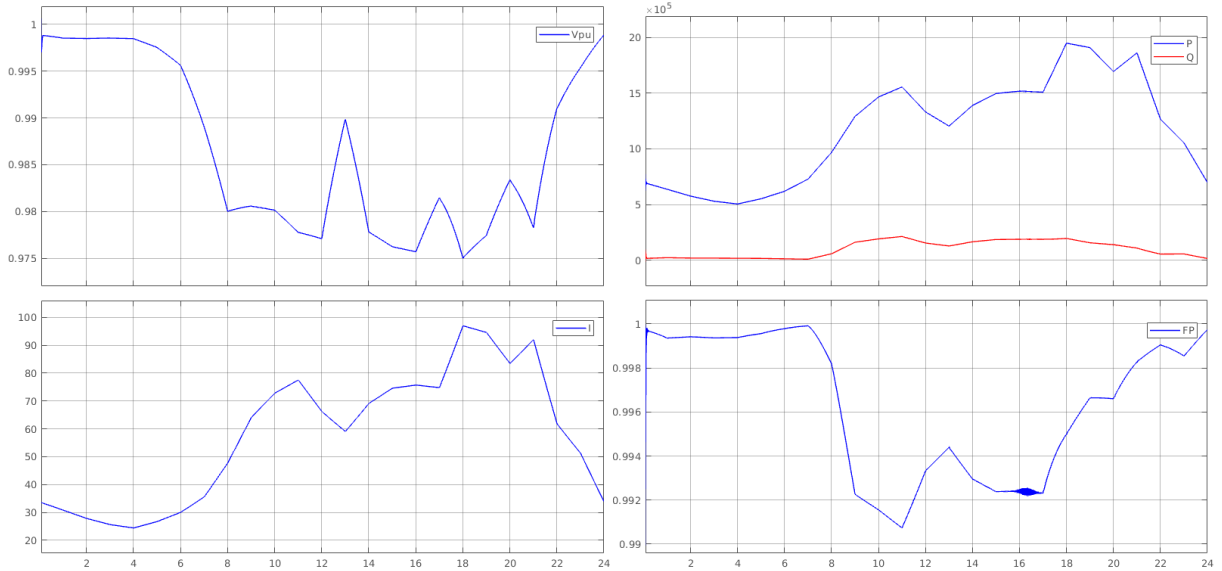


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 66 mostra os gráficos do alimentador FMA 04, que é composto por uma carga com curva comercial e uma residencial alterando assim, a curva puramente residencial vista

no alimentador FMA 03. Neste caso, também é possível ver que conforme a potência reativa aumenta, o fator de potência diminui, atingindo seu menor valor aos 11 segundos.

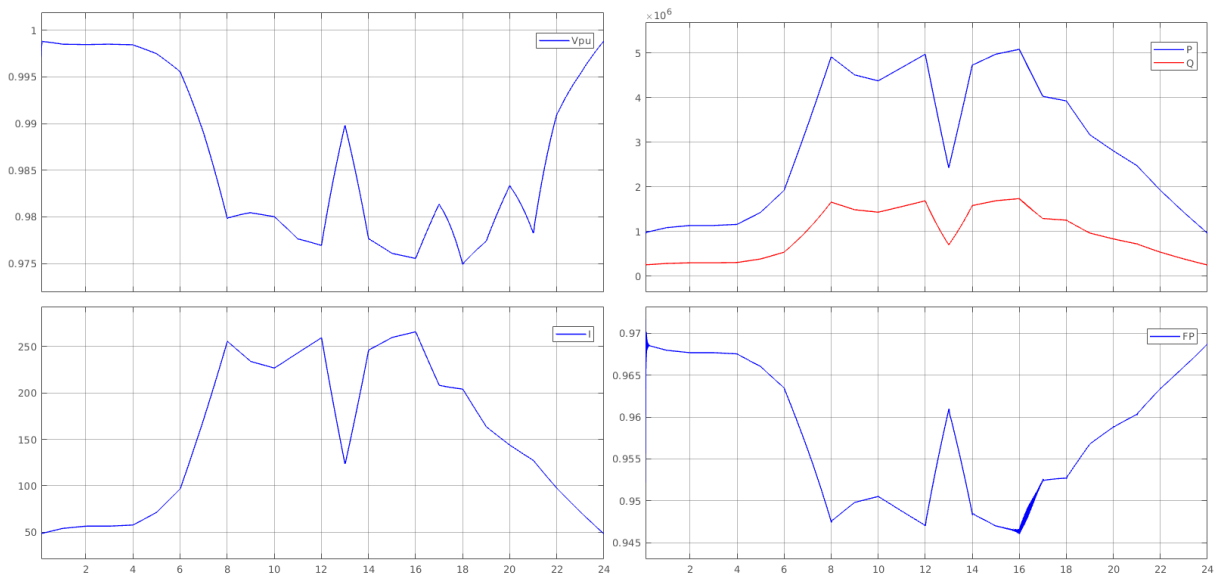
Figura 66 – Resultados obtidos no alimentador FMA04



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O alimentador FMA 05, contém uma carga puramente industrial que, neste sentido, é possível ver como cargas deste tipo tendem a ter um fator de potência bem mais baixo, conforme Figura 67, devido ao seu elevado nível de potência reativa, normalmente causado por motores elétricos.

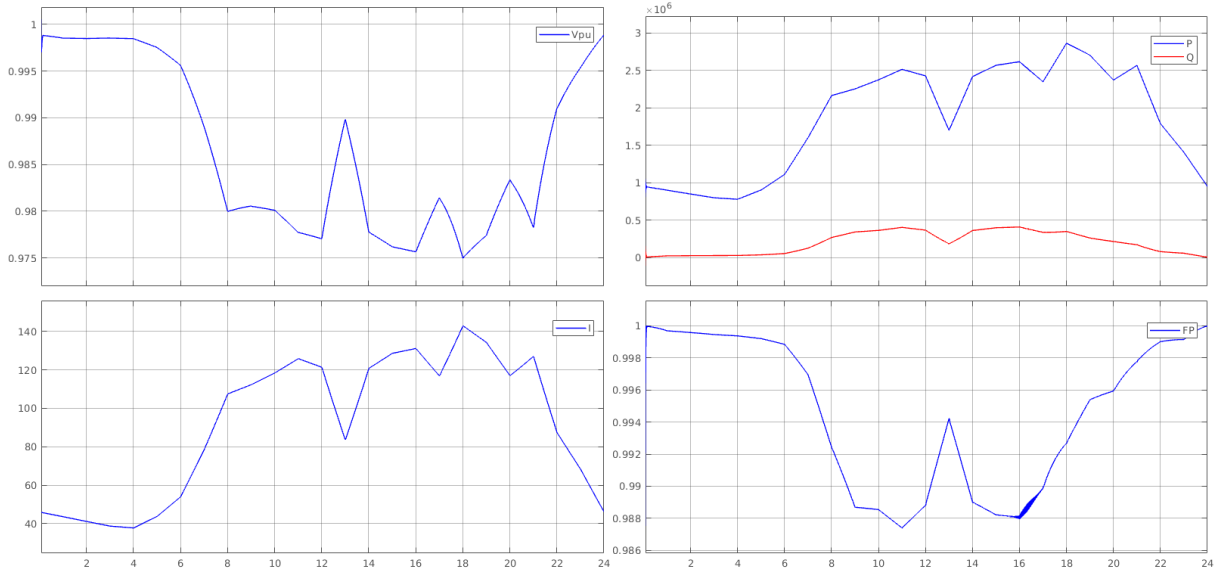
Figura 67 – Resultados obtidos no alimentador FMA05



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O alimentador FMA 06 apresenta a combinação dos três tipos de carga, residencial, comercial e industrial, conforme Figura 68.

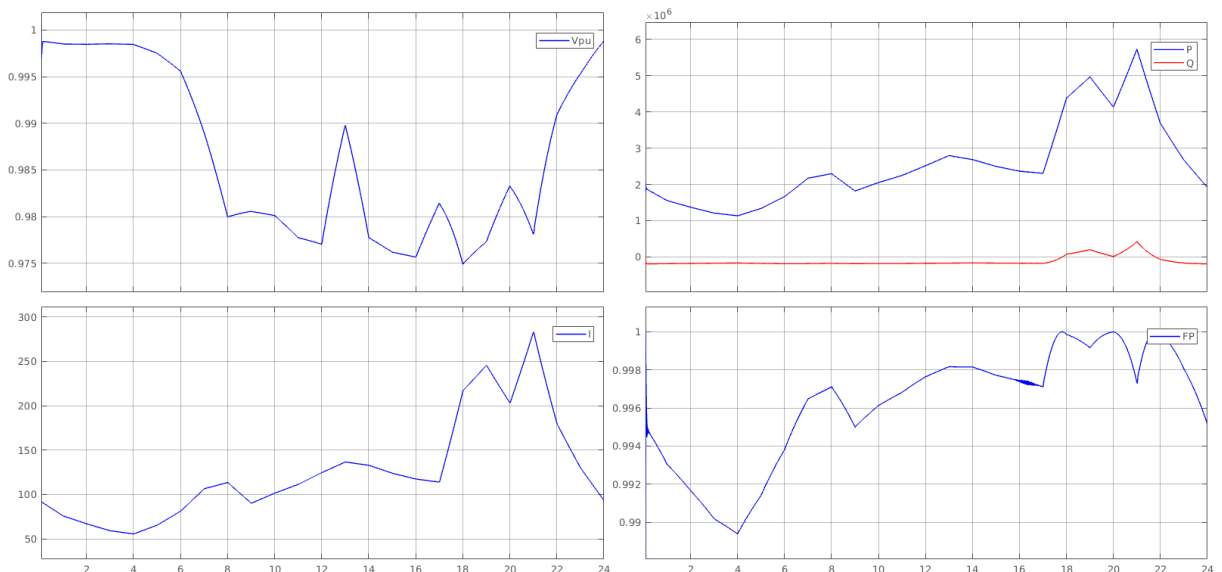
Figura 68 – Resultados obtidos no alimentador FMA06



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Por ser um alimentador puramente residencial, as curvas do alimentador FMA 07 tem a mesma aparência do alimentador FMA 03, porém, ao observar a potência reativa, aos 17 segundos, ela passa de capacitiva para indutiva e aos 21 segundos um pico de potência ativa também aumenta a reativa, fazendo o fator de potência cair.

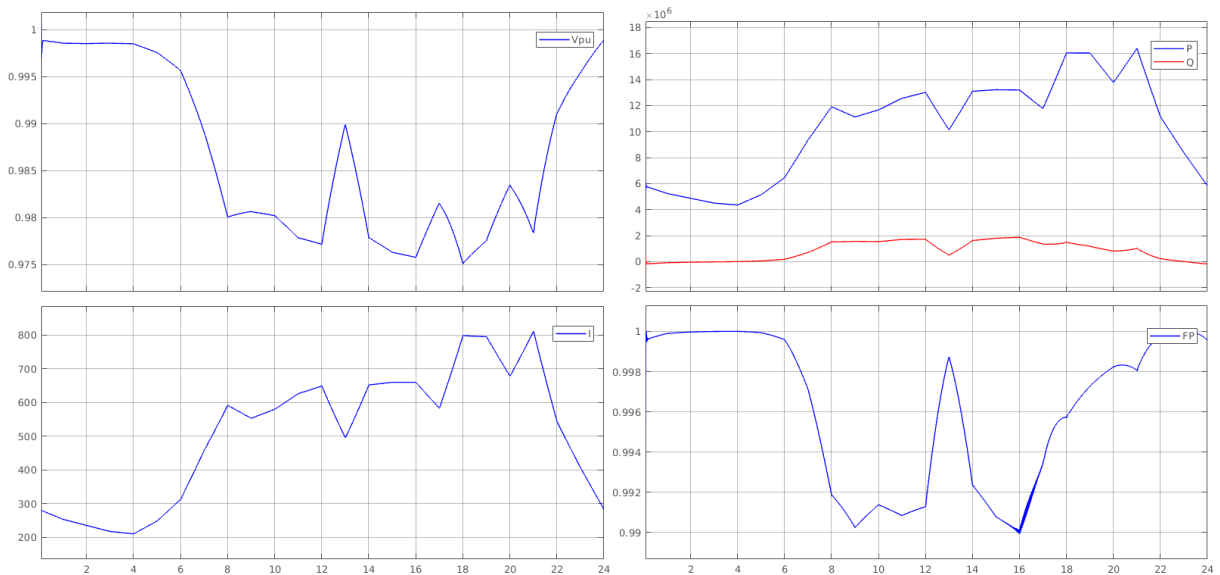
Figura 69 – Resultados obtidos no alimentador FMA07



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A SE de Formiga apresenta a combinação das curvas de carga dos alimentadores, conforme Figura 70. Podemos destacar o comportamento do fator de potência que, durante as horas da madrugada, permanece próximo de 1, sendo que a partir das 6 horas da manhã este fator passa a cair, indicando o funcionamento de cargas indutivas e as 13 horas o fator de potência volta a subir, onde normalmente as indústrias e comércio param para almoço.

Figura 70 – Resultados obtidos na subestação.

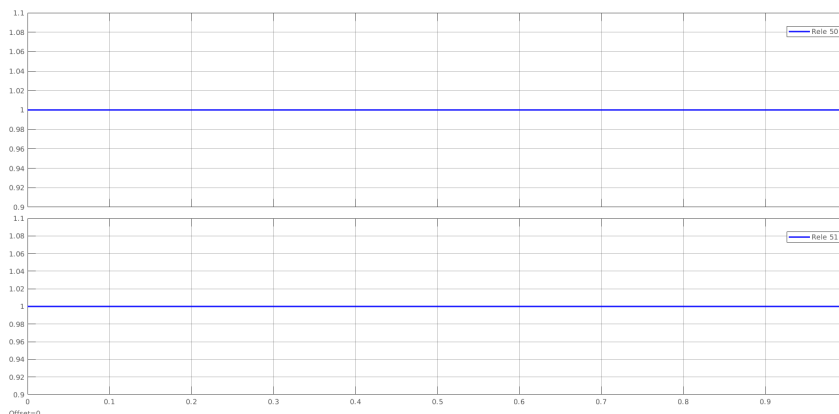


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5.2 Exemplo 02 - Relés de proteção 50/51

Ao executar a simulação, ainda com as chaves fca dos alimentadores FMA 05 e 07 abertas, os relé 50 e 51 não serão acionados, conforme Figura 71.

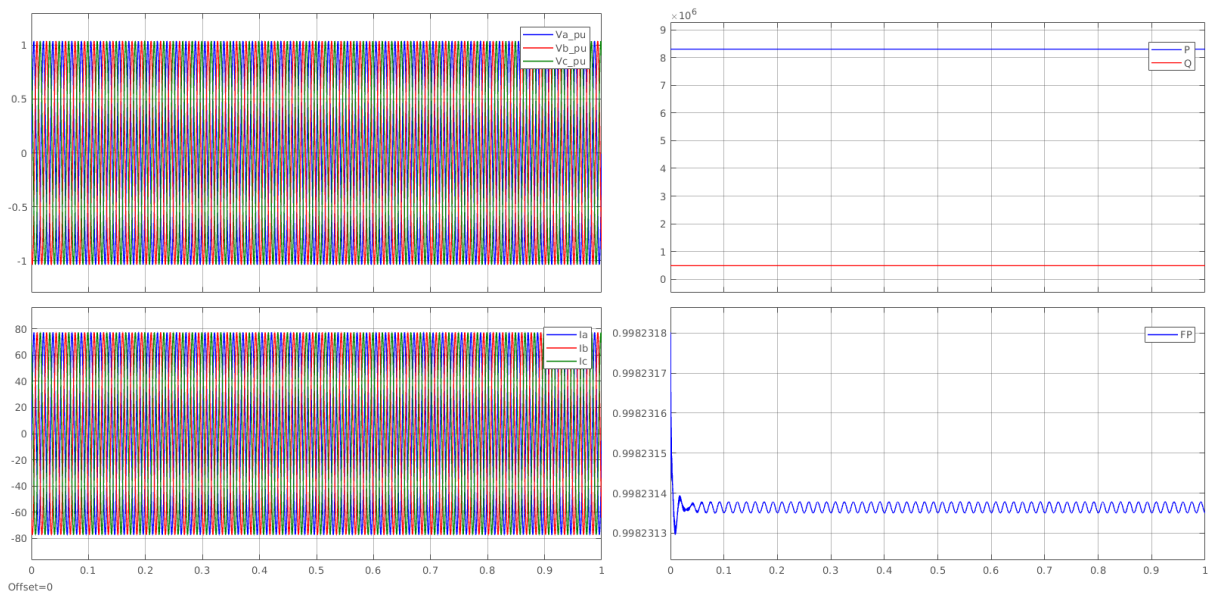
Figura 71 – Relés em funcionamento normal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O acionamento não acontece pois a corrente de partida, ou *pickup*, do relé 51 está setada para 60 A, porém, a corrente RMS deste sistema é de 54 A, logo, a corrente de *pickup* ainda é maior que a corrente no sistema o que manterá seu funcionamento normal, conforme pode ser visto na Figura 72.

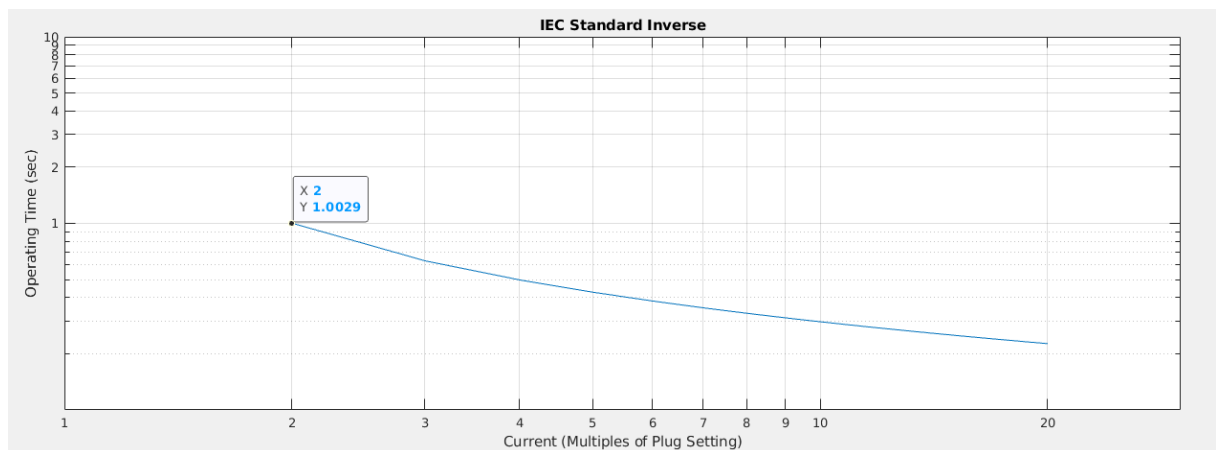
Figura 72 – Sistema sem acionamento de relés.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Assim que o valor de fechamento das chaves dos alimentadores FMA 05 e 07 é setado para 0.1 segundos, as chaves comutarão e a corrente no sistema será praticamente dobrada, indo de 54 A para 121 A, que pela curva IEC normal inversa, apresentada na Figura 73, com o dobro da corrente o tempo de operação será de 1,0029 segundos.

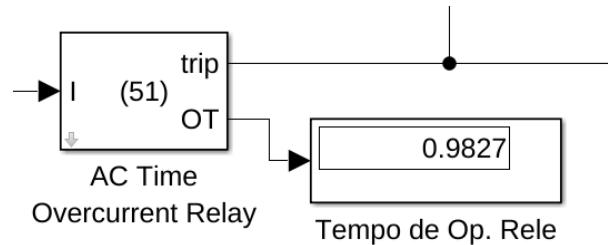
Figura 73 – Curva IEC normal inversa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com a sobrecorrente, o relé 51 será acionado com o tempo de operação conforme a Figura 73, sendo que o bloco do relé tem uma saída com o tempo de operação de 0.9827, conforme Figura 74.

Figura 74 – Tempo de operação do relé 51 em sobrecorrente.



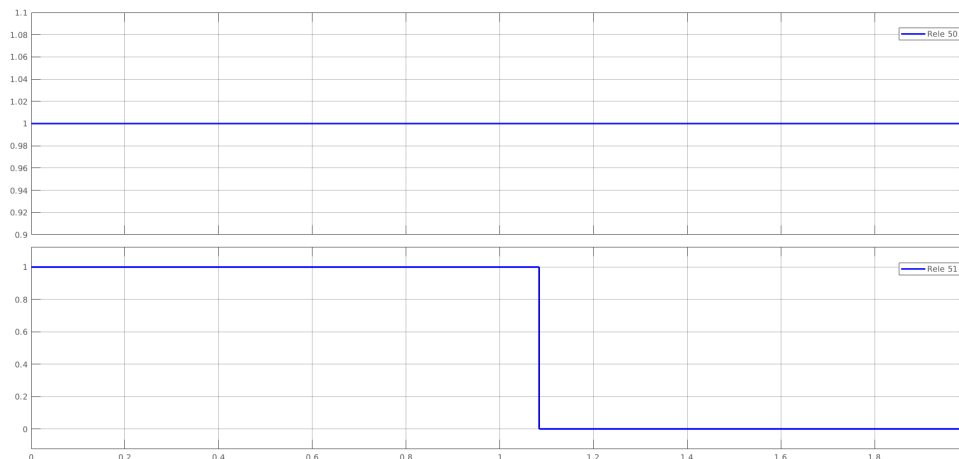
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao somar o tempo de fechamento das chaves mais o tempo de operação do relé 51 temos que:

$$0,1s + 0.9827s = 1,0827s$$

tal valor condiz com o gráfico da Figura 75.

Figura 75 – Relé 51 comutando por sobrecorrente.

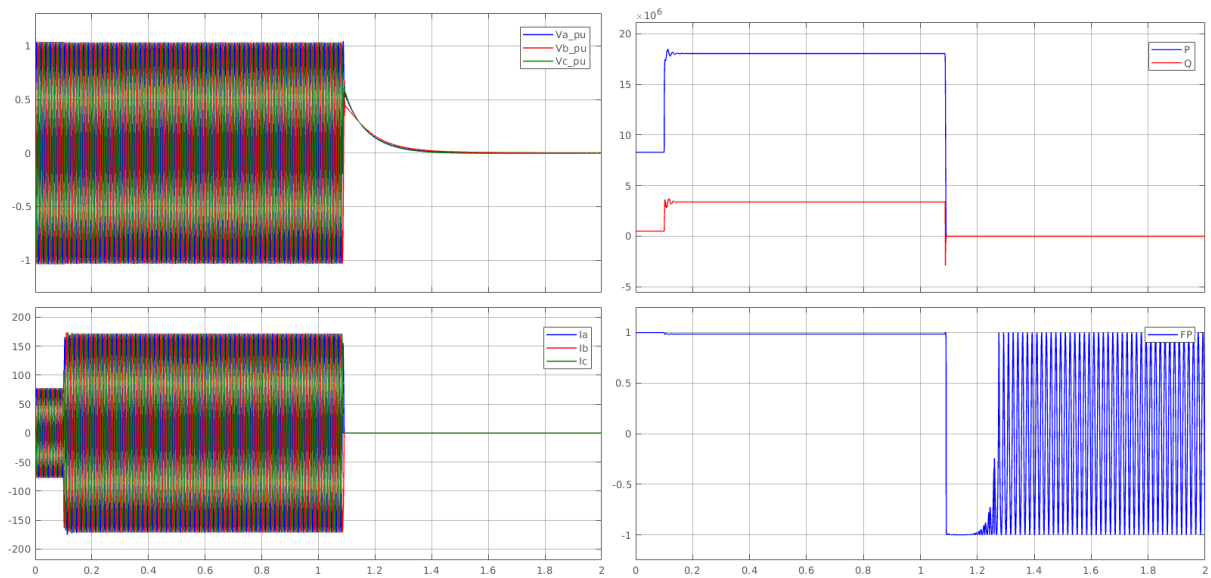


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com o a abertura do disjuntor, o fornecimento da SE de Arcos para a SE de Formiga é cortado depois do tempo previsto, conforme Figura 76.

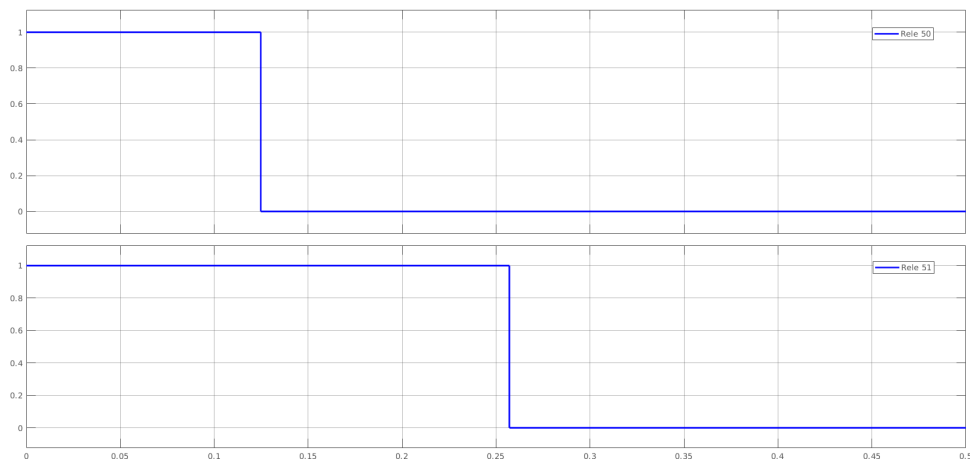
Como segundo teste, as chaves dos alimentadores FMA 05 e 07 foram mantidas abertas para manter o sistema em funcionamento normal, porém a chave de aterramento encontrada na entrada da SE de Formiga, foi temporizada para fechar aos 0.1 segundos, criando assim um curto-circuito entre as 3 fases e terra. Este curto-circuito eleva o nível da corrente próximo de 6000 A, o que faz com que o relé 50 atue instantaneamente, conforme Figura 77.

Figura 76 – Fornecimento interrompido por sobrecorrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

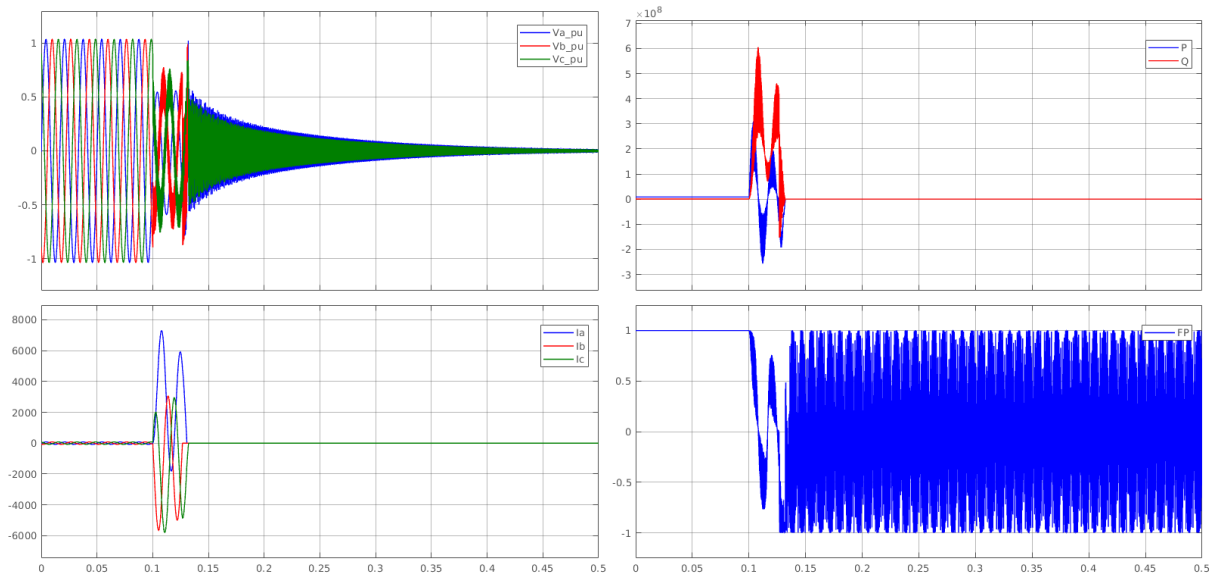
Figura 77 – Acionamento dos relés 50 e 51 devido curto-circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Pela Figura 77, é possível observar que após a abertura da chave de aterramento o relé 50 atua com uma diferença de apenas 0,02 segundos, sendo que este tempo é o tempo de movimento do contato mecânico do relé. É possível ver também que o relé 51 também atuou com um tempo menor que o do primeiro experimento de sobrecorrente, o que é o esperado como um sistema de segurança, pois caso o relé 50 não atue por algum motivo, o relé 51 atuará como o retaguarda. Assim que o relé 50 entra em operação, ele interrompe imediatamente o fornecimento para a SE de Formiga, conforme Figura 78.

Figura 78 – Fornecimento interrompido por curto-circuito.

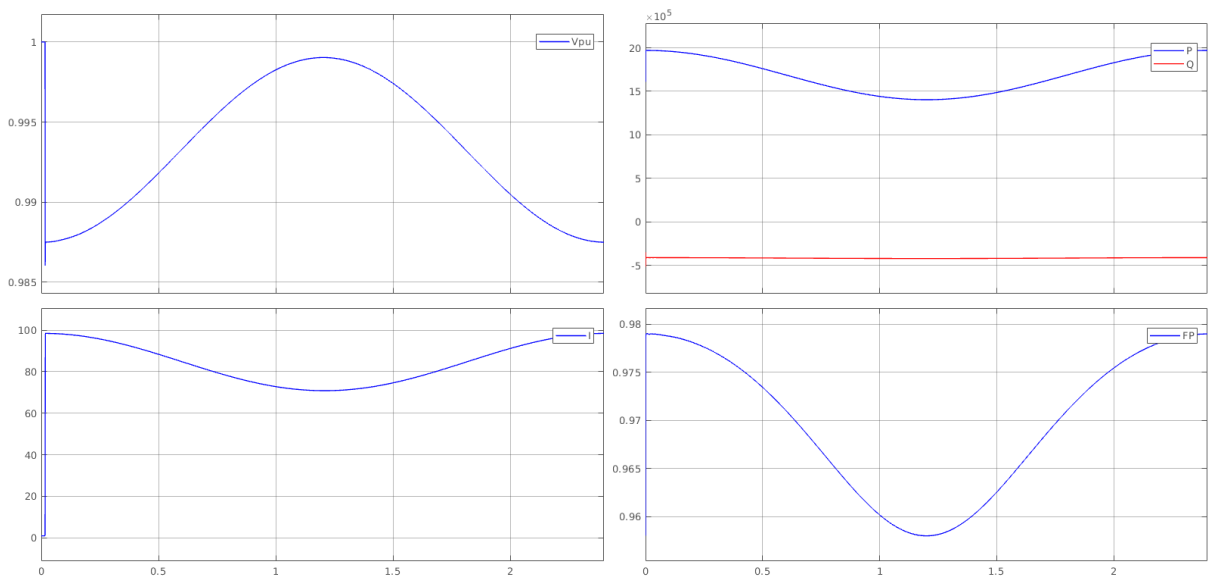


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5.3 Exemplo 03 - Geração distribuída

Ao simularmos o sistema com a GD inserida no alimentador FMA 03, podemos observar que o fator de potência é afetado, assim como descrito na literatura. Neste caso, com uma GD que fornece 500 kW de potência ativa, o fator de potência cai de 0.979 para 0.958 como pode ser visto na Figura 79.

Figura 79 – Efeito da inserção de uma GD no alimentador.

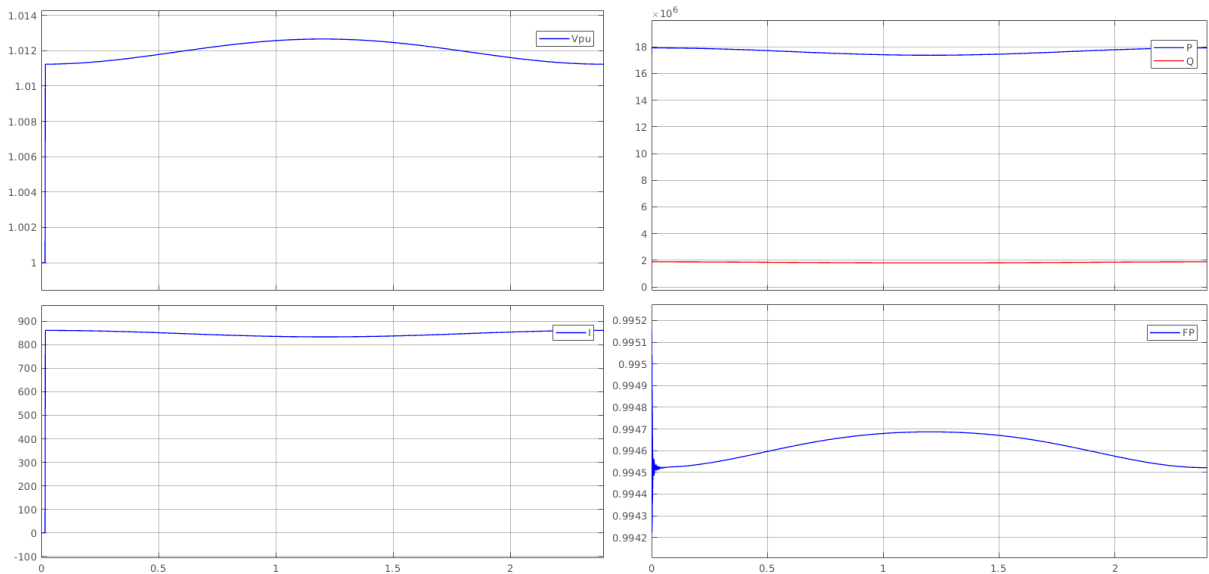


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observando pela SE de Formiga, Figura 80, este efeito é atenuado devido os outros

alimentadores que continuam operado de forma normal sem a queda brusca do fator de potência.

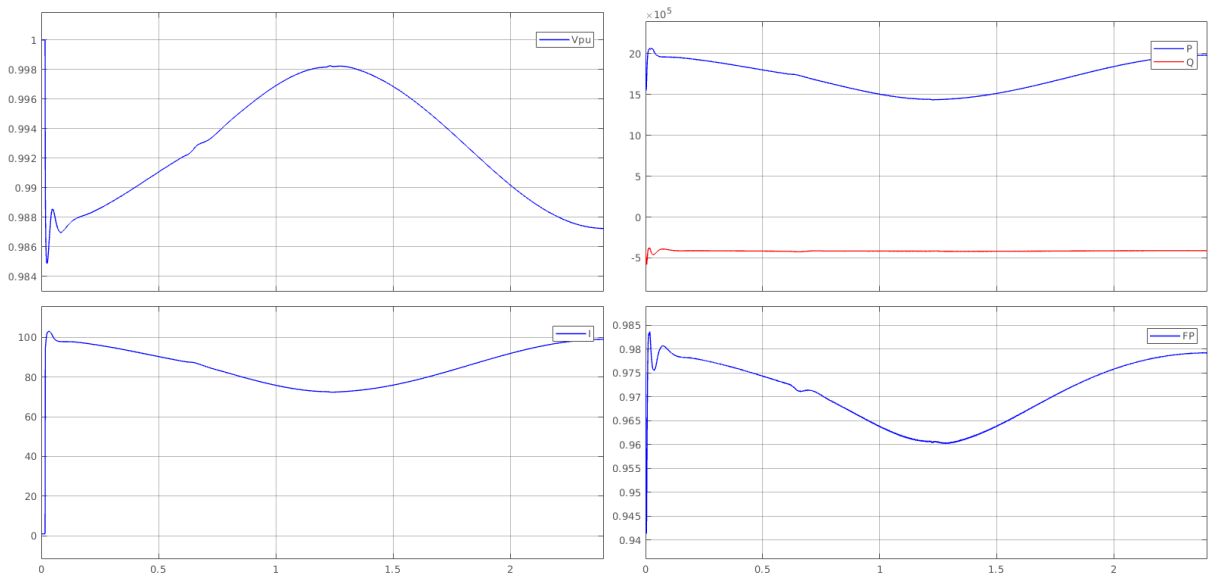
Figura 80 – Efeito da GD visto pela SE de Formiga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao inserir o outro modelo de GD, o efeito continua igual, porém, agora é possível ver o efeito de harmônicos sendo injetados na rede, como pode ser observado na Figura 81.

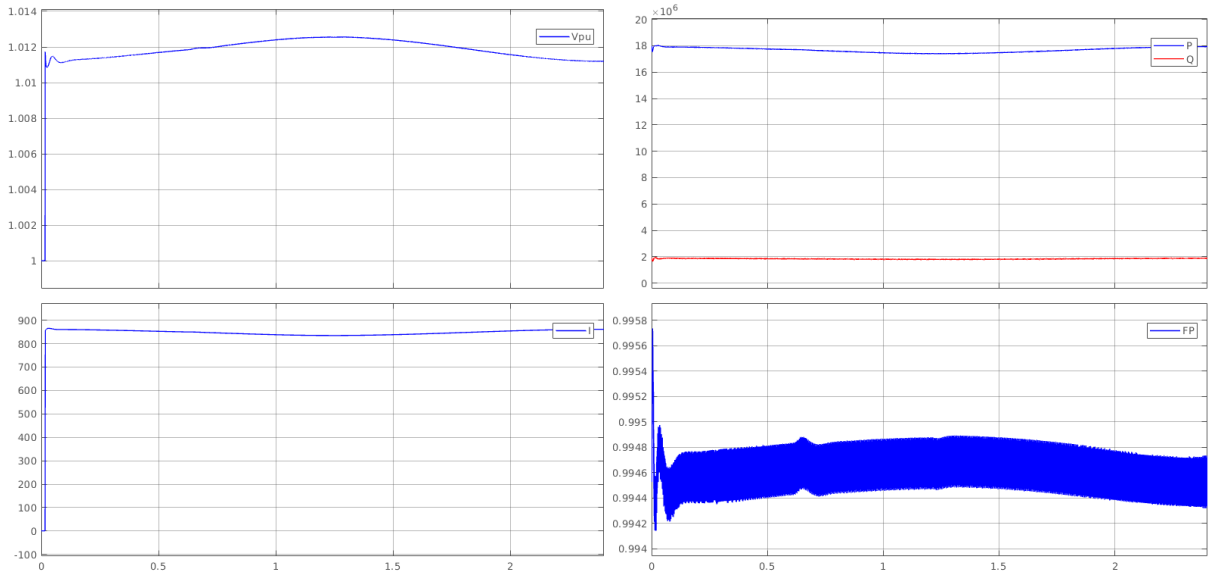
Figura 81 – GD injetando harmônicos na rede.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Estes harmônicos se propagam pela rede e são observados até na SE. a Figura 82 mostra o efeito dos harmônicos principalmente no fator de potência.

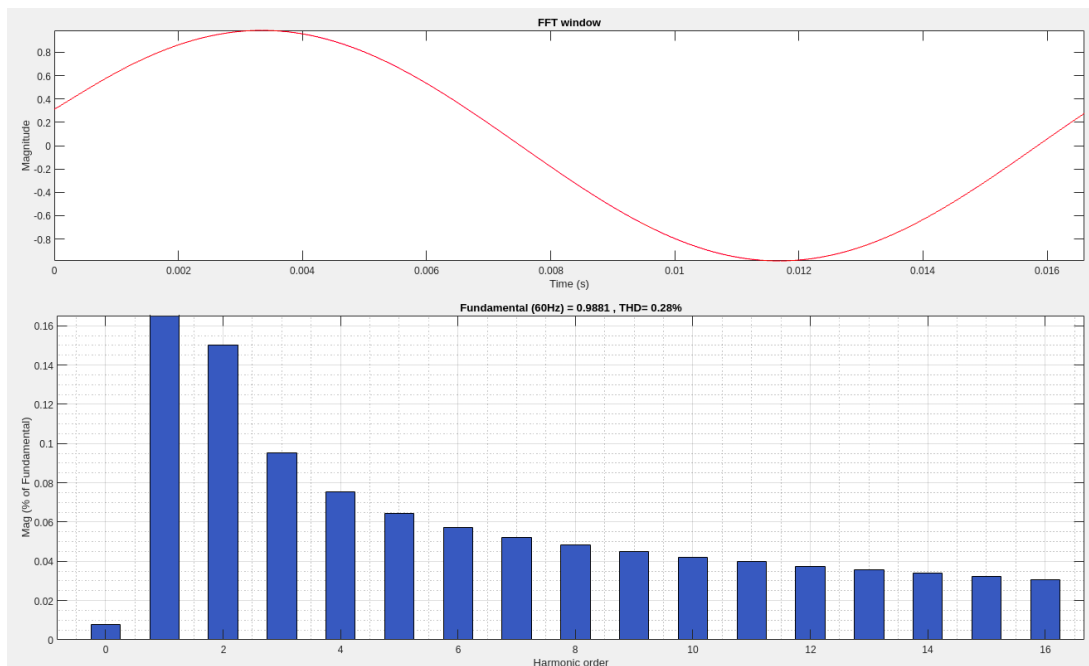
Figura 82 – harmônicos gerados pela GD na SE de Formiga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para analisar os harmônicos inseridos na rede, será utilizado a ferramenta *FFT Analysis*, que faz parte das ferramentas do bloco *powergui*. Observando a análise desta ferramenta, Figura 83, na primeira simulação feita com o bloco tipo PQ temos pouquíssimos harmônicos na rede, sendo que a segunda harmônica representa apenas 0,15% e a terceira apenas 0,09%, sendo que a distorção harmônica total é de 0,28%.

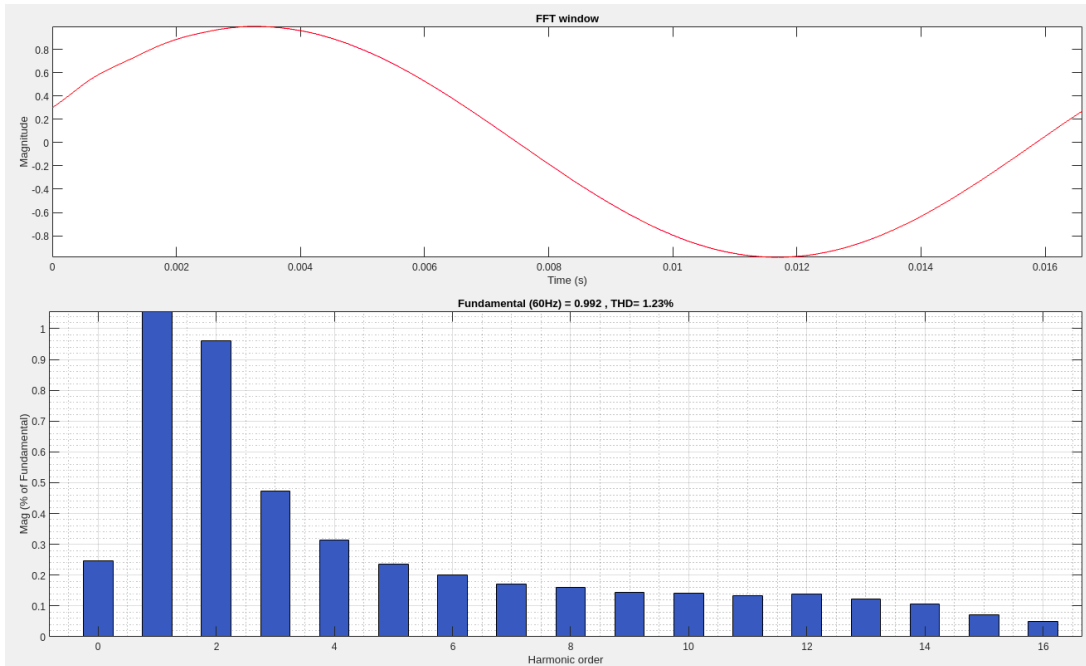
Figura 83 – Resultado obtido pelo *FFT Analysis* utilizando o bloco tipo PQ.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com o bloco tipo EMT, ao executar o FFT neste sistema vemos como a distorção harmônica total subiu para 1,23%, ou seja, um aumento de 339,38% em comparação com o bloco tipo PQ de geração fotovoltaica.

Figura 84 – Resultado obtido pelo *FFT Analysis* utilizando o bloco tipo EMT.

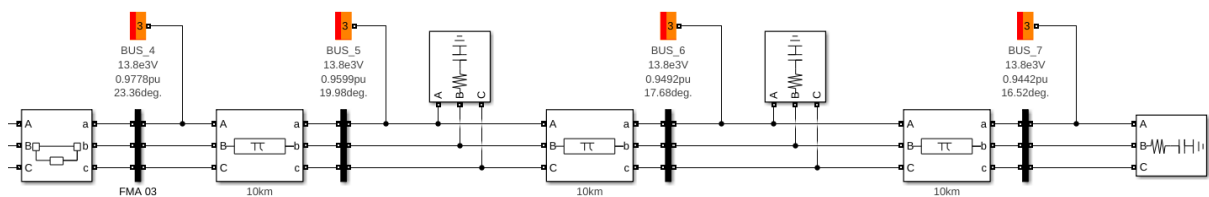


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5.4 Exemplo 04 - Fluxo de potência

Para obter os resultados deste teste, foi necessário utilizar a ferramenta *Load Flow Analyzer* presente no bloco *powergui*. Ao utilizar essa ferramenta, obtemos todos os valores do sistema e o comportamento da tensão, ângulo de tensão e potências em cada barramento que o bloco *Load Flow Bus* foi inserido, conforme Figura 85.

Figura 85 – Blocos *Load Flow Bus* mostrando queda de tensão entre os barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No primeiro teste os valores calculados pelo *Load Flow Analyser*, vistos na Figura 86, foram para o sistema em funcionamento normal, logo, os valores observados de tensão nos

barramentos seguem o padrão de queda conforme se afastam da fonte e passam pelos condutores dos alimentadores e pelas cargas. A Tabela 8 mostra os valores de tensão nos barramentos do alimentador FMA 03.

Figura 86 – Tela do *Load Flow Analyzer* com valores calculados.

Block name	Block type	Bus type	Bus ID	Vbase (kV)	Vref (pu)	Vangle (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Qmin (Mvar)	Qmax (Mvar)	V_LF (pu)	Vangle_LF (deg)	P_LF (MW)	Q_LF (MVA)
1 Load Flow Bus	Bus	-	BUS_1	69.0000	1.0000	0	0	0	0	0	1.0000	0	0	0
2 Load Flow Bus1	Bus	-	BUS_2	69.0000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9946	-1.3215	0	0
3 Load Flow Bus10	Bus	-	BUS_11	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9777	23.3626	0	0
4 Three-Phase Series RLC Load5	RLC load	Z	BUS_12	13.8000	1.0000	0	4.5000	0.7899	-inf	inf	0.9043	18.5815	3.6799	0.6459
5 Load Flow Bus12	Bus	-	BUS_13	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9778	23.3609	0	0
6 Three-Phase Series RLC Load6	RLC load	Z	BUS_14	13.8000	1.0000	0	0.7100	0.1449	-inf	inf	0.9483	21.2103	0.6398	0.1306
7 Three-Phase Series RLC Load7	RLC load	Z	BUS_15	13.8000	1.0000	0	0.8700	0.1649	-inf	inf	0.9303	19.6627	0.7530	0.1427
8 Three-Phase Series RLC Load8	RLC load	Z	BUS_16	13.8000	1.0000	0	0.7350	0.1299	-inf	inf	0.9219	18.9385	0.6247	0.1104
9 Load Flow Bus16	Bus	-	BUS_17	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9777	23.3591	0	0
10 Three-Phase Series RLC Load9	RLC load	Z	BUS_18	13.8000	1.0000	0	0.7650	-0.1290	-inf	inf	0.9790	19.2149	0.7332	-0.1236
11 Three-Phase Series RLC Load...	RLC load	Z	BUS_19	13.8000	1.0000	0	0.7650	-0.1290	-inf	inf	0.9625	15.9052	0.7385	-0.1245
12 Three-Phase Series RLC Load...	RLC load	Z	BUS_20	13.8000	1.0000	0	0.7650	-0.1290	-inf	inf	0.9686	13.4341	0.7446	-0.1256
13 Load Flow Bus2	Bus	-	BUS_3	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9779	23.3594	0	0
14 Three-Phase Series RLC Load11	RLC load	Z	BUS_21	13.8000	1.0000	0	0.7650	-0.1290	-inf	inf	0.9689	11.7946	0.7497	-0.1264
15 Three-Phase Series RLC Load...	RLC load	Z	BUS_22	13.8000	1.0000	0	0.7650	-0.1290	-inf	inf	0.9918	10.9776	0.7525	-0.1269
16 Load Flow Bus3	Bus	-	BUS_4	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9778	23.3583	0	0
17 Three-Phase Series RLC Load	RLC load	Z	BUS_5	13.8000	1.0000	0	0.9800	-0.1989	-inf	inf	0.9599	19.9763	0.9029	-0.1632
18 Three-Phase Series RLC Load1	RLC load	Z	BUS_6	13.8000	1.0000	0	0.9800	-0.1989	-inf	inf	0.9482	17.6766	0.8829	-0.1792
19 Three-Phase Series RLC Load2	RLC load	Z	BUS_7	13.8000	1.0000	0	0.9800	-0.1989	-inf	inf	0.9442	15.5153	0.8737	-0.1773
20 Load Flow Bus7	Bus	-	BUS_8	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9778	23.3604	0	0
21 Three-Phase Series RLC Load3	RLC load	Z	BUS_9	13.8000	1.0000	0	0.9900	0.2099	-inf	inf	0.9566	21.6435	0.9059	0.1921
22 Three-Phase Series RLC Load4	RLC load	Z	BUS_10	13.8000	1.0000	0	0.7350	0.1099	-inf	inf	0.9482	20.8837	0.6609	0.0988
23 Trafo 01 12.5MVA - 69/13.8kV	Bus	-	*1*	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9783	23.3571	0	0
24 Trafo 01 12.5MVA - 69/13.8kV	Bus	-	*2*	69.0000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9946	-1.3214	0	0
25 Trafo 02 12.5MVA - 69/13.8kV	Bus	-	*3*	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9783	23.3571	0	0
26 Trafo 02 12.5MVA - 69/13.8kV	Bus	-	*4*	69.0000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9946	-1.3214	0	0
27 Solar Array (PQ Model)/Simple...	DYN load	PQ	*5*	13.8000	1.0000	0	-5.0000	-0.0000	-inf	inf	0	0	0	NaN

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

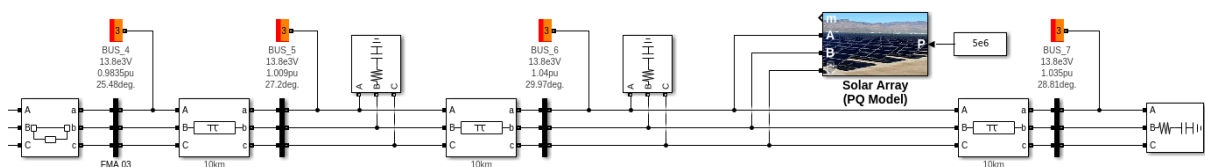
Tabela 8 – Valores de tensão nos barramentos do alimentador FMA 03.

Barramento	BUS_4	BUS_5	BUS_6	BUS_7
Tensão (PU)	0,9778	0,9599	0,9492	0,9442

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para alterar o fluxo de potência uma GD foi colocada entre o terceiro e quarto barramento, conforme Figura 87, injetando 5 MW de potência. Sendo assim, foi fornecida potência maior que as cargas deste alimentador absorvem.

Figura 87 – Ângulos de tensão alterados mostrando a nova direção de fluxo de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A inserção desta nova fonte causará uma inversão no fluxo de potência. O fluxo que antes vinha diretamente da subestação para o alimentador, agora passar a sair da GD e seguir para a SE. Utilizando novamente o *Load Flow Analyzer*, foram calculados os novos valores correspondentes de cada barramento.

A Tabela 9 mostra os ângulos das tensões de cada barramento e, sabendo que o fluxo de potência segue sempre do maior ângulo de tensão para o menor ângulo de tensão, percebemos a inversão do fluxo causada pela GD.

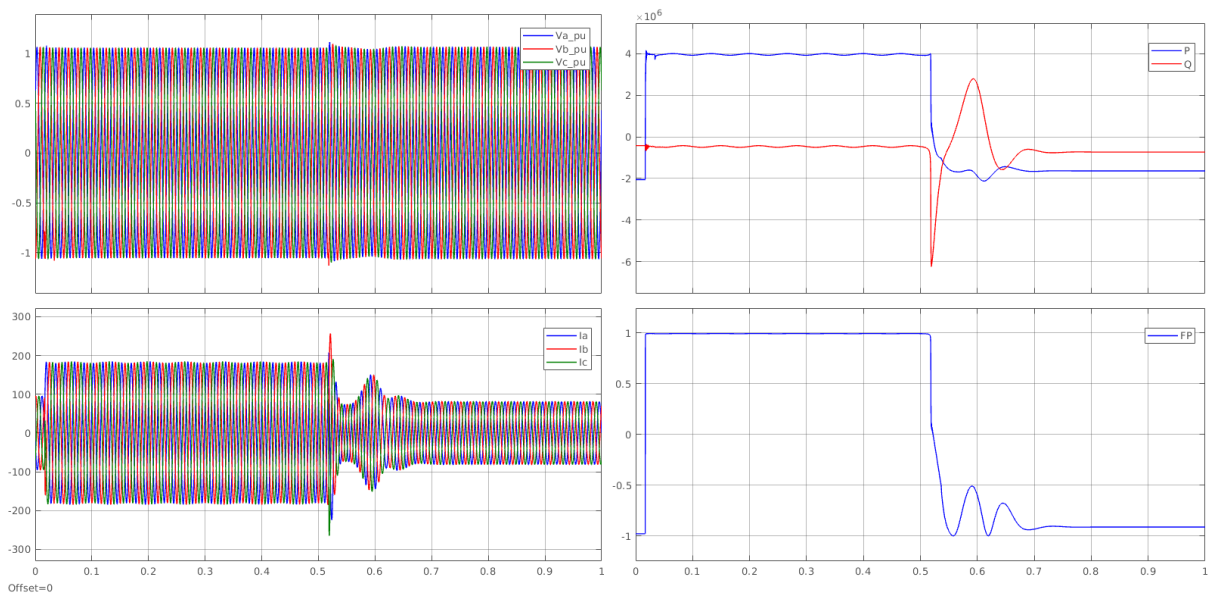
Tabela 9 – Valores dos ângulos de tensão com e sem GD.

Barramento	BUS_4	BUS_5	BUS_6	BUS_7
Ângulo sem GD	23,36°	19,98°	17,68°	16,52°
Ângulo com GD	25,48°	27,20°	29,97°	28,81°

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 88 mostra graficamente a inserção da GD no alimentador que, após 0,5 segundo, injeta 5 MW de potência, tornando a curva de potência e de fator de potência negativas. O efeito é propagado até a SE de Formiga, porém, como isto aconteceu em apenas um alimentador a inversão de fluxo de potência não ocorre na SE, havendo apenas um pico negativo no fator de potência, além de uma queda na potência ativa, que pode ser observado na Figura 89.

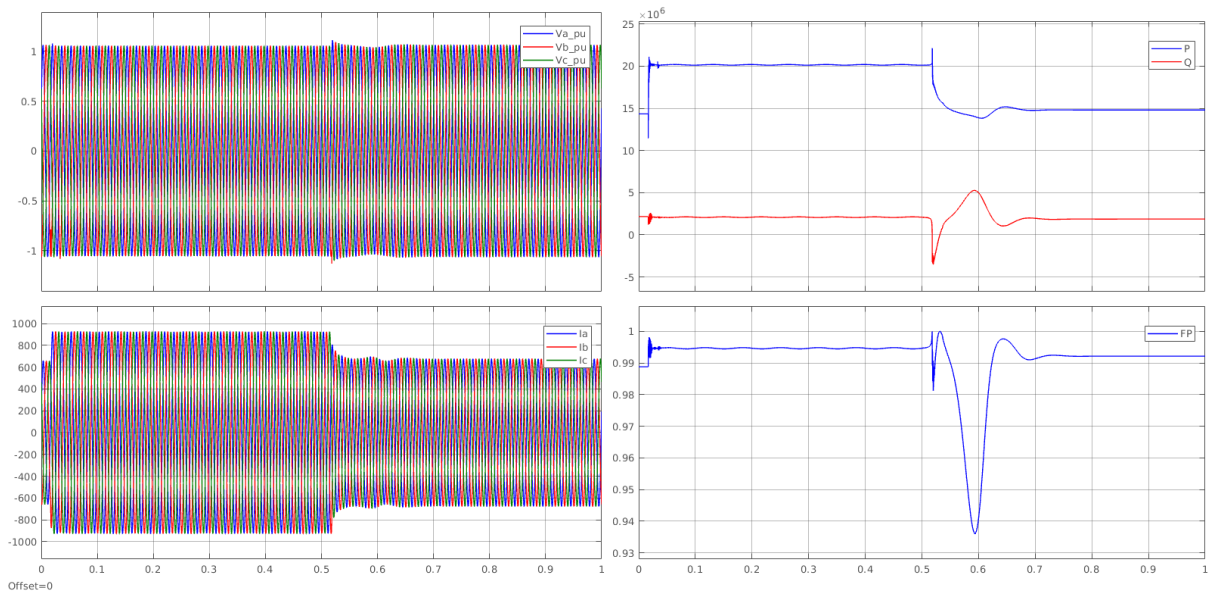
Figura 88 – Potência e fator de potência se tornando negativos devido a inversão de fluxo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Neste exemplo acima, a GD foi inserida de uma única vez, como se uma chave tivesse sido ligada e toda a potência fosse injetada diretamente no sistema.

Figura 89 – Efeitos da inversão de fluxo na subestação.

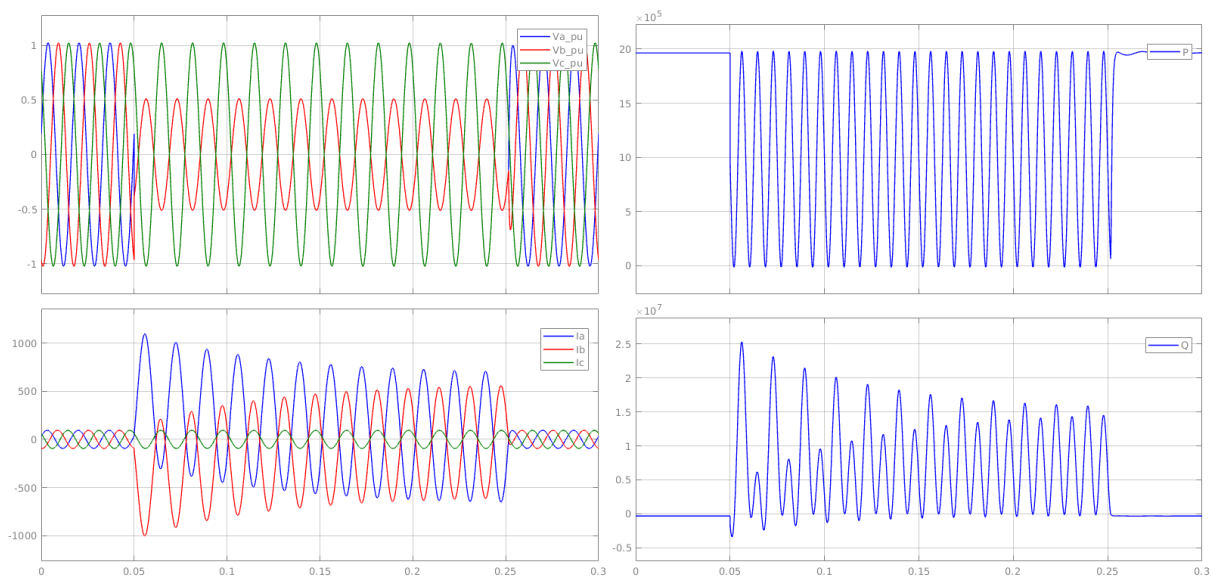


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5.5 Exemplo 05 - Falhas no sistema

Como primeiro teste, gerou-se um curto-circuito entre as fases A e B no quinto barramento do alimentador FMA 07. Para melhor entendimento de como esta falta propaga para o sistema de distribuição, foram colocados medidores no barramento onde ocorre a falta, um medidor na SE de Formiga e uma medidor no quarto barramento do alimentador FMA 03, pois se trata do barramento mais distante de onde está ocorrendo o curto-circuito.

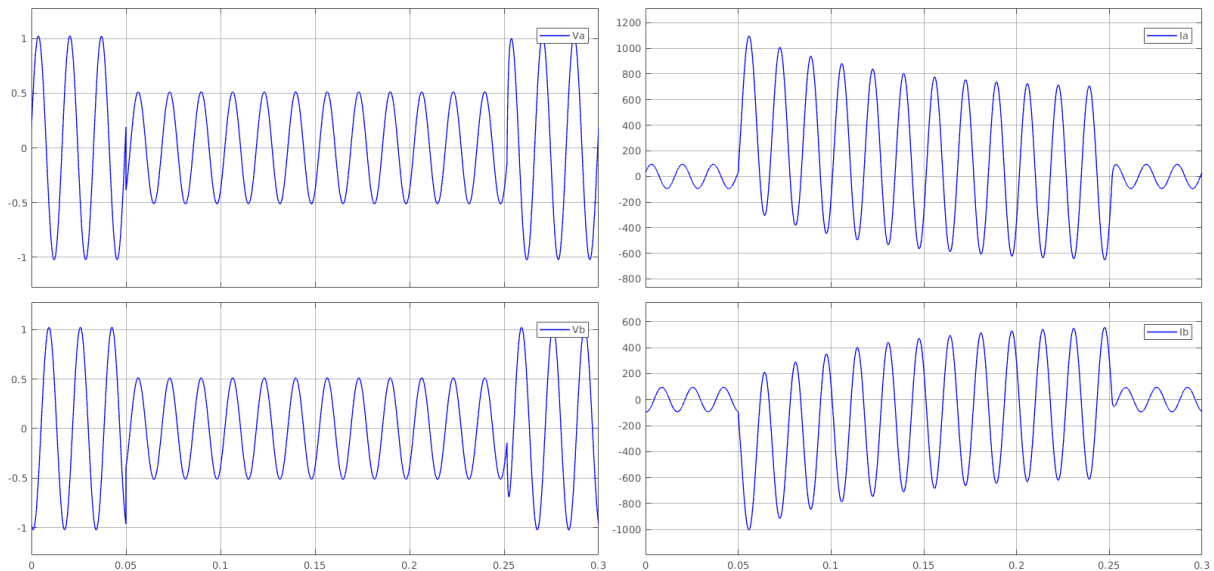
Figura 90 – Curto entre as fases A e B visto pelo barramento 5 da FMA 07.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 90 mostra como esse curto-circuito afeta o barramento onde ocorreu a falta. Observando o gráfico da tensão é possível notar que, durante o curto-circuito, as fases A e B diminuem pela metade sua magnitude, além de entrarem em sincronia como uma única fase, porém a fase C continua operando normalmente.

Figura 91 – Curvas de tensão e corrente isoladas visto pelo barramento 5 da FMA 07.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

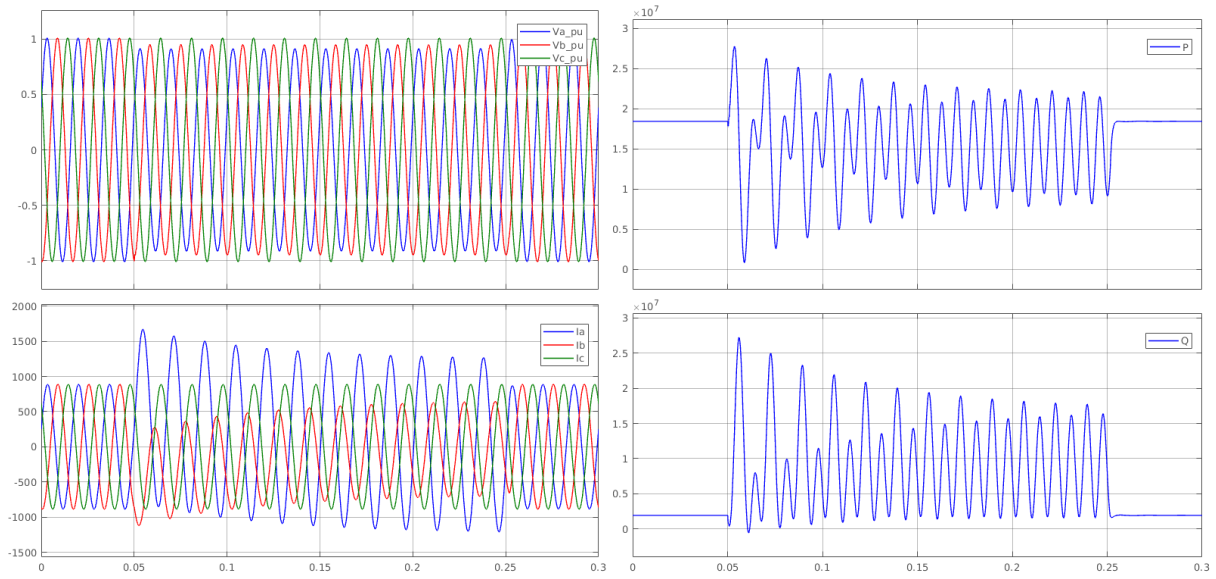
As correntes I_a e I_b sofrem uma distorção inicial, chamada de assimetria, para logo se tornarem simétricas novamente. Este efeito pode ser melhor observado na Figura 91, onde as tensões V_a e V_b , além das correntes I_a e I_b , foram isoladas. Com a falta, a magnitude das correntes fica muito acima do normal de operação, onde antes se tinha uma corrente de 94 A, durante o curto esse valor chega aproximadamente 1100 A. E assim como na corrente e na tensão, as potências também sofrem uma grande deformidade.

Ao se observar esse curto-circuito pelo medidor da subestação, Figura 92, é possível perceber que a tensão já não sofre tamanha deformidade se comparada com o medidor do barramento onde ocorreu o curto-circuito. Os mais afetados ainda são a corrente e as potências.

No medidor do quarto barramento da FMA 03, que está localizado no extremo oposto de onde ocorreu a falta, os efeitos são ainda menores. Ainda é possível ver como as potências são afetadas, porém, a tensão e corrente já não tem tamanha deformidade assim como encontrada na SE de Formiga, conforme pode ser observado na Figura 93.

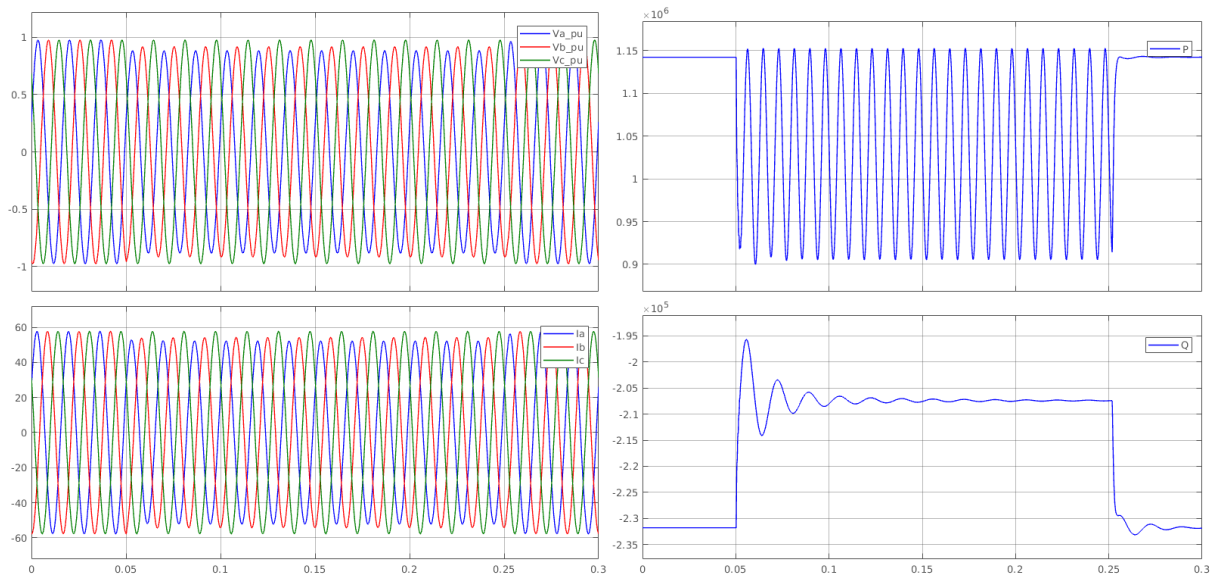
No segundo teste, o curto-circuito foi configurado para acontecer entre a fase C e o terra. A Figura 94 mostra como um curto com o terra afeta não só a fase que causou o curto como

Figura 92 – Curto entre as fases A e B visto pela subestação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 93 – Curto entre as fases A e B visto pelo alimentador FMA 03.

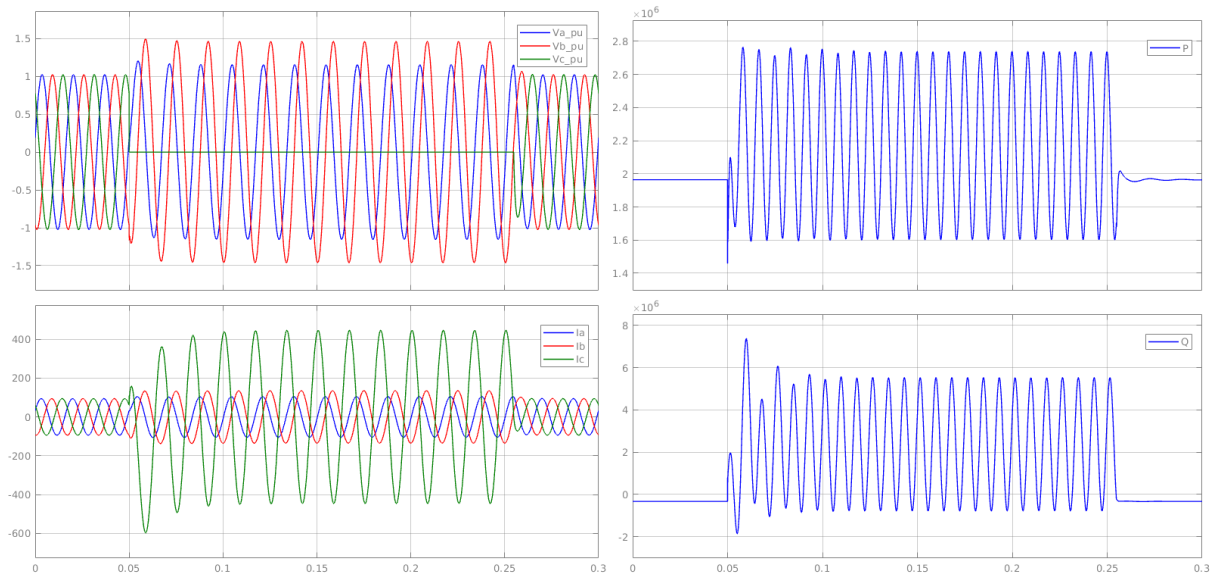


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

também as outras fases. A tensão na fase C durante a falta vai a 0 V enquanto sua corrente aumenta em mais de quatro vezes sendo que as outras fases sofrem uma elevação tanto na tensão como na corrente.

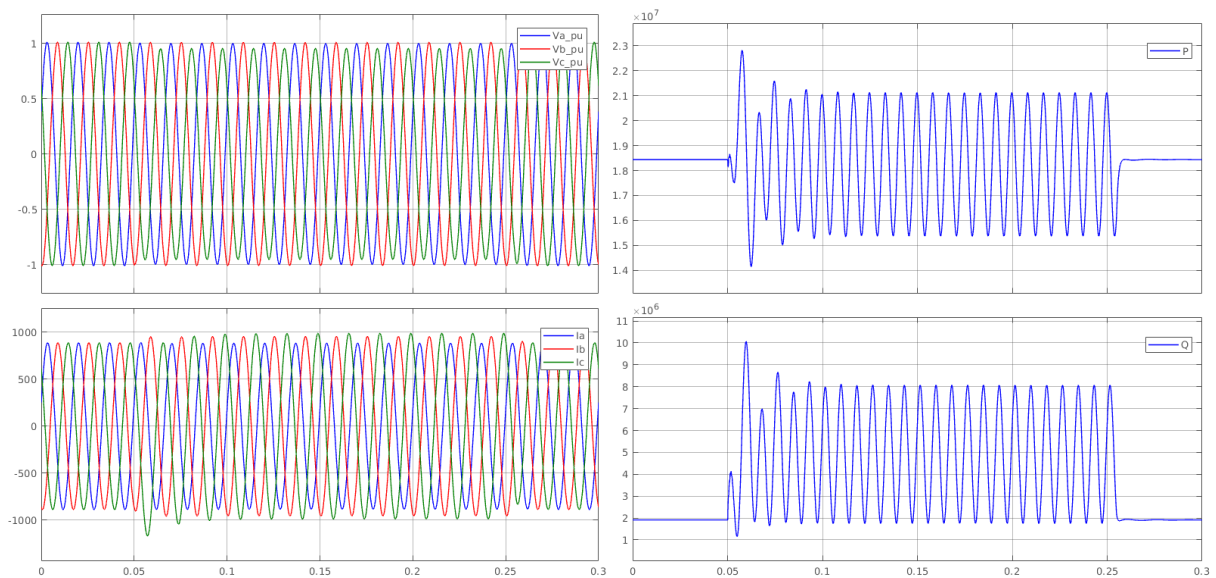
Visto pelo medidor localizado na subestação, a tensão e a corrente possuem pequenas deformidades em V_c , porém, ainda sofre alteração suficiente para causar variações nas potências ativa e reativa, conforme pode ser observado na Figura 95.

Figura 94 – Curto entre fase C e terra visto pelo alimentador FMA 07.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 95 – Curto entre fase C e terra visto pela subestação.

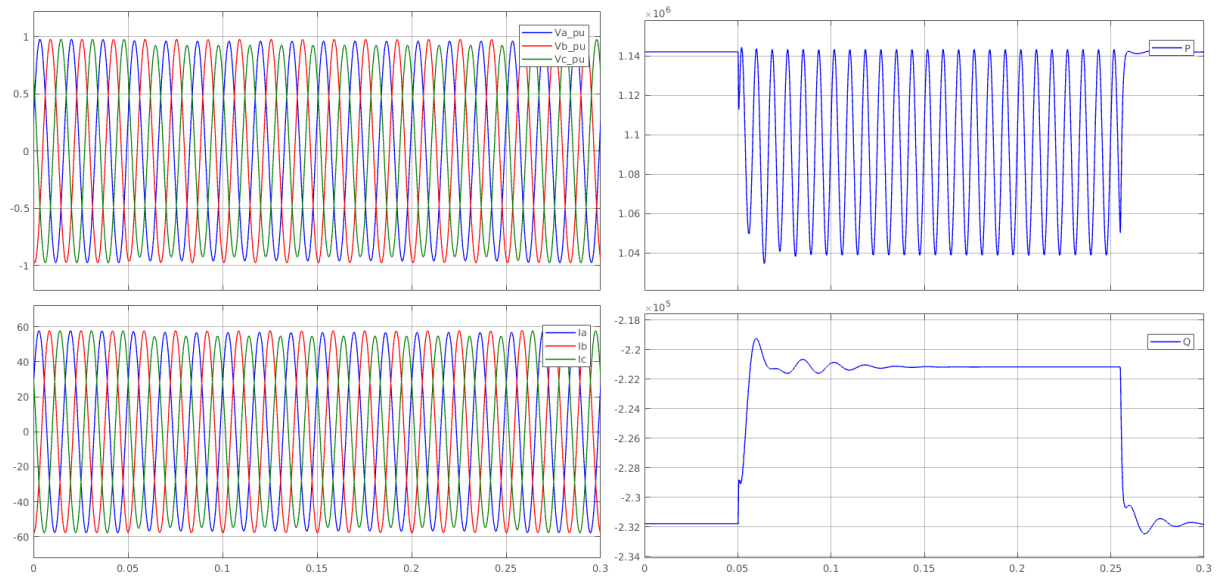


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Já o curto, observado pelo quinto barramento do alimentador FMA 03, é mínimo, sendo que neste caso existe apenas uma pequena diminuição da tensão e da corrente, conforme pode ser observado na Figura 96.

Os resultados obtidos durante as simulações desempenham um papel fundamental no processo de aprendizagem. Através da análise dos comportamentos do sistema elétrico em diferentes cenários simulados, é possível aprimorar a compreensão sobre o funcionamento dos sistemas

Figura 96 – Curto entre fase C e terra visto pelo alimentador FMA 03.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

elétricos de potência. Essa abordagem prática contribui para consolidar os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula, proporcionando uma experiência de aprendizado mais abrangente e aplicada. Dessa forma, os resultados das simulações não apenas enriquecem o aprendizado, mas também preparam os alunos para enfrentar desafios reais no campo da engenharia elétrica.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo demonstrar a utilização da *Toolbox Simscape Electrical* para criação de modelos para estudos que podem ser utilizados em salas de aula. Por meio dos exemplos propostos, o leitor pôde ter uma introdução de como utilizar uma série de blocos pertencentes a *Specialized Power Systems*, além dos blocos do *Simulink* para modelagem e simulação de sistemas elétricos de potência. Também foram demonstradas ferramentas presentes nesta *Toolbox* como, o *Load Flow Analyzer*, o *FFT Analysis* e o *Power Line Parameters*.

Foram montadas duas bases modelo do sistema de distribuição de energia de Formiga, sendo uma delas utilizando cargas estáticas, que foi extensivamente modificado para gerar os exemplos que compõe este trabalho, e outra base com cargas variáveis, que foi utilizada para demonstrar o funcionamento de um sistema mais próximo da realidade. Apesar dos exemplos terem sido executados sobre a base com cargas estáticas para facilitar a visualização dos efeitos que ocorrem durante a simulação, o leitor tem total liberdade para executá-las sobre a base com carga variável.

Os exemplos que fazem parte deste trabalho foram selecionados tentando englobar várias áreas do estudo de um aluno de engenharia elétrica como distribuição de energia, proteção de sistemas elétricos, geração fotovoltaica e qualidade de energia.

O primeiro exemplo demonstrou como um sistema de distribuição opera normalmente, sendo que na base com carga estática o sistema entra em regime permanente após 0,1 segundos. Já com a base de carga variável, o leitor tem o exemplo de como um sistema mais próximo da realidade funciona, contando com as curvas de carga.

O Segundo exemplo demonstrou como os relés 50 e 51 funcionam para a proteção da SE de Arcos, sendo que enquanto o sistema está em operação normal, os relés não operam, porém quando há uma sobrecorrente, o relé 51 irá atuar com tempo estabelecido pela curva de atuação, dependendo do nível de sobrecorrente. Caso haja um curto-circuito, o relé 50 atuará instantaneamente e o relé 51 atuará logo em seguida, como uma forma de proteção extra.

O terceiro exemplo mostra os efeitos da instalação de uma GD no alimentador do sistema de distribuição, sendo possível observar como a potência ativa é injetada na rede, fazendo com que o fator de potência diminua, assim como a inserção de uma GD pode aumentar os harmônicos da rede devido seu inversor de frequência.

O quarto exemplo demonstra um método de utilização da ferramenta de cálculo de fluxo

de potência, fazendo a inserção de uma GD com potência superior a potência absorvida pelas cargas do alimentador, gerando assim um fluxo reverso de potência.

E o quinto e último exemplo demonstra os efeitos causados por curto-circuitos na rede e como eles se propagam desde o ponto onde a falta ocorreu até a subestação ou até o ponto mais distante da falta.

Sendo assim, com a escassez de tutoriais sobre o *Simscape Electrical* no Brasil, pode-se destacar que este trabalho trás para o português, exemplos de como esta ferramenta pode ser utilizada para modelar, simular e analisar sistemas elétricos, facilitando sua compreensão e motivando os alunos de engenharia elétrica através de uma simulações interativa.

6.1 Trabalhos Futuros

Para possíveis trabalhos futuros utilizando esta ferramenta, o autor menciona a capacidade de integração do *Simscape Electrical* com outras *toolboxes* que também fazem parte do *Simulink* como a *Deep Learning Toolbox* e *Statistics and Machine Learning Toolbox* para criação de sistema com inteligência artificial, o *Stateflow* para desenvolvimento de sistemas lógicos e o *Simulink Control Design* para projetar sistemas de controle.

Além disto, vários outros grupos de blocos não foram mencionados neste trabalho que também fazem parte do *Spacialized Power Systems* como o grupo de geradores e motores e o grupo de eletrônica de potência. Também há toda a família de blocos *Simscape* que, além da área elétrica, visto neste trabalho, também simulam sistemas mecânicos e de fluidos, sendo que todos tem a capacidade de interagir entre si.

REFERÊNCIAS

ALLEN, E. et al. Interactive object-oriented simulation of interconnected power systems using simulink. **IEEE Transactions on Education**, v. 44, n. 1, p. 87–94, 2001. Citado na página 20.

ANDRADE, F. de; CASTILLA, M.; BONATTO, B. **Basic Tutorial on Simulation of Microgrids Control Using MATLAB® & Simulink® Software**. Springer International Publishing, 2020. (SpringerBriefs in Energy). ISBN 9783030430139. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=TVTUDwAAQBAJ>>. Citado na página 20.

ANDRADE, M. E. d.; BUFFON, L. O.; JUNIOR, A. S. O uso de um software de simulações para a aprendizagem de circuitos elétricos simples: uma abordagem a partir do ensino por investigação. **Revista do Professor de Física**, v. 2, n. 2, ago. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/12078>>. Citado na página 20.

BARROS, B. D.; GEDRA, R.; BORELLI, R. **Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo de Energia Elétrica**. Saraiva Educação S.A. ISBN 9788536509341. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=5YmwDwAAQBAJ>>. Nenhuma citação no texto.

CEMIG. **ND-2.1 - Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas**. [S.l.], 2002. Acessado em 05/04/2023. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd-2-1-instalacoes-basicas-de-redes-de-distribuicao-aereas-urbanas.pdf>>. Citado na página 31.

DAS, S. **Modeling and Simulation of Mechatronic Systems using Simscape**. Morgan & Claypool Publishers, 2020. (Synthesis Lectures on Mechanical Engineering). ISBN 9781681737355. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=khjWDwAAQBAJ>>. Nenhuma citação no texto.

DELAVARI, A.; KAMWA, I.; BRUNELLE, P. Simscape power systems benchmarks for education and research in power grid dynamics and control. In: **2018 IEEE Canadian Conference on Electrical Computer Engineering (CCECE)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

ESHKABILOV, S. **Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional**. Apress, 2019. ISBN 9781484250617. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=t_bADwAAQBAJ>. Nenhuma citação no texto.

ESHKABILOV, S. L. **Practical MATLAB Modeling with Simulink: Programming and Simulating Ordinary and Partial Differential Equations**. Apress, 2020. ISBN 9781484257999. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=1d7bDwAAQBAJ>>. Nenhuma citação no texto.

FILHO, J. M. **Manual De Equipamentos Elétricos**. LTC, 2013. ISBN 9788521622116. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Qj6CmwEACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

FOLTIN, M.; ERNEK, M.; HNÁT, J. Simpowersystems in education. In: **14th Annual Conference Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

FRANCISQUINI, A. A. **Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição**. 108 pg. Monografia (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <<https://>>

[//www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/161_dissertacao_aislan_antonio_francisquini.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/161_dissertacao_aislan_antonio_francisquini.pdf)>. Citado na página 27.

GERENAL-CABLE. **Electric Utility: Energy Products for Power Generation, Transmission and Distribution**. [S.l.], 2016. Acessado em 05/04/2023. Disponível em: <<https://www.anixter.com/content/dam/Suppliers/Prysmian/Electric%20Utility%20Products%20CA.pdf>>. Citado na página 30.

GONEN, T. **Electric Power Distribution Engineering**. CRC Press, 2015. ISBN 9781482207057. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=JIDSBQAAQBAJ>>. Citado na página 24.

HASSELL, T. J.; WEAVER, W. W.; OLIVEIRA, A. M. Using matlab's simscape modeling environment as a simulation tool in power electronics and electrical machines courses. In: **2013 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 477–483. Nenhuma citação no texto.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. d.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. [S.l.]: Edgard Blucher, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.

KALBANDHE, S. H.; BHASME, N. R. Modeling simulation of a 100/22 kv transmission substation for energy audit. **International Journal of Electrical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 35–44, 2016. Disponível em: <http://www.irphouse.com/ijee16/ijeev9n1_05.pdf>. Citado na página 20.

KARRIS, S. **Introduction to Simulink with Engineering Applications**. Orchard Publications, 2006. (EngineeringPro collection). ISBN 9780974423975. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=L2JYZYI_1_wC>. Citado na página 36.

KERSTING, W. **Distribution System Modeling and Analysis, Third Edition**. Taylor & Francis, 2012. ISBN 9781439856222. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=a-MY5JLUTKYC>>. Nenhuma citação no texto.

LODER, L. L.; BENDER, F. A. O uso de programas de simulação em cursos de engenharia: possibilidades e necessidades. **Anais XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 2007. Citado na página 21.

MACÊDO, J.; DICKMAN, A.; ANDRADE, I. Simulações computacionais como ferramentas para o ensino de conceitos básicos de eletricidade. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, out. 2012. Citado na página 20.

MATHWORKS. **Learning Simulink 6, 14th Edition**. [S.l.]: Mathworks, 2005. ISBN 9780975578773. Citado na página 33.

MATHWORKS. **power_lineparam**. 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/power_lineparam.html>. Citado na página 121.

MATHWORKS. **Simscape Electrical User's Guide**. [S.l.], 2023. Acessado em 12/05/2023. Disponível em: <https://in.mathworks.com/help/pdf_doc/sps/sps Ug.pdf>. Citado na página 33.

MATHWORKS. **Simscape Electrical User's Guide (Specialized Power Systems)**. [S.l.], 2023. Acessado em 12/05/2023. Disponível em: <https://in.mathworks.com/help/pdf_doc/sps/powersys Ug.pdf>. Citado na página 35.

- MATHWORKS. **Simulink Getting Started Guide**. [S.l.], 2023. Acessado em 13/05/2023. Disponível em: <https://in.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/simulink_gs.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 35.
- MCDONALD, J.; SAFARI; COMPANY, O. M. **Electric Power Substations Engineering, 3rd Edition**. CRC Press, 2012. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=S3-LzQEACAAJ>>. Citado na página 29.
- MEIER, A. von. **Electric Power Systems: A Conceptual Introduction**. Wiley, 2006. (Wiley Survival Guides in Engineering and Science). ISBN 9780470036402. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bWAI22IB3lkC>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.
- MOKHTARI, M.; MARTAJ, N. **Electronique Appliquée, Electromécanique sous Simscape SimPowerSystems (Matlab/Simulink)**. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 978-3-642-24200-7. Citado na página 21.
- OLIVEIRA, C. C. B. d. et al. **Introducao a sistemas eletricos de potencia: componentes simétricas**. [S.l.]: Edgard Blucher, 1996. Citado na página 24.
- OSETORELÉTRICO. **Conceitos básicos de eletrotécnica aplicada – Parte 3**. 2023. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/conceitos-basicos-de-eleotecnica-aplicada-a-curva-de-carga/>>. Citado na página 27.
- PERELMUTER, V. **Electrotechnical Systems: Simulation with Simulink® and SimPowerSystems™**. Taylor & Francis, 2012. ISBN 9781466514027. Disponível em: <https://books.google.sm/books?id=qgoZ0sc_C5YC>. Nenhuma citação no texto.
- PERELMUTER, V. **Renewable Energy Systems: Simulation with Simulink® and SimPowerSystems™**. CRC Press, 2016. ISBN 9781315316222. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=wKGiDQAAQBAJ>>. Nenhuma citação no texto.
- ROBBA, E. et al. **Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica**. Editora Blucher, 2020. ISBN 9786555060096. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=2qcWEAAAQBAJ>>. Citado na página 24.
- SALLAM, A.; MALIK, O. **Electric Distribution Systems**. Wiley, 2011. (IEEE Press Series on Power and Energy Systems). ISBN 9781118002216. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=zGibio0s9ysC>>. Citado na página 24.
- SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia: Fundamentos e Prática**. Elsevier Brasil, 2017. ISBN 9788535268874. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=WFzjBwAAQBAJ>>. Citado na página 26.
- SHORT, T. **Electric Power Distribution Handbook**. Taylor & Francis, 2003. (Electric power engineering series Electric power distribution handbook). ISBN 9780849317910. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6uNEbeNoiJUC>>. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 28.
- TEIXEIRA, G. L. S. **Análise técnico-econômica dos alimentadores e transformadores da subestação de distribuição de Formiga**. 110 pg. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Instituto Federal Minas Gerais – Campus Formiga, Formiga - MG, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 32.

VOURNAS, C. et al. An educational simulation tool for power system control and stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 1, p. 48–55, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

WIDIYATMOKO, A. The effectiveness of simulation in science learning on conceptual understanding : A literature review. **Journal of International Development and Cooperation**, mar. 2018. Citado na página 20.

XUE, D.; CHEN, Y. **System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink**. Wiley, 2013. (No Longer used). ISBN 9781118694374. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6d7iAAAAQBAJ>>. Citado na página 37.

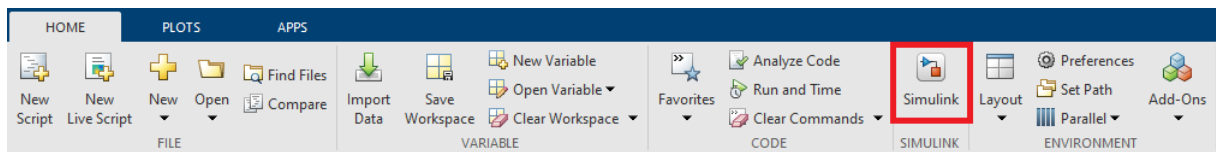
ZANETTA, L. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Pôtencia**. Editora Livraria da Física, 2006. ISBN 9788588325418. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Nyep7l_kBFkC>. Citado na página 24.

ANEXO A – MONTAGEM DETALHADA DO SISTEMA

A.1 Iniciando um projeto *Simulink/Simscape*

Para iniciar um projeto do *Simulink/Simscape*, primeiramente é necessário iniciar o ambiente de desenvolvimento do *Simulink* clicando no ícone localizado na *Tootstrip* da aba *Home*, conforme indicado na Figura 97.

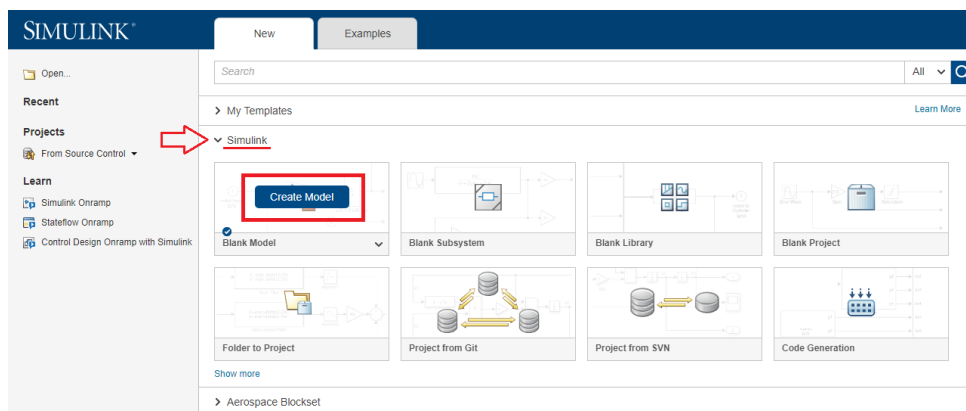
Figura 97 – Aba inicial *Home* do MATLAB.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na tela inicial do ambiente *Simulink*, abra o *drop down* com o nome *Simulink* e na opção *Blank Model* clique em *Create Model* como demonstrado na Figura 98.

Figura 98 – Tela inicial do ambiente de trabalho do *Simulink*

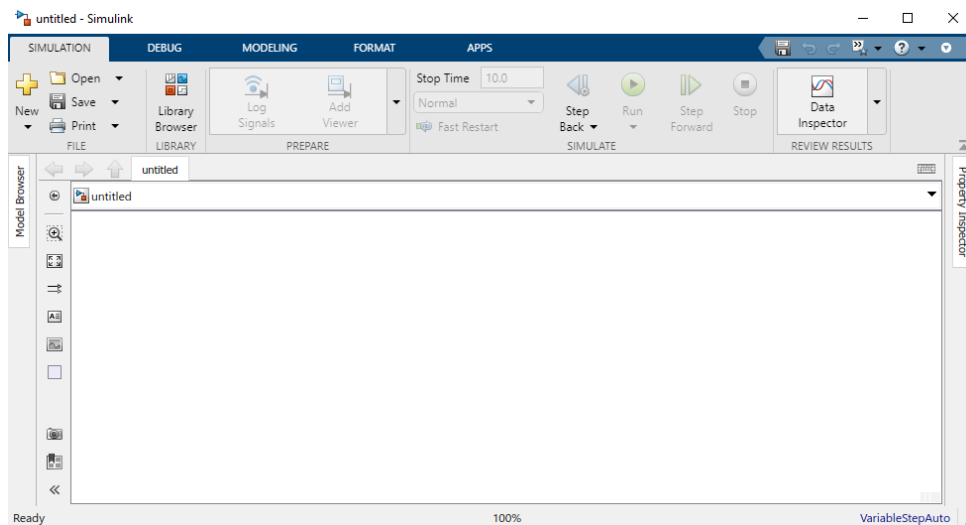


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

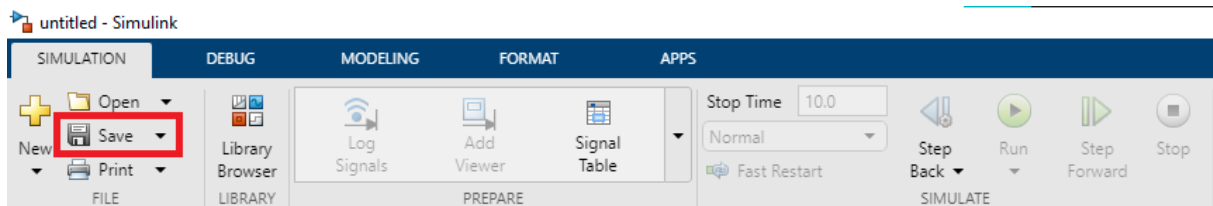
Ao clicar em *Create Model* o *Simulink* abrirá uma nova janela contendo um projeto em branco conforme Figura 99. O tempo para que esta tela se abra pode variar de acordo com a capacidade de processamento do seu computador.

Após a abertura do ambiente de desenvolvimento do *Simulink*, é sempre recomendado salvar o projeto. Para salva-lo, clique em *Save*, no canto superior esquerdo na aba *Simulation* conforme Figura 100.

Ao clicar no *Save*, uma nova janela será aberta para que o leitor nomeie o projeto e escolha o local onde o arquivo será salvo.

Figura 99 – Janela do editor *Simulink*.

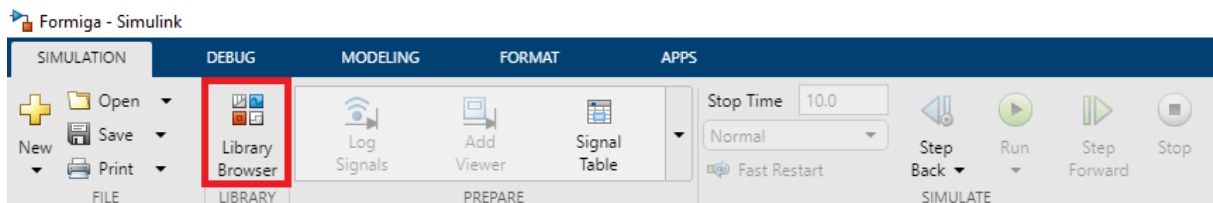
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 100 – Localização do botão *Save*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.2 Adicionando os blocos *Simscape* no projeto

Para começar a adicionar os blocos necessários para a montagem do sistema, é necessário abrir a biblioteca de blocos do *Simulink*. Clicando no botão *Library Browser*, localizado na aba *Simulation*, conforme Figura 101, será aberta uma nova janela. Este processo pode demorar alguns instantes pois o *Simulink* estará listando todas as suas ferramentas disponíveis.

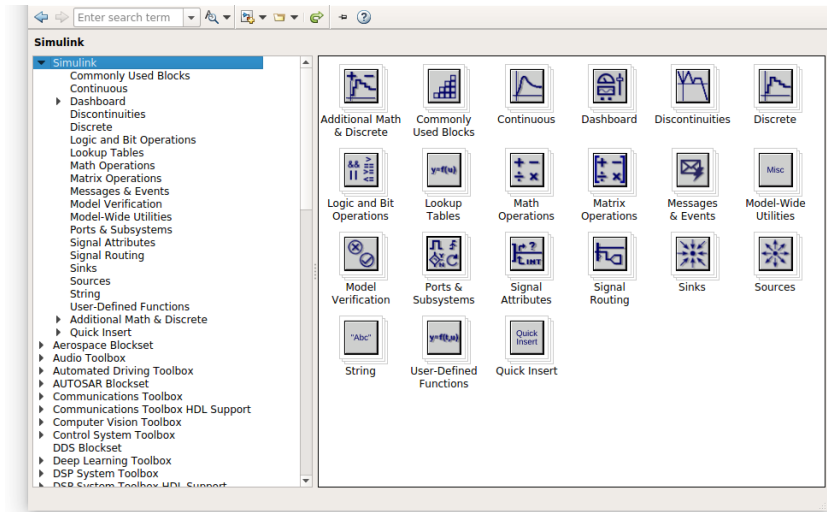
Figura 101 – Localização do botão *Library Browser*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O *Library Browser*, apresentado na Figura 102, contém todos os blocos que compõem o ambiente *Simulink* e as *Toolbox* que o leitor escolheu durante a instalação do MATLAB, sendo

uma destas o *Simscape*. Ao lado esquerdo da janela encontram-se as *Toolbox* separadas por categorias, e a direita os blocos que a compõe.

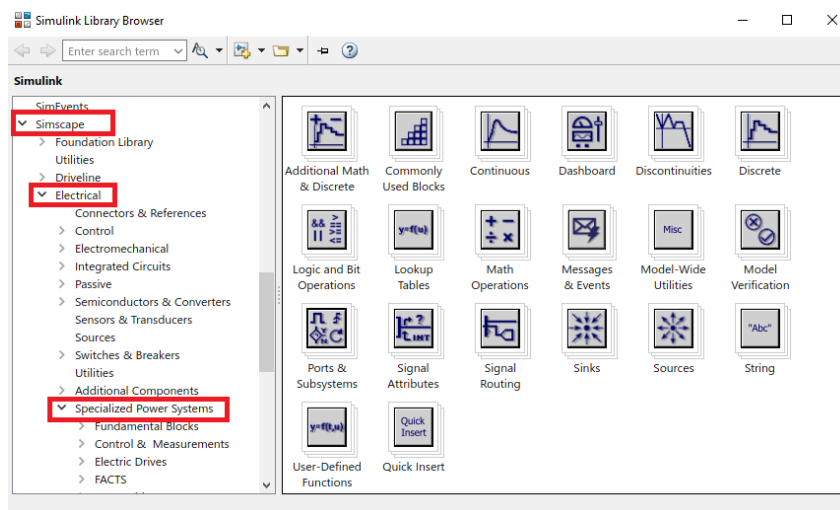
Figura 102 – Janela do *Library Browser*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para adicionar os blocos do *Simscape*, o leitor deverá localizar o *menudrop down Simscape*, em seguida o menu *Electrical*. A *Toolbox Simscape Electrical* contém centenas de blocos separados pela sua funcionalidade, no caso do presente trabalho será utilizado os blocos da categoria *Specialized Power Systems*. A Figura 103 mostra a sua localização.

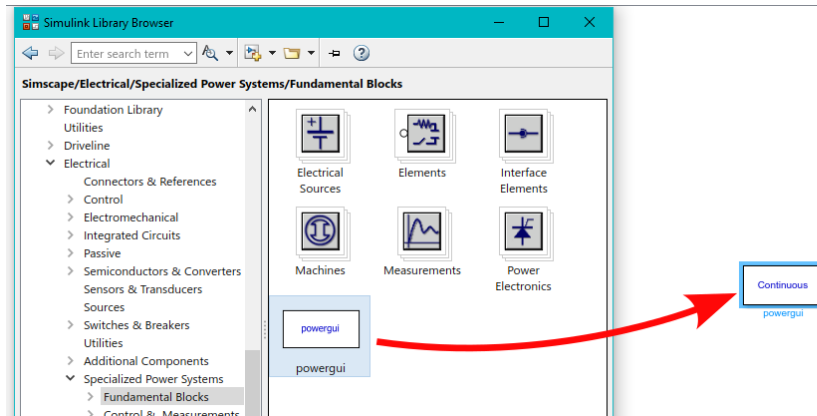
Figura 103 – Localização do *Specialized Power Systems*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A inserção do bloco na janela do projeto pode ser feita de dois modos, utilizando arrasta e solta (*Drag and Drop*), como mostrado na Figura 104, sendo o método mais comum utilizado.

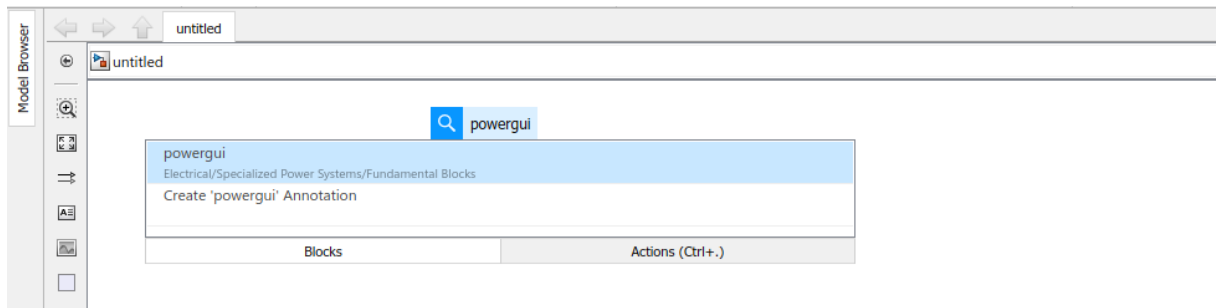
Figura 104 – Adicionando blocos por arrasta e solta.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No segundo método, caso o leitor saiba o nome correto do bloco, ele pode simplesmente dar dois cliques na tela e digitar o nome do bloco. Logo abaixo irá aparecer uma lista com os itens que correspondem ao nome e o local onde este bloco pode ser encontrado, conforme Figura 105.

Figura 105 – Adicionando blocos por meio do nome.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

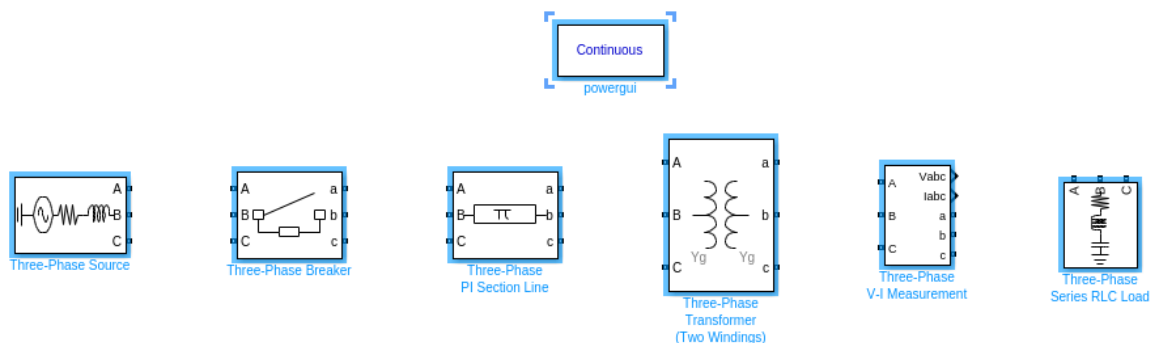
O bloco essencial para o funcionamento do *Simscape* é o *powergui*. Este bloco contém as configurações para a simulação, além de outros aplicativos de análise do sistema. Caso esse bloco não seja adicionado nas simulações utilizando os blocos do *Specialized Power Systems*, a simulação não ocorrerá. Utilizando um dos dois métodos, é necessário incluir os blocos que serão utilizados, dentre eles estão:

- Fonte Trifásica (*Three-Phase Source*) encontrado dentro de *Specialized Power Systems* -> *Sources*.
- Chave Trifásica (*Three-Phase Breaker*) encontrado dentro de *Specialized Power Systems* -> *Power Grid Elements*.

- Linha Trifásica Seção PI (*Three-Phase PI Section Line*) encontrado dentro de *Specialized Power Systems -> Power Grid Elements*.
- Transformador Trifásico de Dois Enrolamentos (*Three-Phase Transformer (Two Windings)*) encontrado dentro de *Specialized Power Systems -> Power Grid Elements*.
- Medidor V-I Trifásico (*Three-Phase V-I Measurement*) encontrado dentro de *Specialized Power Systems -> Sensors and Measurements*.
- Carga trifásica RLC em série (*Three-Phase Series RLC Load*) encontrado dentro de *Specialized Power Systems -> Passives*.

Com os blocos inclusos no projeto, mostrado na Figura 106, é possível a montagem do sistema base de Formiga-MG. A montagem dos blocos tipo máscara que servirão como as cargas variáveis, serão tratadas na seção A.5 deste anexo.

Figura 106 – Blocos base para a montagem do sistema.



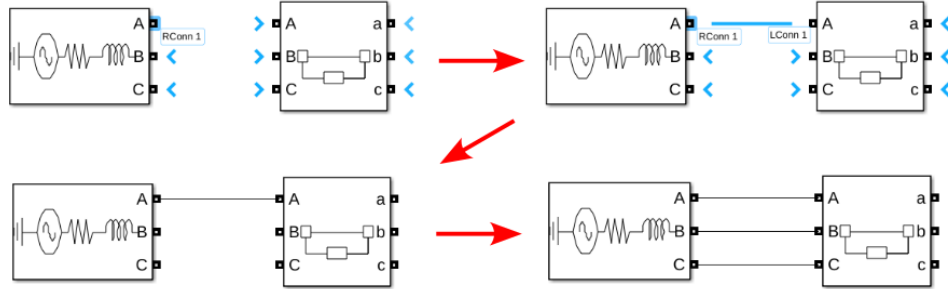
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.3 Como criar conexões entre os blocos

Para realizar conexões entre blocos, o leitor pode simplesmente clicar em uma das portas de saída de um bloco e clicar em uma porta de entrada de outro bloco. Ao clicar em uma porta de saída, todas as portas com o qual é possível fazer conexão mostrarão uma seta azul. Ao colocar o ponteiro sobre uma dessas setas, uma linha azul aparecerá, indicando que a conexão é possível. E ao clicar, a conexão será criada sendo indicada por uma linha preta entre os blocos, logo, o leitor deve repetir o processo para as três fases, conforme Figura 107.

Estas conexões também podem ser feitas apenas clicando em uma saída do bloco e arrastando até a porta de entrada de outro bloco. Caso a conexão não seja efetuada ou caso um

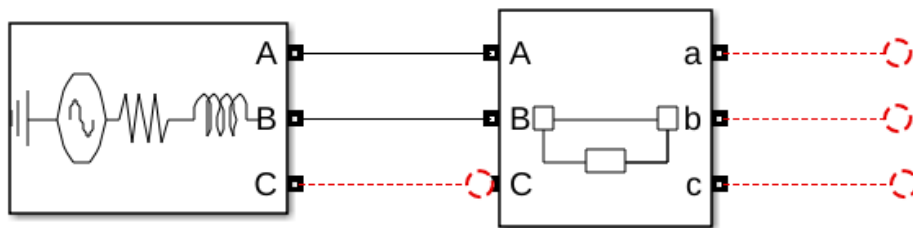
Figura 107 – Criando conexão entre os blocos do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

bloco seja deletado, após já estar conectado a outros blocos, o condutor tomará a forma de uma linha tracejada vermelha, conforme Figura 108.

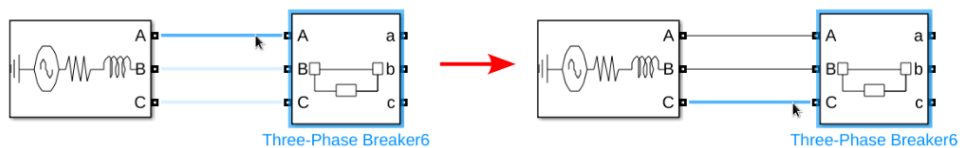
Figura 108 – Falha na conexão entre blocos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Outra maneira bem rápida de se conectar os blocos, é apenas alinhando as portas de entrada e saída entre dois blocos e os aproximando. Ao fazer isto, linhas azuis entre as portas se tornarão visíveis e para realizar a conexão o leitor deve apenas clicar nestas linhas, demonstrado na Figura 109.

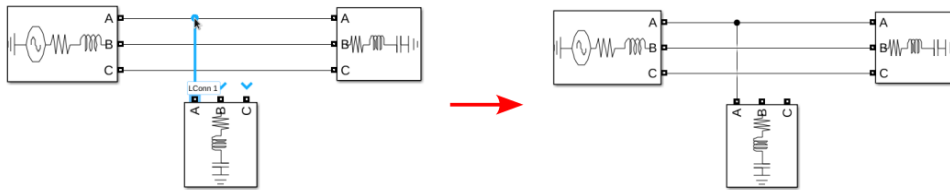
Figura 109 – Conexão entre blocos por proximidade.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Utilizando estes métodos também é possível fazer derivações entre blocos já conectados, apenas clicando em uma porta de saída e colocando o ponteiro sobre uma conexão já existente, uma indicação de derivação naquele ponto aparecerá, ao clicar esta conexão será estabelecida, conforme Figura 110.

Figura 110 – Criando derivação entre conexões.

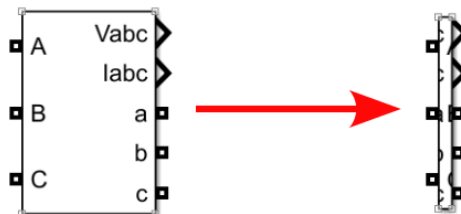


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.4 Modificando o Medidor V-I Trifásico (*Three-Phase V-I Measurement*)

A modificação do medidor serve para ter uma aparência mais próxima de uma 'barra' encontrada no diagrama unifilar do sistema de transmissão/distribuição, além de setar configurações que serão usadas durante a simulação. Inicialmente, será feita a alteração em sua espessura e sua cor, para que tenha a aparência de uma barra. Para isso, ao colocar ponteiro do mouse sobre o bloco, pequenos quadrados aparecerão em cada extremidade e ao colocar o ponteiro do mouse sobre uma destas, clique e arraste até que o mesmo fique bem fino, conforme Figura 111.

Figura 111 – Redimensionamento do bloco de medição.



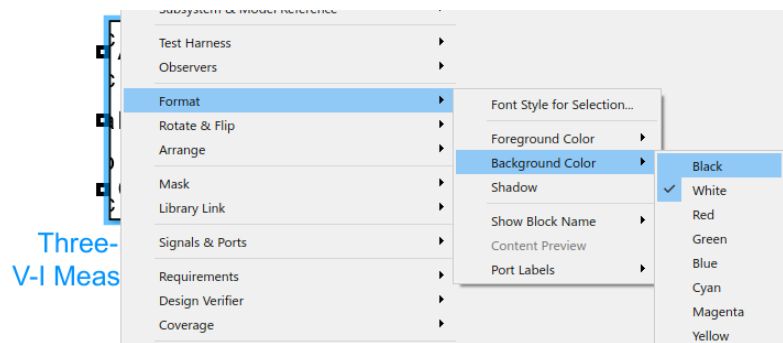
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com o medidor redimensionado, agora será necessário trocar a cor de fundo do bloco. Para isso, clique com o botão direito sobre o bloco e vá no menu *Format -> Background Color* e neste menu selecione a opção *black*, conforme Figura 112.

Para o próximo passo é necessário abrir as configurações do bloco, para isso o leitor deve dar dois cliques sobre o bloco. Na janela de configurações do bloco, selecione a opção *Voltages in pu* para que a tensão seja medida em PU. Isso fará com que uma nova caixa de texto apareça ao final da janela de propriedades, para que seja informada a tensão nominal para o cálculo de PU, neste caso, para os medidores que ficarão antes da SE de Formiga, este valor deve ser de 69kV e para os medidores na saída da SE para os alimentadores o valor será de 13.8kV.

Também selecione a opção *Use a Label*, tanto para tensão, quanto para corrente. Ao

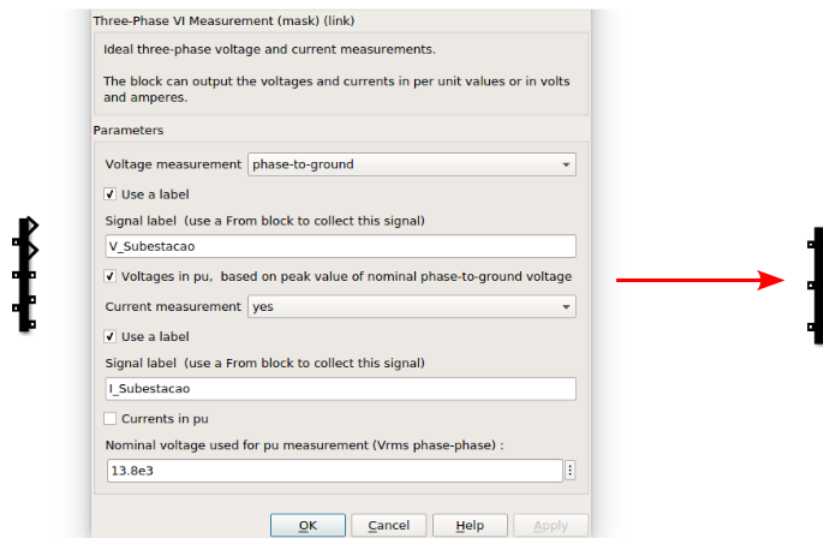
Figura 112 – Troca de cor do bloco.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

selecionar a opção *Use a Label*, o leitor está indicando que usará um nome, também chamada de *Tag*, para identificar a tensão e a corrente medida, desta forma os conectores *Simulink*, antes presentes no bloco do medidor, serão removidos, contando agora apenas com conectores *Simscape*, conforme mostra Figura 113.

Figura 113 – Bloco de medição modificado.



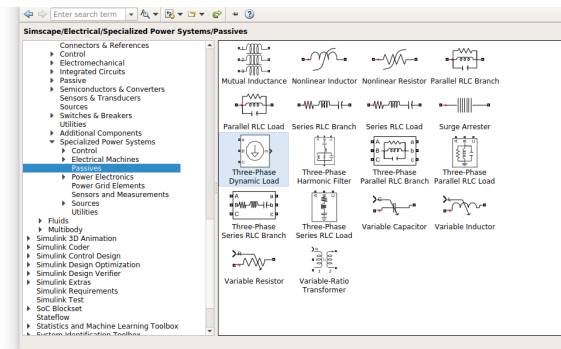
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O medidor está finalizado e pronto para ser utilizado, lembrando que o *Label* deverá ser especificado em cada parte do sistema para que seja utilizado para fazer a medição correta. Este processo de redimensionamento e alteração de cores pode ser feito em qualquer outro bloco presente no *Simulink/Simscape*.

A.5 Carga variável: Montagem de blocos tipo subsistema e máscara

Para montar a o bloco de carga, que será utilizada no sistema, será necessário a inclusão do bloco de carga dinâmica (*Three-Phase Dynamic Load*), mostrado na Figura 114, que pode ser encontrado dentro de *Specialized Power Systems -> Passives*.

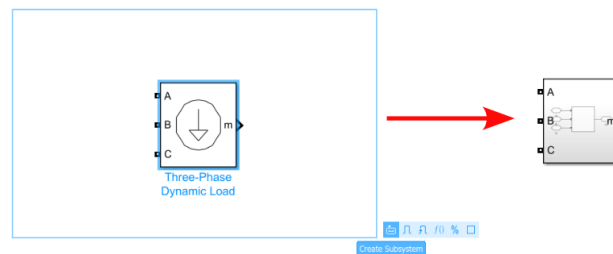
Figura 114 – Bloco de carga dinâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com o bloco de carga dinâmica no projeto, será criado um subsistema que irá conter todos os outros blocos que farão parte do bloco de carga final. Para criar um subsistema, o leitor deve apenas clicar e arrastar, dentro da janela do editor, criando um quadro de seleção contendo o bloco da carga dinâmica, ao soltar o clique do mouse, um quadro azul aparecerá e no canto ao qual o mouse do leitor finalizou a seleção, aparecerá três pontos azuis. Ao colocar o ponteiro sobre estes três pontos azuis a opção para transformar esta seleção em um subsistema estará disponível com o nome *Create Subsystem*. Ao clicar na opção *Create Subsystem* todos os blocos que estiverem dentro do quadro de seleção serão encapsulados em apenas um bloco, no caso deste projeto, apenas o bloco de carga dinâmica, conforme Figura 115.

Figura 115 – Criação de um subsistema.

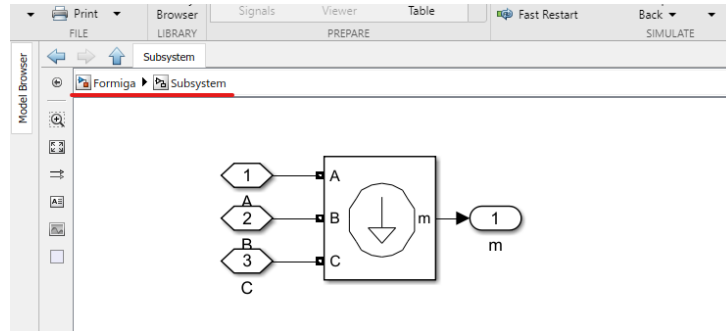


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para entrar no subsistema é necessário apenas dois cliques, desta forma o leitor poderá modificar o subsistema internamente sem alterar o projeto principal. Como um subsistema

pode conter outros subsistemas, o *Simulink* irá indicar ao leitor o caminho do atual subsistema, conforme Figura 116, desta forma o leitor sempre saberá em qual nível do sistema ele está interagindo.

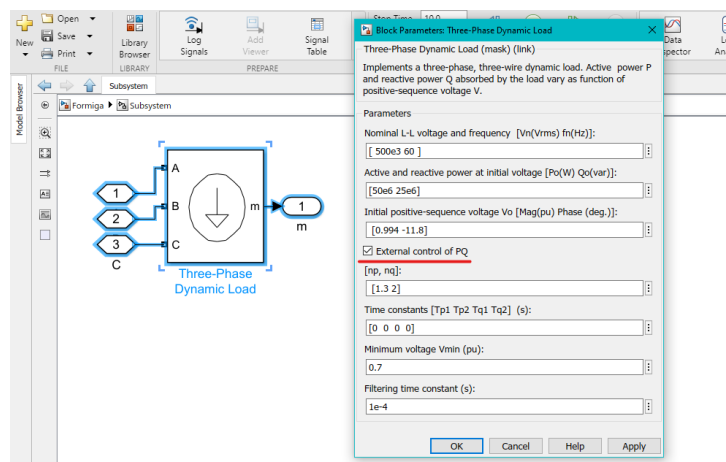
Figura 116 – Caminho atual subsistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A carga dinâmica que será criada para este projeto deverá receber alguns parâmetros para seu funcionamento, sendo estes: tensão nominal de linha, frequência nominal, fator de potência e carga inicial. O controle da carga será feito de forma externa, sendo assim o leitor poderá incluir o formato da curva de carga para controlar este bloco. Desta forma é necessário configurar o bloco de carga dinâmica para aceitar entrada externa. Abrindo as configurações da carga dinâmica ative a opção *External control of PQ* conforme Figura 117. Desta forma irá surgir uma nova conexão *Simulink* no bloco de carga dinâmica.

Figura 117 – Alteração de parâmetros do bloco de carga.

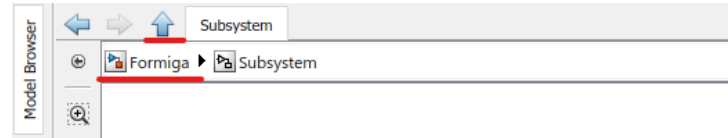


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para transformar este subsistema em um bloco tipo máscara, que diferente do subsistema contem parâmetros que podem ser ajustados, o leitor deve retornar ao nível do projeto principal

clicando no nome do projeto, que se encontra na barra com o nível hierárquico, ou na seta azul para subir um nível na hierarquia, conforme Figura 118.

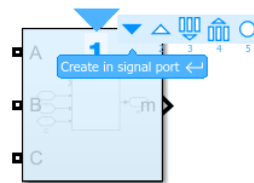
Figura 118 – Voltar para o nível do projeto principal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No nível principal será adicionado uma *signal port*, ou porta de sinal de entrada ao subsistema da carga por onde será conectado a curva de carga. Para isto basta colocar o ponteiro do mouse em um das bordas do subsistema e o ponteiro do mouse irá mostrar um sinal de mais (+) indicando que pode ser adicionado uma porta de sinal, ao clicar será aberto um mini-menu para escolher o formato da porta, neste caso deve-se escolher o item *Create in signal port*, mostrado na Figura 119, já que queremos inserir informações ao interior deste subsistema por essa porta.

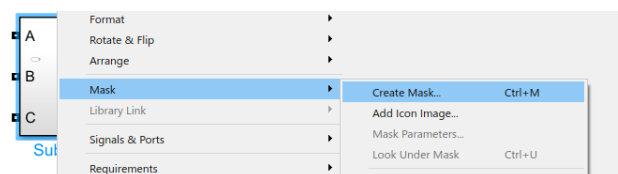
Figura 119 – Adicionando porta de entrada de sinal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com a porta de sinal de entrada criada pode então ser criado o bloco tipo máscara. Para isto clique com o botão direito sobre o subsistema vá no menu *Mask* -> *Create Mask*, conforme Figura 120.

Figura 120 – Menu para criação de um bloco tipo máscara.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

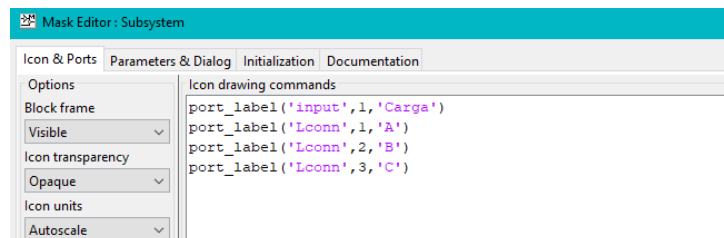
Uma nova janela chamada *Mask Editor* será aberta para edição deste bloco tipo máscara. O *Mask Editor* é separado em quatro abas, sendo elas *Icon & Ports*, *Parameters & Dialog*, *Initialization* e *Documentation*. Na aba *Icon & Ports* o leitor pode adicionar um ícone no bloco

utilizando o comando `image(imread('NomeDaImagem.formato'))`, trocar a cor dos textos que compõe o bloco utilizando o comando `color('Nome da Cor em Inglês')`, e renomear as portas de entrada e saída do bloco com o comando `port_label('Tipo da porta', Numero da Porta, 'Nome da Porta')`. Deste modo iremos trocar o nome das portas do bloco para facilitar a identificação utilizando os comandos abaixo:

- `port_label('input',1,'Carga')`
- `port_label('Lconn',1,'A')`
- `port_label('Lconn',2,'B')`
- `port_label('Lconn',3,'C')`

O primeiro comando `port_label('input',1,'Carga')` está renomeando a entrada 1 do tipo `input` com o nome de 'Carga'. Os demais comandos estão nomeando as entradas 1, 2 e 3 do tipo `Lconn` *Left Connection* com os nomes 'A', 'B' e 'C'. Caso seu bloco tenha conexões no lado direito do bloco, utilize o tipo `Rconn` (*Right Connection*). A primeira aba deve estar como a Figura 121 demonstra.

Figura 121 – Configurações da aba *Icon & Ports*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

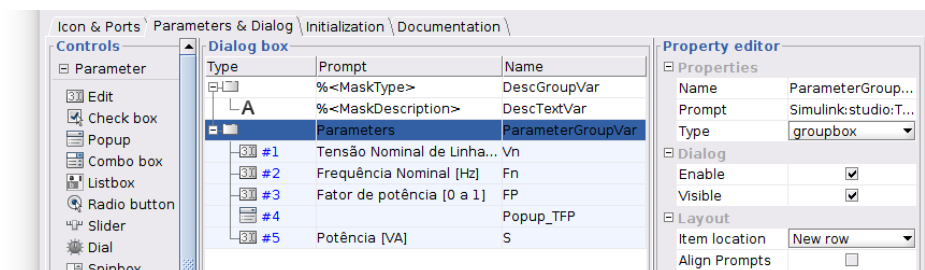
A aba *Parameters & Dialog* é onde se cria a tela de parâmetros e variáveis ao qual o leitor terá acesso fácil para alterações. No canto esquerdo da tela encontram-se todos os tipos de controles que se pode usar para se criar uma interface mais intuitiva. No centro estão os controles pre-prontos da máscara, sendo que estão separados por pastas. A primeira pasta contém um objeto do formato texto que mostrará ao leitor a documentação do bloco. Já a segunda pasta é onde ficarão os parâmetros. No lado direito da tela está o editor de propriedades onde o leitor pode ajustar cada controle que é adicionado como parâmetro. Para este projeto, como já tinha sido descrito, será criado 4 parâmetros, tensão nominal de linha, frequência nominal, fator de potência e potência nominal. Sendo assim serão adicionados quatro controles do tipo *Edit*. Ao clicar no controle *Edit*, um novo item será adicionado na lista de parâmetros, desta forma os quatro

controles devem ser adicionados. A configuração é bem simples, a coluna *prompt* é nome que será mostrado na tela de configurações do bloco, logo deve-se colocar um nome auto-explicativo e com a unidade a ser inserida. Na coluna *Name* é o nome da variável que a máscara tratará estes dados quando forem preenchidos pelo leitor no momento de configuração do bloco para simulação, desta forma preencha estas informações da seguinte forma:

- **Edit #1 = Prompt:** Tensão Nominal de Linha [Vrms], **Name:** Vn
- **Edit #2 = Prompt:** Frequência Nominal [Hz], **Name:** Fn
- **Edit #3 = Prompt:** Fator de Potência [0 a 1], **Name:** FP
- **Popup #4 = Name:** Popup_TFP
- **Edit #5 = Prompt:** Potência [VA], **Name:** S

Os parâmetros devem estar dispostos conforme Figura 122.

Figura 122 – Configurações da aba *Parameters & Dialog*.



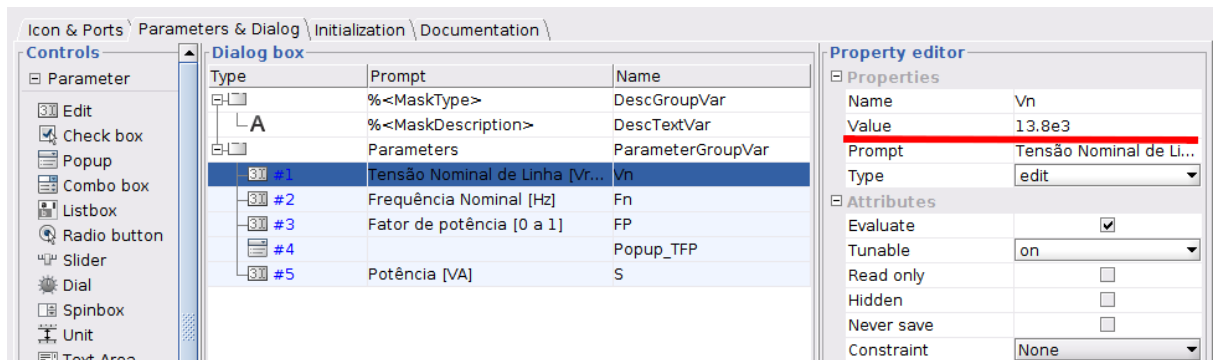
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após a criação de cada parâmetro, altere o *value* na *Property Editor*, que indica o valor padrão de cada um dos parâmetros conforme Figura 123. Para tensão nominal altere para 13.8e3, indicando 13.8kV, a frequência nominal, 60, para fator de potência, 0.95 e para carga nominal, 100e3. Estes valores poderão ser alterados a qualquer momento pela tela de parâmetros.

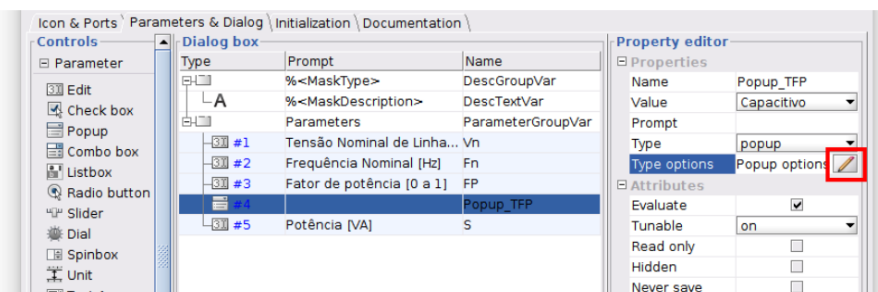
O *Popup* será utilizado para selecionar o tipo de fator de potência da carga, se é indutivo ou capacitivo. Para criar estes itens, selecione o *popup* na lista e em *Property editor* clique no botão ao lado de *Popup Options* conforme Figura 124.

Ao clicar no botão, uma nova janela será aberta contendo uma área de texto onde o leitor deverá colocar a lista de itens que fazem parte do *popup*, separados por uma quebra de linha. No caso deste trabalho, será inserido apenas os itens "Indutivo" e "Capacitivo" conforme Figura 125.

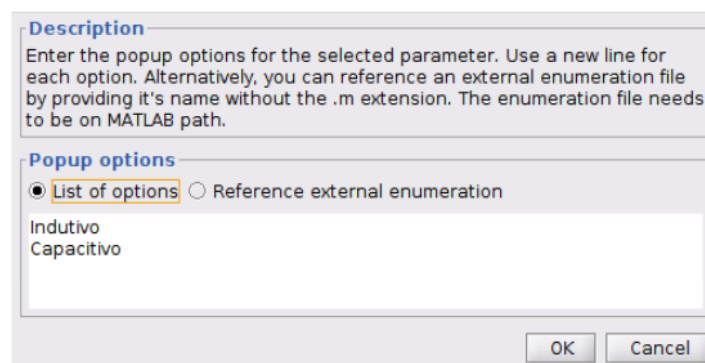
Figura 123 – Adicionando valor padrão para um parâmetro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 124 – Configuração do *popup*.

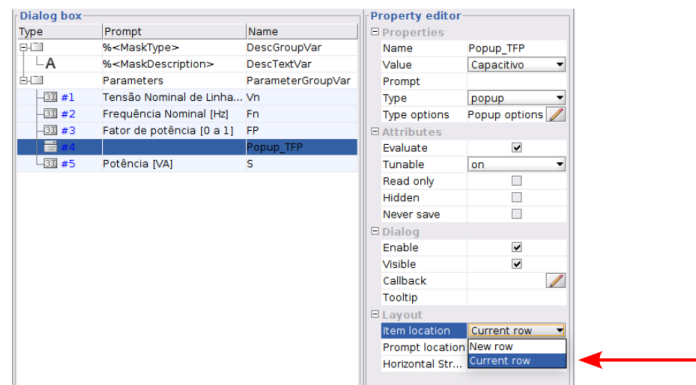
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 125 – Adicionando itens no *popup*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para terminar a configuração do *popup* deve-se alterar a opção *Iten Location* para *Current Row*, mostrado na Figura 126, fazendo assim com que o *popup* fique na mesma linha que a configuração do fator de potência deixando a tela de configuração de parâmetros deste bloco mais organizado.

Na aba *Initialization* qualquer comando que seja adicionado a área de texto, será executado

Figura 126 – Alterando a posição do *popup*.

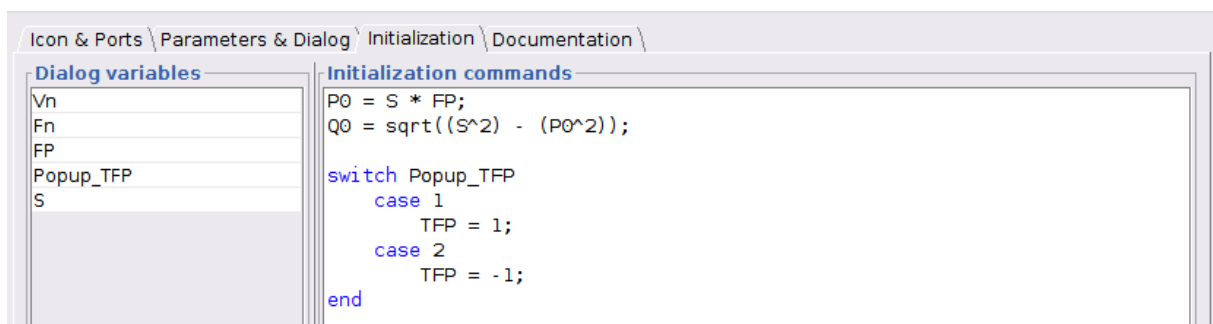
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

antes da simulação. Deste modo, será necessário passar o valor de duas variáveis que são utilizadas para o cálculo de fluxo de potência. Estas duas variáveis são a P_0 e Q_0 que indicam a potência ativa inicial e a potência reativa inicial do bloco interno *Dynamic Load*. Para atribuir esses valores necessários e de forma dinâmica, será inserido o seguinte código na área de texto do *Initialization* conforme Figura 127.

```

1 P0 = S * FP;
2 Q0 = sqrt((S^2) - (P0^2));
3
4 switch Popup_TFP
5     case 1
6         TFP = 1;
7     case 2
8         TFP = -1;
9 end

```

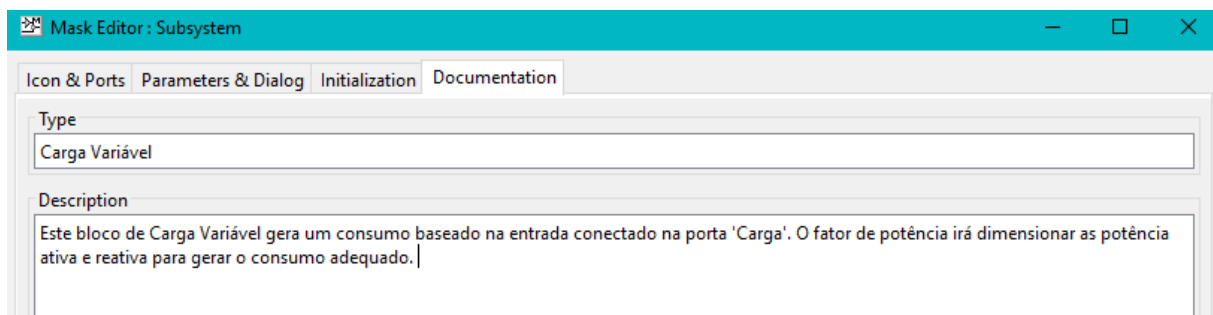
Figura 127 – Configurações da aba *Initialization*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na primeira linha estamos indicando a potência ativa inicial como o produto da potência aparente pelo fator de potência. Na segunda linha a potência reativa inicial será igual a raiz quadrada da diferença entre os quadrados da potencia aparente e da potência ativa inicial. A função *switch* fará a troca do valor da variável TPF. Se caso o leitor escolher a opção "Indutivo" durante a configuração do bloco, o valor associado será 1 e caso escolha "Capacitivo" o valor será -1.

Por último, a aba *Documentation* é utilizada para que o leitor nomeie o bloco tipo máscara e descreva sua utilização de forma simples, conforme Figura 128. Os dados inseridos aqui serão apresentados na tela de parâmetros do bloco.

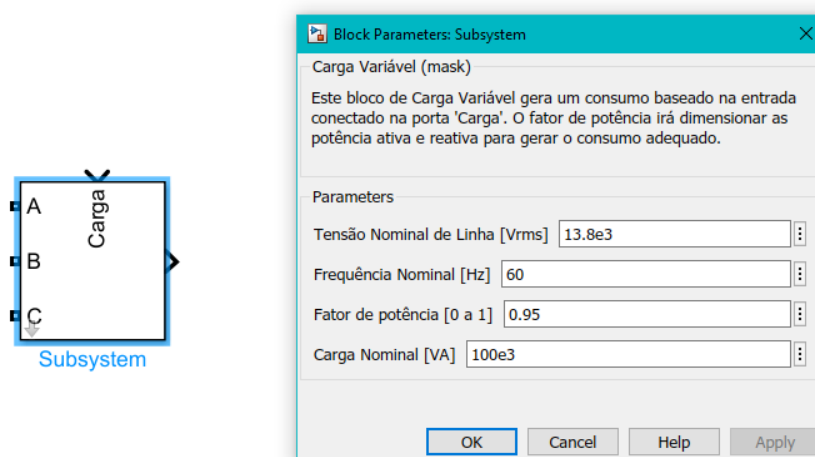
Figura 128 – Criando a documentação do bloco.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao finalizar a configuração do bloco tipo máscara o leitor deve clicar no botão *Apply* e logo após em *OK*. Com isto o bloco tipo máscara estará criado, porém, ainda falta a configuração no interior do bloco para que a tela de parâmetros, mostrada na Figura 129, criada através do *Mask Editor*, tenha acesso as informações internas do bloco.

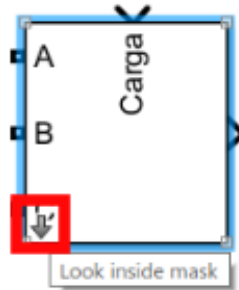
Figura 129 – Bloco montado com tela de parâmetros.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para acessar o interior de um bloco tipo máscara o leitor deve clicar na pequena seta no canto inferior esquerdo do bloco, conforme Figura 130, ou selecionar o bloco e utilizar o atalho Ctrl + U.

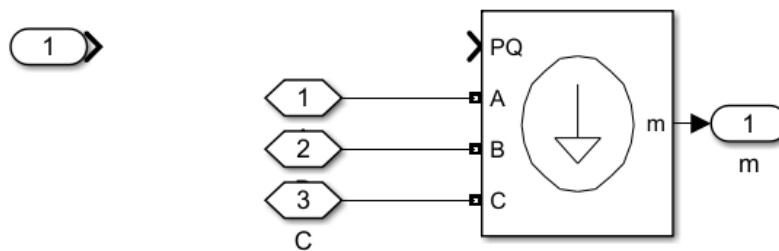
Figura 130 – botão para entrar no bloco tipo máscara.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Dentro da máscara o leitor deverá ter uma configuração de blocos parecido com a Figura 131, onde o bloco principal é a *Dynamic Load*, que está já conectada com as três fases 'A', 'B' e 'C', e com uma saída 'm'. O bloco '1', é a entrada 'Carga' ao qual iremos configurar para que calcule as potências ativa e reativa e as envie para o bloco *Dynamic Load* durante a simulação.

Figura 131 – Blocos no interior da máscara.

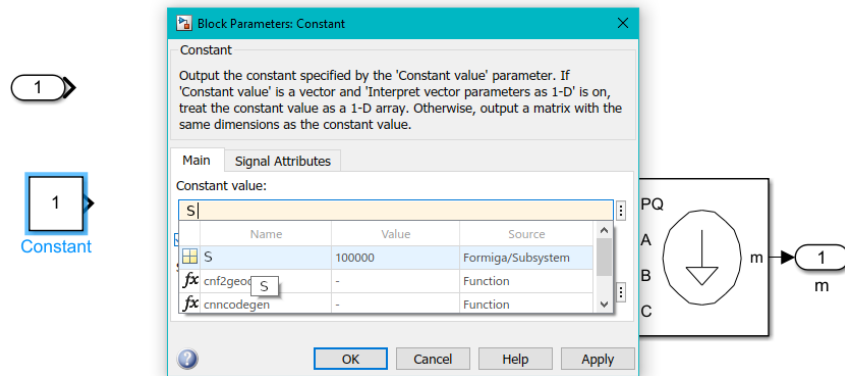


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para acessar as variáveis que foram criadas como parâmetros no *Mask Editor*, será necessário criar um bloco tipo *Constant*. Este bloco emite um sinal de valor constante durante a simulação, que no caso deste projeto, será o valor das variáveis de potência nominal e do fator de potência. Para se criar o bloco pode-se utilizar um dos dois métodos mencionados antes, o arrasta e solta pelo *Library Browser*, ou apenas dando dois cliques em um espaço em branco na tela e digitando o nome *Constant* e logo em seguida dando enter. Ao criar o bloco de constante, o leitor deverá acessar sua tela de parâmetros dando dois cliques sobre o bloco. Na tela de parâmetros, será digitado o nome da variável dentro da área de texto *Constant Value*, neste caso a variável a

ser acessada será a variável de potência nominal, logo 'S', conforme Figura 132. Assim que o leitor começar a digitar, uma lista com as variáveis e funções irá aparecer logo abaixo, mostrando também o valor atual da variável. O leitor deverá repetir este mesmo processo, porém, criando uma constante que receberá o valor da variável de fator de potência, 'FP'.

Figura 132 – Configuração do bloco *Constant*.

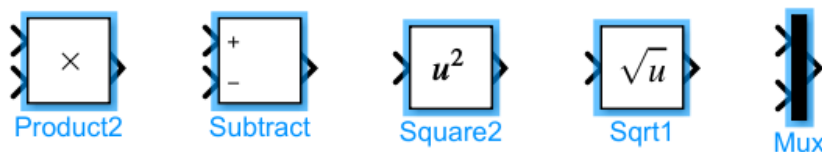


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Será necessário incluir blocos matemáticos do *Simulink*, mostrados na Figura 133, para que seja calculado a potência ativa e reativa. Os blocos necessários serão:

- *Product*: Multiplica dois valores. Encontrado em *Simulink* -> *Math Operations*.
- *Subtract*: Subtrai dois valores. Encontrado em *Simulink* -> *Math Operations*.
- *Square*: Eleva um valor ao quadrado. Encontrado em *Simulink* -> *Math Operations*.
- *Sqrt*: Retorna a raiz quadrada de um valor. Encontrado em *Simulink* -> *Math Operations*.
- *Mux*: Multiplexador de sinais. Encontrado em *Simulink* -> *Signal Routing*.

Figura 133 – Blocos *Simulink* para execução de cálculos.

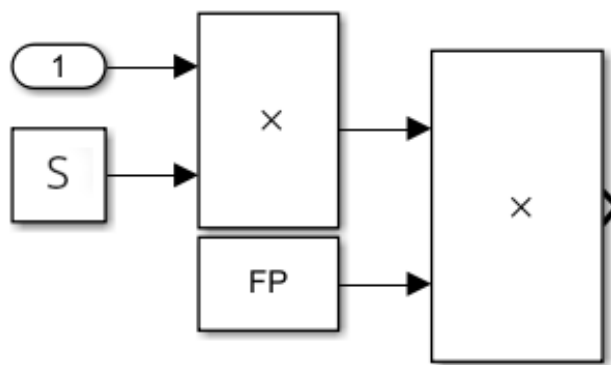


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Como primeira etapa, será feita a multiplicação da entrada externa de carga com a potência nominal. Conectando a saída do bloco '1' na primeira entrada do bloco multiplicador, e

na segunda entrada, o bloco constante 'S', potência nominal. Desta forma, ao se conectar uma curva de carga na entrada externa, esta será multiplicada pela potência nominal para que se simule um consumo dinâmico. Será necessário um segundo bloco multiplicador, porém, o leitor pode apenas copiar e colar o bloco já existente, com o comando Ctrl + C e Ctrl + V. Conecte a saída do primeiro bloco multiplicador na primeira entrada do segundo bloco multiplicador, e em seguida, conecte a constante 'FP', fator de potência, na segunda entrada do segundo multiplicador conforme Figura 134.

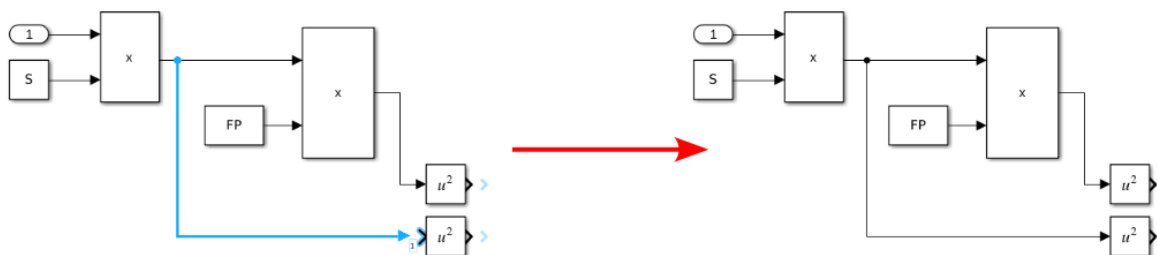
Figura 134 – Montagem base dos multiplicadores.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Neste caso, a saída do segundo bloco multiplicador é a potência ativa já corrigida pelo fator de potência, porém, ainda é necessário a potência reativa. Utilizando o bloco *Square*, para elevar o valor ao quadrado, conecte a saída do segundo bloco multiplicador no bloco *Square*. Duplica o bloco *Square* e faça uma derivação do bloco 'S' para este novo bloco. a derivação pode ser feita apenas clicando na linha que conecta o bloco 'S' ao bloco multiplicador e logo em seguida clicar na entrada do bloco de elevação ao quadrado, conforme Figura 135.

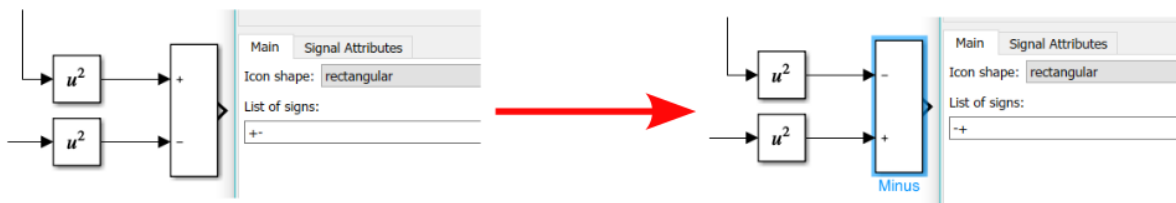
Figura 135 – Conexão com os blocos ao quadrado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Agora, será necessário fazer a subtração da potência ativa ao quadrado, pela potência nominal ao quadrado, conectando os dois blocos de elevação ao quadrado no bloco *Subtract*. Porém, é necessário a inversão dos sinais, já que no bloco original o sinal de positivo se encontra em cima e o sinal de subtração se encontra em baixo. Para isto, basta abrir os parâmetros do bloco de subtração e alterar sua lista de sinais (*List of signs*) de '+' para '-+', de acordo com a Figura 136.

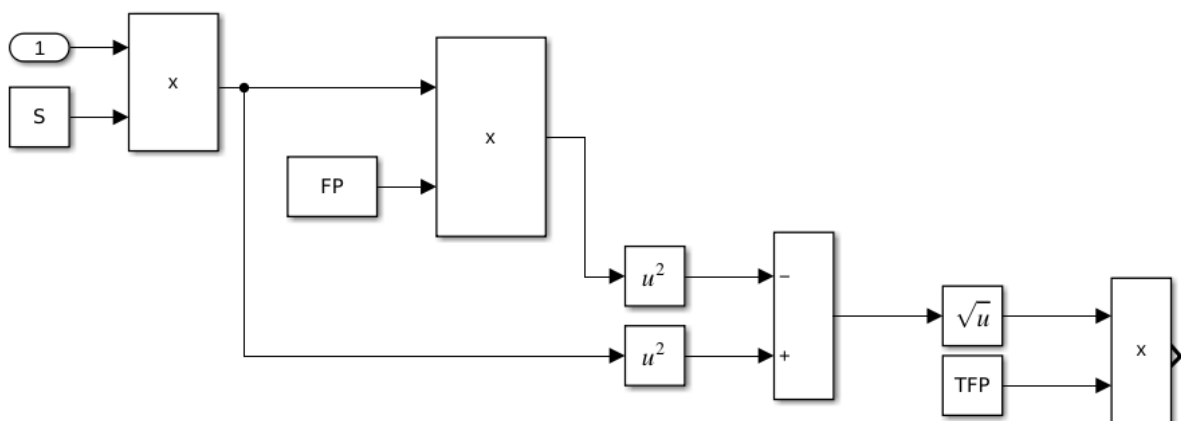
Figura 136 – Alterção dos sinais no bloco *Subtract*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após esta alteração, basta conectar a saída do bloco de subtração no bloco de *Sqrt*, ou raiz quadrada. Desta forma, a saída do bloco de raiz quadrada passa a ser a potência reativa do sistema. Para fazer a alteração entre potência reativa indutiva ou capacitiva, um bloco constante com a variável 'TFP', deverá ser conectado a um bloco de multiplicação após a saída do bloco de raiz quadrada que calcula a potência reativa, conforme Figura 137.

Figura 137 – Conexão com a variável do fator de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Desta forma, caso o leitor configure o bloco para ter um fator de potência indutivo, o valor da potência reativa será multiplicado por 1, mantendo seu valor positivo. Caso o leitor configure o fator de potência como capacitivo, o valor de potência reativa será multiplicado por

-1, conforme especificado nas configurações na tela *Initialization*, durante a criação da máscara, para simular a absorção de indutivos.

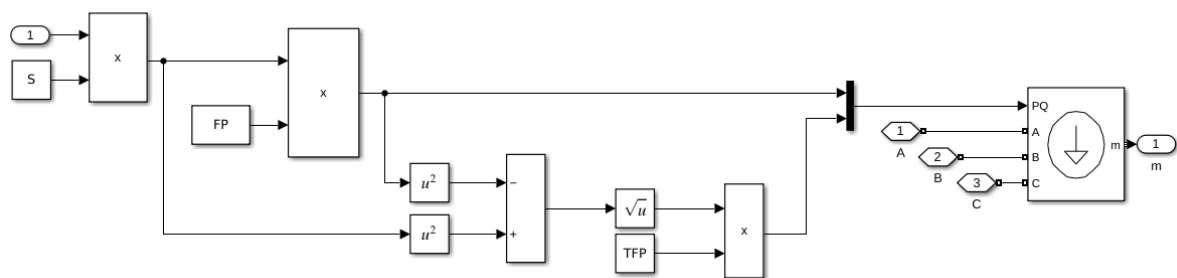
Estes blocos estão configurados de forma a realizar o cálculo de potência utilizando a equação abaixo, normalmente utilizada em sala de aula.

$$P = S \cdot fp$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Agora, faz-se uma derivação da saída do segundo bloco multiplicador, o qual calcula potência ativa, conectando-o na primeira porta do bloco Mux, e a saída do bloco multiplicador para cálculo de potência reativa, na segunda entrada. Para finalizar, conecte a saída do bloco Mux na entrada 'PQ' do bloco *Dynamic Load* para completar o sistema, assim como demonstrado na Figura 138.

Figura 138 – Sistema de carga completo.

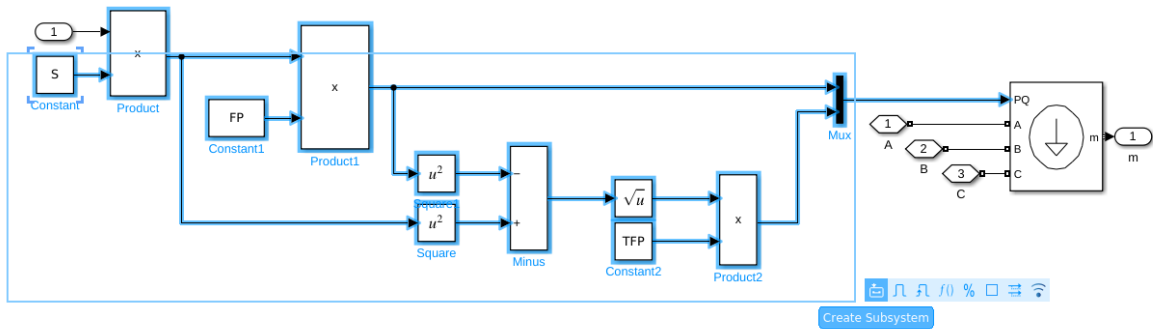


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para deixar este sistema mais organizado, será criado um subsistema contendo todos os blocos matemáticos. Para isto, basta selecionar todos os blocos matemáticos por meio de uma área de seleção com o mouse, deixando de fora apenas o bloco de entrada 1, e selecionar a opção *Create Subsystem*, conforme Figura 139.

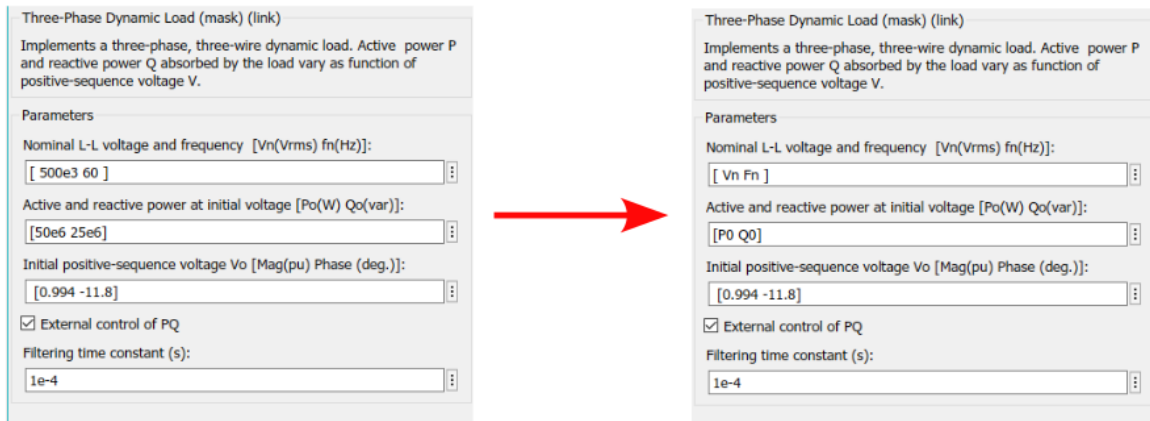
Com o subsistema criado, os blocos que antes ocupavam boa parte da tela, agora fazem parte de apenas um bloco. Para finalizar o processo de configuração do bloco tipo máscara de carga variável, é necessário apenas criar a conexão entre as variáveis criadas para controle do bloco, e os parâmetros do bloco de *Dynamic Load*. Para isto, basta abrir a tela de parâmetros do bloco *Dynamic Load* e alterar os valores pelas variáveis nomeadas anteriormente, onde a tensão recebe a variável 'Vn', a frequência recebe a variável 'Fn', a potência ativa inicial recebe a variável 'P0' e a potência reativa inicial recebe a variável 'Q0', como pode ser observado na Figura 140.

Figura 139 – Criando um subsistema para organização.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

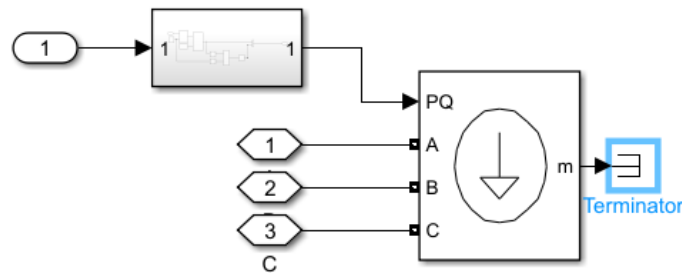
Figura 140 – Alterando valores por variáveis.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

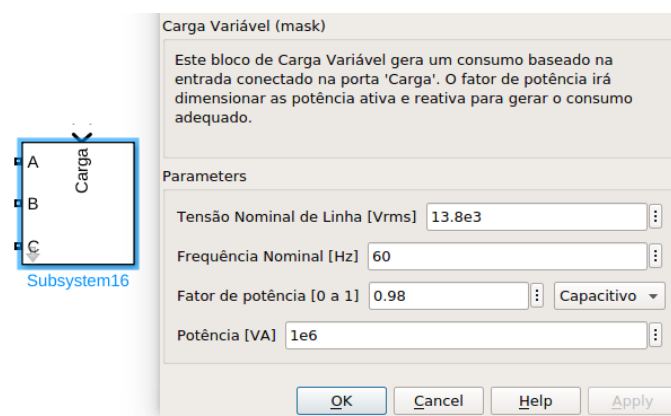
Após a troca de variáveis, o bloco está pronto para sua utilização como uma carga variável que pode receber uma curva de carga externa. Uma última alteração é necessária. Deve-se remover o bloco '1' conectado na porta 'm'. A porta 'm' é a saída para um vetor contendo informações como tensão nominal, potência ativa e reativa. No caso deste projeto, estas informações serão coletadas por fora da carga, logo esta saída não terá utilidade, sendo assim coloca-se um bloco chamado *Terminator*, encontrado em *Simulink* -> *Sinks*, em seu lugar, conforme Figura 141.

Com isto, o bloco de Carga Variável está pronto. Para seu funcionamento, basta conectar uma curva de carga na porta 'Carga' e alterar seus parâmetros, apresentado na Figura 142, conforme o desejado.

Figura 141 – Adicionando um *Terminator* a saída do bloco.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 142 – Bloco pronto para ser utilizado.



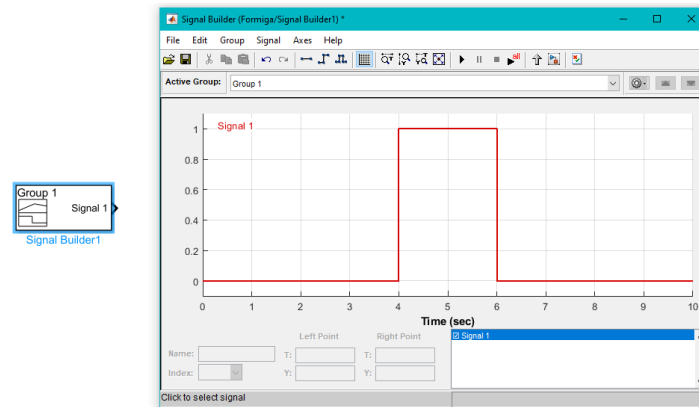
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.6 Criando as curvas de carga

As curvas de carga são criadas utilizando o bloco *Signal Builder*. O leitor deve adicionar este bloco no projeto, que pode ser encontrado em *Simulink* -> *Sources*, e logo em sequencia abrir suas configurações dando dois cliques sobre o bloco. Diferente dos outros blocos o *Signal Builder* abrirá uma janela para edição de sinais, já contendo um sinal tipo pulso, observável na Figura 143.

Por padrão o *Signal Builder* apresenta apenas 10 segundos, porém, para este projeto, será criado uma curva de carga representando as 24 horas do dia. Para isto, no menu superior da janela do *Signal Builder*, clique em *Axes* -> *Change Time Range*. Uma nova janela ira se abrir, altere o valor *Max Time* para 24 como na Figura 144.

Agora será necessário criar a nova curva contendo 24 pontos que simularão o consumo de carga durante o dia. Novamente no menu superior do *Signal Builder*, clique em *Signal* -> *New* -> *Custom* e uma nova janela se abrirá. Nesta nova janela, o leitor deve introduzir um vetor, utilizando colchetes [], contendo todas as horas, de 0 a 24 separados por espaço, no parâmetro

Figura 143 – Janela de *Signal Builder*.

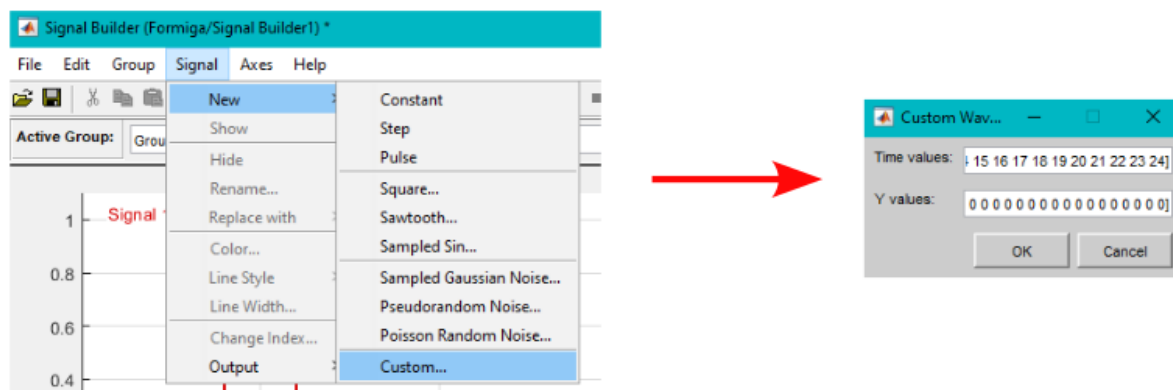
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 144 – Alterando o tempo total do *Signal Builder*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Time values, e no parâmetro *Y values* colocar um vetor com 25 zeros, separados por espaço, conforme Figura 145.

Figura 145 – Criando uma nova curva com 24 pontos.

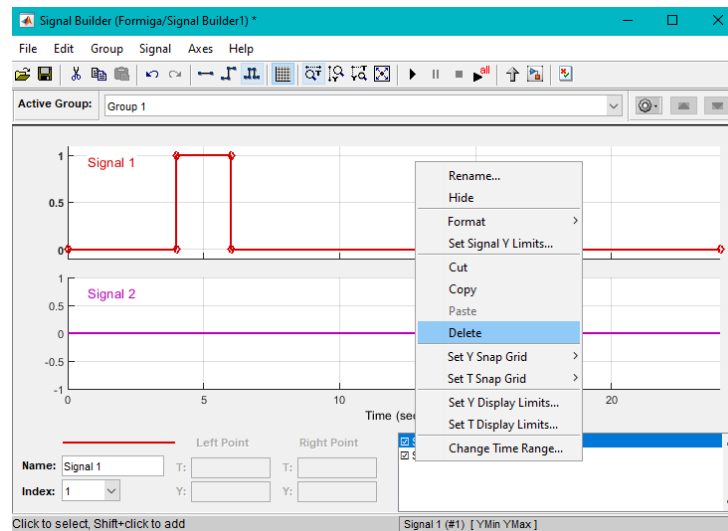


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com a nova curva criada, a tela se dividirá em 2 partes mostrando a curva tipo pulso na parte de cima e a curva que acabou de ser criada na parte de baixo. A curva tipo pulso não será utilizada, logo o leitor pode deletá-la clicando com o botão direito em qualquer parte do gráfico

da curva 1, e no menu que irá se abrir, clicar em *Delete*, conforme Figura 146.

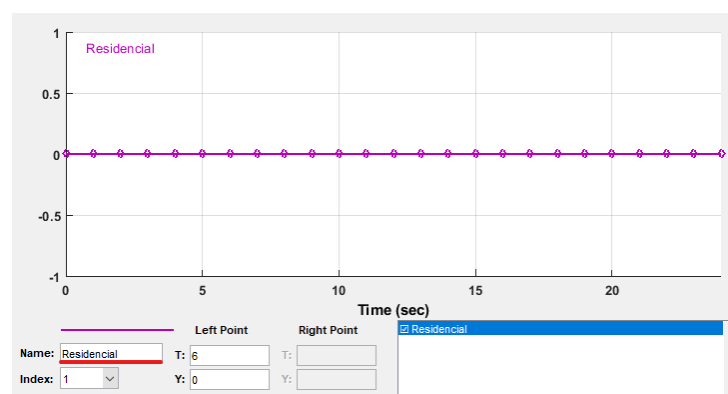
Figura 146 – Deletando curva que não será utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Agora, apenas com a curva que será utilizada, clique sobre a linha da curva para ver todos os pontos que a conectam, sendo que cada um desses pontos representa uma hora do dia. Com a curva selecionada, o leitor pode renomeá-la, simplesmente alterando seu nome no parâmetro *Name* no canto inferior esquerdo, mostrado na Figura 147, de 'Signal 2' para 'Residencial' já que estaremos criando uma curva de carga residencial.

Figura 147 – Alterando o nome da curva.

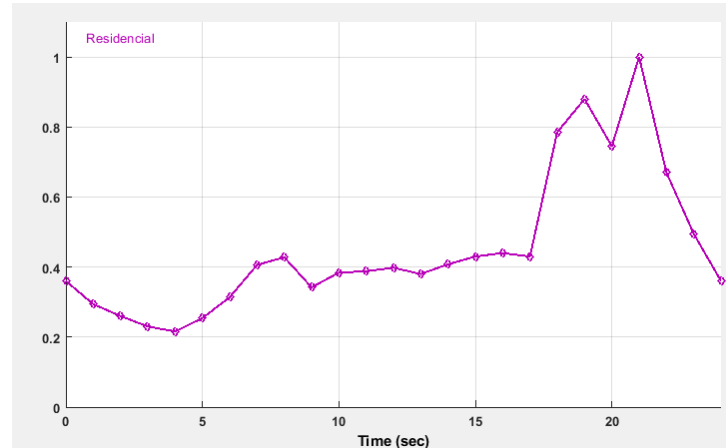


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para finalizar, o leitor deve apenas ajustar cada ponto da curva conforme a curva de carga residencial existente na literatura. Para isto, apenas clique sobre um ponto e o arraste, para elevar o mesmo de 0 a 1, sendo que este valor será multiplicado pela valor de potência nominal do bloco de carga variável, logo, o valor de 0 a 1 indica a porcentagem de consumo no horário do ponto

selecionado. Desta forma, uma curva de carga residencial deve ter um modelo aproximado ao da Figura 148.

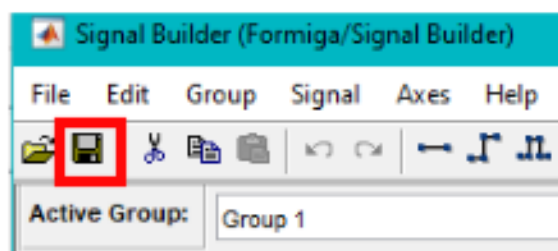
Figura 148 – Curva de carga residencial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com a curva definida, o leitor deve apenas salvar essa curva clicando no botão com ícone de disquete na barra de menus superior, mostrado na Figura 149, e esta curva já está pronta para ser usada. O leitor pode facilmente duplicar este bloco *Signal Builder* com a curva de carga criada e alterar seus parâmetros para atender a outras curvas de carga, como a comercial e a industrial.

Figura 149 – Salvando a curva de carga.

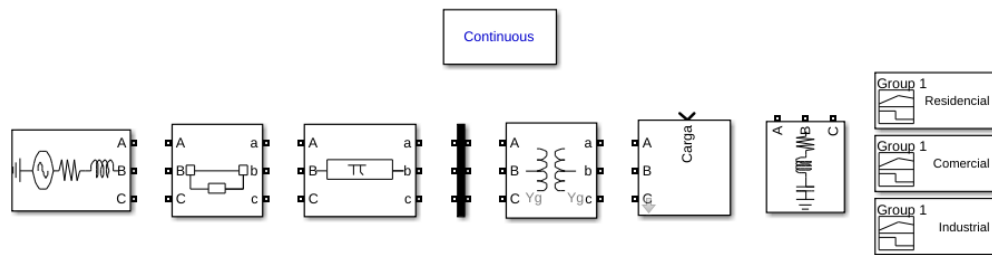


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.7 Iniciando a montagem do sistema

A montagem do sistema seguirá como base o diagrama unifilar do sistema de distribuição de Formiga, que pode ser observado na Figura 5. Desta forma o leitor deverá apenas posicionar os blocos que já fazem parte do projeto e conecta-los, seguindo a sequência do diagrama. O leitor deve ter em seu projeto, até o momento, todos os blocos básicos para a montagem do sistema conforme Figura 150.

Figura 150 – Blocos para montagem do sistema.

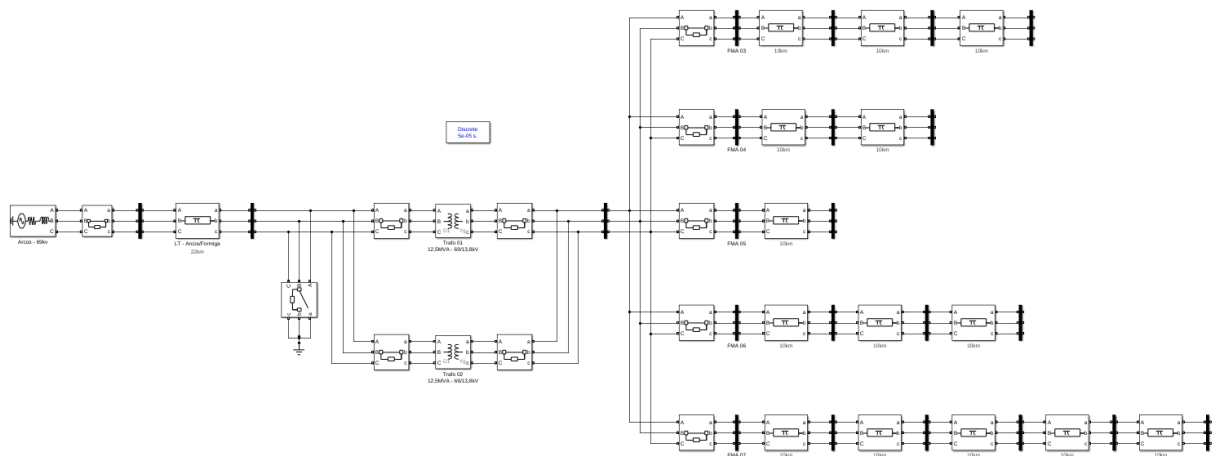


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Seguindo o diagrama unifilar apresentado na Figura 5, é possível que o leitor construa até os alimentadores, utilizando as informações contidas nas Tabelas 1 e 5.

Utilizando a Tabela 4, o leitor deve adicionar um bloco de seção PI para cada 10 km e um bloco medidor na frente de cada um deles, formando então, as linhas dos alimentadores com seus barramentos. Desta forma, o sistema deve estar parecido com a Figura 151.

Figura 151 – Construção do sistema até os alimentadores.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os nomes das *Labels* dos blocos de medição, começam com "V_" para tensões e "I_" para correntes, continuando a nomenclatura com o ponto em que se encontra o bloco, como por exemplo, na saída da SE de Arcos o nome das *Labels* é "V_Arcos" e "I_Arcos", conforme Tabela 10. Lembrando que o leitor tem total liberdade para alterar os nomes se assim desejar.

Para os barramentos dos alimentadores, o nome foi estendido adicionando a posição em que se encontra o medidor, como por exemplo, V_FMA03_Carga01 para o primeiro barramento do alimentador FMA 03, V_FMA03_Carga02 para o segundo barramento do alimentador FMA 03 e assim por diante.

Tabela 10 – Nomenclatura das *Labels* nos medidores.

Local do medidor	Label de Tensão	Label de Corrente
SE - Arcos	V_Arcos	I_Arcos
Linha de Transmissão	V_LT	I_LT
SE - Formiga	V_Subestacao	I_Subestacao
Alimentador 03	V_FMA03	I_FMA03
Alimentador 04	V_FMA04	I_FMA04
Alimentador 05	V_FMA05	I_FMA05
Alimentador 06	V_FMA06	I_FMA06
Alimentador 07	V_FMA07	I_FMA07

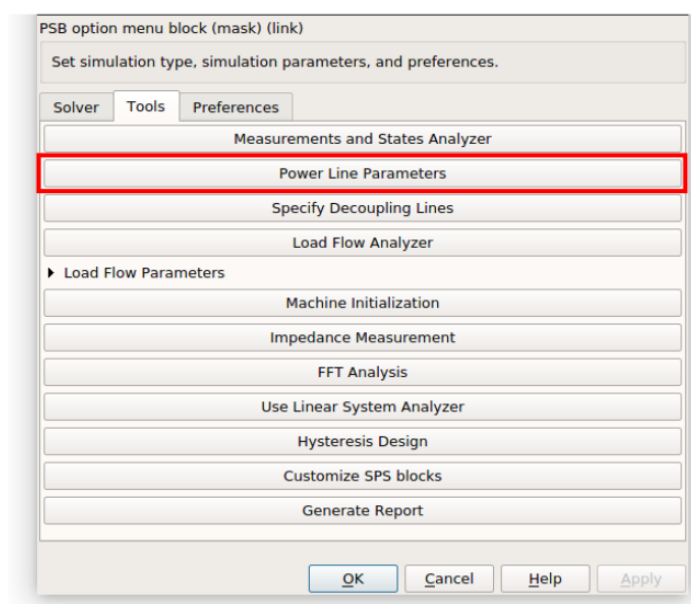
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Todos os disjuntores foram configurados para estarem sempre fechados e apenas operarem aos 24 segundos. Para a chave de aterramento, deve-se conectar um bloco de disjuntor a um bloco *Ground* e configura-lo para permanecer aberto com tempo de 24 segundos.

A.8 Usando o *Power Line Parameters*

Para configurar as linhas de distribuição, será utilizado a ferramenta *Power Line Parameters* que faz os cálculos de resistência, indutância e capacitância dos condutores. Para abrir esta ferramenta, o leitor deve abrir os parâmetros do bloco *powergui*, ir na aba *tools* e clicar em *Power Line Parameters*, conforme Figura 152.

Figura 152 – Localização da ferramenta *Power Line Parameters*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 153 mostra a tela do *Power Line Parameters*. Esta tela está dividida em categorias diferentes para entrada dos parâmetros.

Figura 153 – Tela principal do *Power Line Parameters*.

The screenshot displays the main interface of the *Power Line Parameters* software. It is organized into several functional areas:

- General Parameters:** Includes a 'Units' dropdown set to 'english', 'Ground Resistivity (ohm.m)' set to 100, and 'Nominal Frequency (Hz)' set to 60.
- Frequency-Dependent Line Parameters:** Shows 'Frequency Range Logspace (Hz)' as [-2.5, 141] and 'Line Length (km)' as 100.
- Line Geometry:** Contains two tables:

Phase conductors (bundles): 3						
Label	Phase Number	X (ft)	Y tower (ft)	Y min (ft)	Conductor type	
1	p1	1	-42	68	68	1
2	p2	2	0	68	68	1
3	p3	3	42	68	68	1

Ground conductors (bundles): 2						
Label	Phase	X (ft)	Y tower (ft)	Y min (ft)	Conductor type	
1	g1	0	-29.5	108	108	2
2	g2	0	29.5	108	108	2
- Computed Parameters:** Displays calculated matrices such as R_{matrix} (ohm/km), L_{matrix} (H/km), and C_{matrix} (F/km) at 60Hz, along with positive- and zero-sequence parameters.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Como primeiro passo, o leitor deve alterar o tipo de unidade utilizada, de unidade imperial para métrica, na área *General Parameters*, conforme Figura 154.

Figura 154 – Alterando de unidade imperial para métrico.

This screenshot shows the *General Parameters* section of the software. The 'Units' dropdown menu is now set to 'metric'. The 'Ground Resistivity (ohm.m)' field remains at 100, and the 'Nominal Frequency (Hz)' field remains at 60.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na área *Conductors*, na parte de baixo da tela do *Power Line Parameters*, o leitor deve alterar a quantidade de tipos de condutores (*Conductor types*) para 1 e trocar a opção *Internal conductor inductance evaluated from*, para *Geometric Means Radio (GMR)*, logo após, inserir as informações do condutor contidos na Tabela 2. As seguintes variáveis para o condutor são:

- *D out (cm)*: Diâmetro externo do condutor.
- *T/D ratio*: razão grossura/diâmetro. Para cabos de alumínio CA, este valor é 0.5 para cabos de alumínio com alma de aço CAA o aço deve ser desconsiderado e o cabo tratado como oco.

- GMR (cm): raio médio geométrico.
- DC res (Ohms/km): resistência CC em Ω/km .
- Nb_cond: número de condutores por feixe.
- Db (cm): diâmetro do feixe, deixar em 0 se não houver feixe.
- Angle: angulo do condutor 1, deixar em 0 se não houver feixe.

A Tabela 11 mostra os valores a serem inseridos na área de condutores para o alimentador FMA 03.

Tabela 11 – Valores para os condutores do alimentador FMA 03.

D out(cm)	T/D ratio	GMR(cm)	DC res(Ohms/km)	Nb_cond	Db(cm)	Angle(deg.)
1.829	0.316	0.744	0.173	1	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 155, mostra como deve ficar a inserção dos dados. A configuração de 'Db', pode não aceitar o valor 0, logo a própria ferramenta colocará o valor de 0.001.

Figura 155 – Inserindo informações dos condutores.

D out (cm)	T/D ratio	GMR (cm)	DC res (Ohms/km)	unused	Nb_cond	Db (cm)	Angle (deg.)	
1	1.829	.0316	0.744	0.173	1	1	0.001	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Caso o leitor queira inserir outros tipos de condutores, que fazem parte da mesma torre, os mesmos devem ser especificados nesta mesma área.

A área central, *Ground conductors (bundles)*, é utilizada para os condutores para-raios. Nesta área, o leitor deve alterar o valor para 0 conforme a Figura 156.

Na área de geometria, o leitor deve configurar como são dispostos os condutores. A Figura 157 mostra como os aspectos geométricos podem ser configurados, caso queira utilizar outras geometrias de torres.

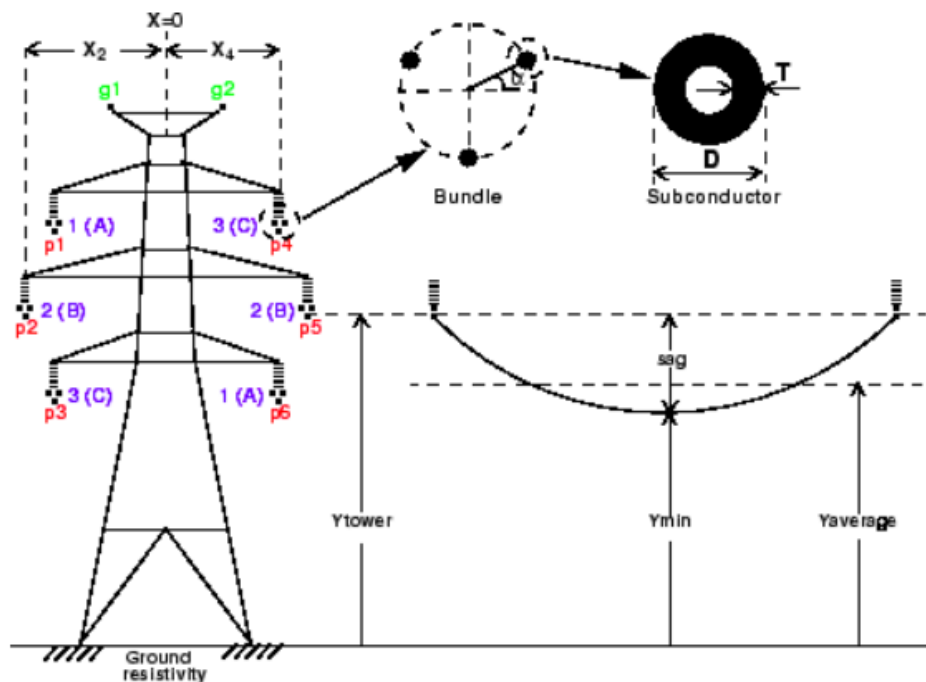
As variáveis para configuração da torre são:

Figura 156 – Removendo os para-raios.

Label	Phase	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Conductor type
Ground conductors (bundles): <input type="text" value="0"/>					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 157 – Variáveis para configurar a geometria da torre.



(MATHWORKS, 2023)

- *Label*: nome da fase.
- *Phase Number*: número da fase.
- *X (m)*: distância horizontal entre o condutor até o centro da torre. Para o lado direito valores positivos e valores negativos para o lado esquerdo da torre.
- *Y tower (m)*: altura do condutor em relação ao solo.
- *Y min (m)*: altura mínima do condutor em relação ao solo quando existe flecha.
- *Conductor type*: número do condutor configurado na seção de condutores.

Utilizando a Figura 4, o leitor deve colocar os valores da geometria do poste com a estrutura M1. A Tabela 12 mostra como os valores são dispostos para configuração desta geometria.

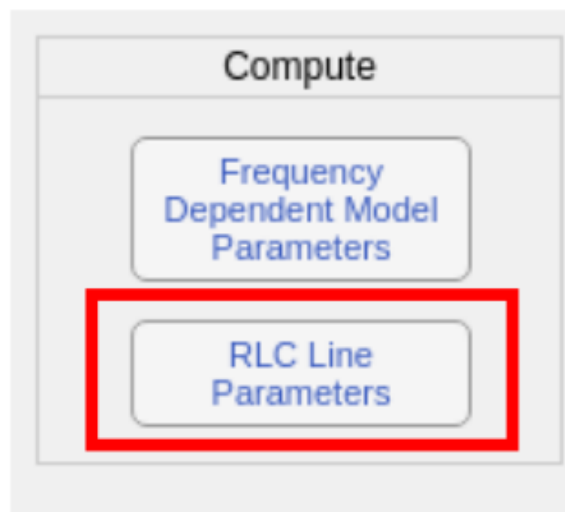
Tabela 12 – Valores para a geometria do poste com estrutura M1.

Label	Phase Number	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Conductor type
p1	1	0.3	11	11	1
p2	2	1	11	11	1
p3	3	1.7	11	11	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Apos inserir os dados, o leitor deve clicar no botão *RLC Line Parameters* na área *Compute*, conforme Figura 158, para calcular os valores de resistência, indutância e capacitância.

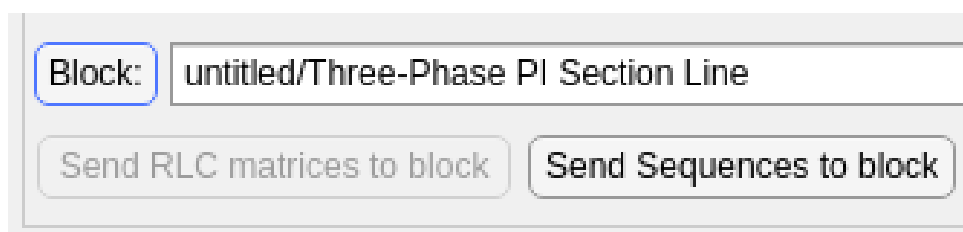
Figura 158 – Calcular os valores de RLC dos condutores.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para inserir os valores nos blocos, o leitor deve selecionar o bloco de modelo PI, que faz parte do alimentador FMA 03, e clicar no botão *Block*, logo após, no botão *Send Sequences to block*, para inserir os dados calculados para o bloco selecionado, conforme Figura 159. O leitor deve fazer isso para cada bloco de modelo PI do alimentador FMA 03.

Figura 159 – Enviando valores calculados para o bloco modelo PI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

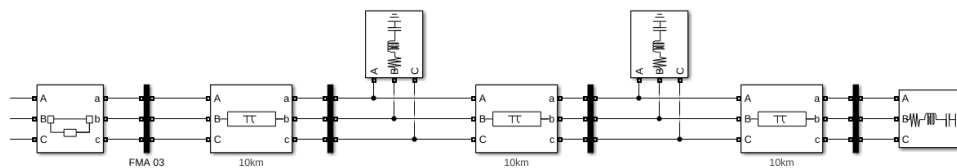
Após a configuração dos blocos de modelo PI do alimentador FMA 03, o leitor deverá repetir o mesmo processo para os outros alimentadores, alterando os valores das variáveis dos condutores que estão dispostos na Tabela 3.

A.9 Inserindo as cargas e finalizando os sistemas

Para finalizar os sistemas que serão usados como base, o leitor deverá adicionar os blocos de cargas, sendo assim, deve salvar duas cópias deste projeto, uma para os blocos de carga estática e outra cópia para as cargas variáveis.

Para as cargas estáticas, deve-se adicionar um bloco de carga RLC série após o barramento do primeiro bloco de 10 km de linha modelo PI, e adicionar outros blocos de carga após cada barramento, igual demonstra a Figura 160. O mesmo padrão deve ser repetido para todos os outros quatro alimentadores.

Figura 160 – Inserindo as cargas estáticas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após a inserção das cargas, os valores de potência deverão ser inseridos em cada bloco de carga. A escolha da disposição dos tipos de cargas, está descrito na Tabela 4, sendo que cargas residenciais contem potência reativa capacitiva, cargas comerciais contem potência reativa indutiva porém com fator de potência alto e cargas industriais com potência reativa indutiva com fator de potência baixo.

A configuração das potências das cargas para este trabalho, está disposta na Tabela 13.

Ao configurar todas as cargas, a base do sistema de distribuição de Formiga com cargas estáticas está completa e pronta para uso.

Para montar o modelo do sistema utilizando cargas variáveis, o leitor deverá repetir o processo de inserção de cargas após cada barramento dos alimentadores, porém agora no lugar das cargas RLC série, o leitor deverá inserir os blocos de carga variável tipo máscara montadas na seção A.5 deste anexo.

Com os bloco de carga variável o leitor deve conectar na porta 'Carga', o bloco contendo a curva de carga que controlará como a potência será absorvida durante a simulação. A Figura

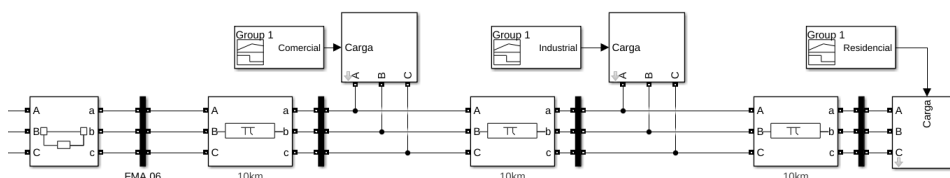
Tabela 13 – Valores de potências atribuídas as cargas por alimentador.

Tipo de Carga Potência	Residêncial		Comercial		Industrial	
	Ativa	Reativa Cap.	Ativa	Reativa Ind.	Ativa	Reativa Ind.
FMA 03	980 kW	199 kVAR	X	X	X	X
FMA 04	750 kW	110 kVAR	990 kW	210 kVAR	X	X
FMA 05	X	X	X	X	4,8 MW	1,4 MVAR
FMA 06	735 kW	130 kVAR	710 kW	145 kVAR	880 kW	250 kVAR
FMA 07	765 kW	135 kVAR	X	X	X	X

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

161 demonstra a disposição das curvas de carga no alimentador FMA 06, contando com uma curva de cada tipo.

Figura 161 – Disposição das curvas de carga no alimentador FMA 06.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A potência e fator de potência de cada bloco de carga variável, utilizados durante a confecção deste trabalho, está disposto na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de potência e fator de potência dos blocos.

Tipo de Carga	Residêncial		Comercial		Industrial	
	Potência	F.P.	Potência	F.P.	Potência	F.P.
FMA 03	1 MVA	0,98 Cap.	X	X	X	X
FMA 04	750 kVA	0,99 Cap	1 MVA	0,98 Ind.	X	X
FMA 05	X	X	X	X	4 MVA	0,97 Ind.
FMA 06	1 MVA	0,98 Cap.	730 kVAR	0,97 Ind.	1 MVA	0,99 Ind
FMA 07	850 kVAR	0,99 Cap.	X	X	X	X

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após a configuração dos blocos de cargas variáveis, o sistema está pronto para ser utilizado.

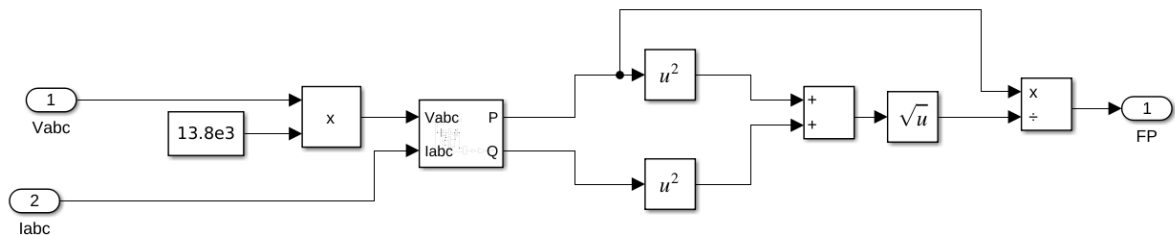
A.10 Criação do medidor de fator de potência

O medidor de fator de potência será criado utilizando dois métodos. O primeiro método será igual ao já utilizado para criação do subsistema que calcula os valores de potência ativa e reativa da máscara de carga de variável, utilizando blocos do *Simulink*. O segundo método será utilizando o bloco de função do MATLAB para demonstrar como códigos do MATLAB podem ser utilizados no *Simscape Electrical*. Ambos os métodos serão transformados em um subsistema para organização.

O primeiro, utiliza apenas blocos matemáticos para calcular o fator de potência e um bloco medidor de potência trifásica instantânea, onde o leitor apenas deve conectar os blocos presentes na Figura 162. Esta configuração nada mais é que a equação comumente utilizada para calcular o fator de potência.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Figura 162 – Estrutura do subsistema de cálculo de fator de potência.



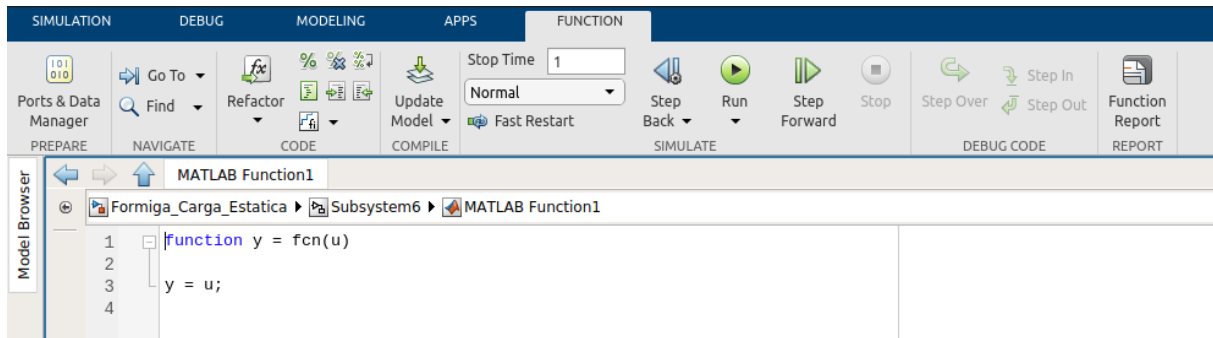
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 162, mostra os blocos de entrada '1', V_{abc} e '2', I_{abc} , além do bloco de saída '1', FP, pois este já se encontra dentro de um subsistema. Neste exemplo, o valor de entrada da tensão está em PU, logo, deve ser multiplicado pelo valor base de 13,8 kV. Caso o leitor queira utilizar este bloco na transmissão, entre Arcos e Formiga, este valor deverá ser alterado para 69 kV.

O segundo método utilizará o bloco de função do MATLAB. Para isto, o leitor deverá apagar os blocos após o bloco de medição de potência do subsistema criado anteriormente.

Ao adicionar o bloco de função do MATLAB, este contará apenas com uma porta de conexão e uma porta de saída, chamadas de 'u' e 'y'. O leitor deverá dar dois cliques sobre este bloco, que abrirá uma nova janela de edição de código, contendo uma função padrão do bloco, com uma entrada de variável 'u' e uma variável de retorno 'y', assim como visto nas portas de entrada e saída do bloco, conforme Figura 163.

Figura 163 – Tela de edição de código do bloco de função MATLAB.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

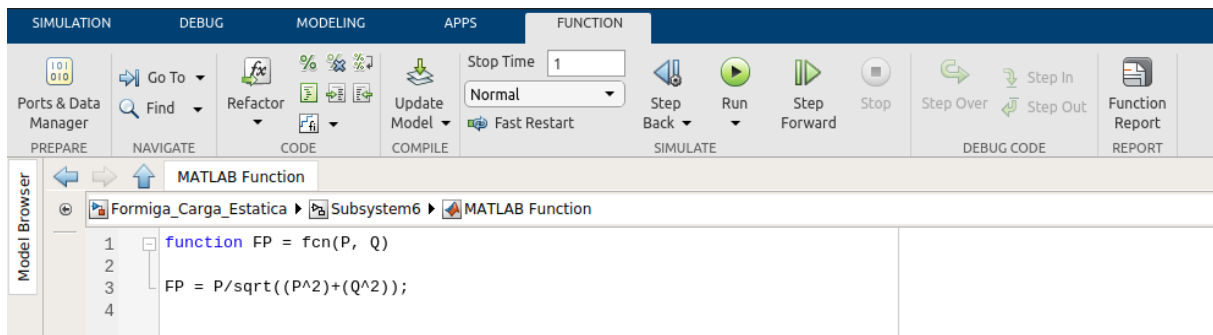
Este código padrão poderá ser deletado e o código seguinte deverá ser inserido em seu lugar, como mostrado na Figura 164.

```

1 function FP = fcn(P, Q)
2
3 FP = P/sqrt((P^2)+(Q^2));

```

Figura 164 – Código do bloco de função MATLAB alterado.

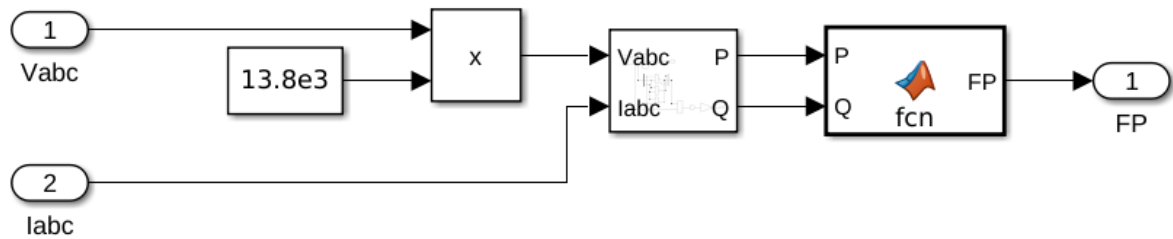


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Neste caso, agora temos como entrada duas variáveis, 'P' e 'Q', e após executar o cálculo da linha 3, retorna o valor pela variável 'FP'. O bloco será alterado, mostrando as duas portas de entrada para as potências e uma porta de saída com o fator de potência. O leitor deve apenas conectar as entradas e a saída conforme Figura 165.

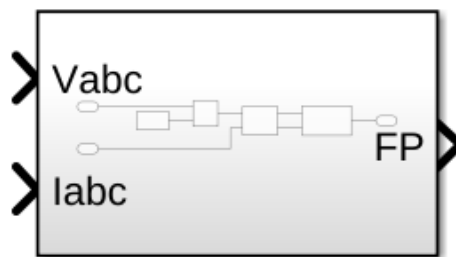
Desta forma, os blocos de cálculo de fator de potência estão prontos para serem utilizados como um subsistema, conforme a Figura 166. Qual deles será utilizado depende apenas do leitor, já que ambos tem a mesma função e geram o mesmo resultado.

Figura 165 – Cálculo de fator de potência com bloco de função MATLAB.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

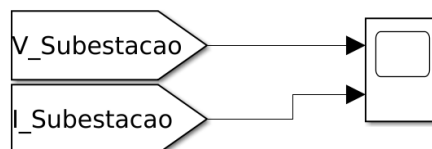
Figura 166 – Subsistema para cálculo de fator de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.11 Configurando o scope

Inicialmente, será configurado o *scope* que plotará os gráficos da SE de Formiga. O leitor deverá inserir dois blocos *From*, sendo um deles setado para obter a tensão da SE, com a tag "V_Subestacao", e o outro setado para a corrente, "I_Subestacao". Estes dois blocos *From*, devem ser conectados a um bloco *scope* conforme Figura 167. O bloco inicialmente tem apenas uma porta de entrada, porém, ao puxar uma linha de conexão do bloco *From* até a lateral do *scope*, uma nova porta será criada.

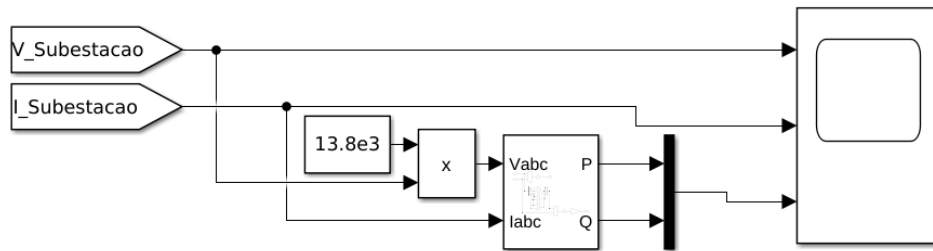
Figura 167 – Conexão dos sinais de tensão e corrente no *scope*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para calcular as potências, o leitor deve conectar um bloco de medição de potência trifásica, com os blocos *From* já utilizados anteriormente. O sinal de tensão trifásica deve antes

ser conectada a um bloco de multiplicação com um bloco de constante com o valor de 13,8 kV, já que as medidas de tensão estão em PU. Então, deve-se conectar as portas de saída do bloco de potência a um bloco Mux. A saída do bloco Mux deverá então ser conectado também ao *scope*, conforme Figura 168.

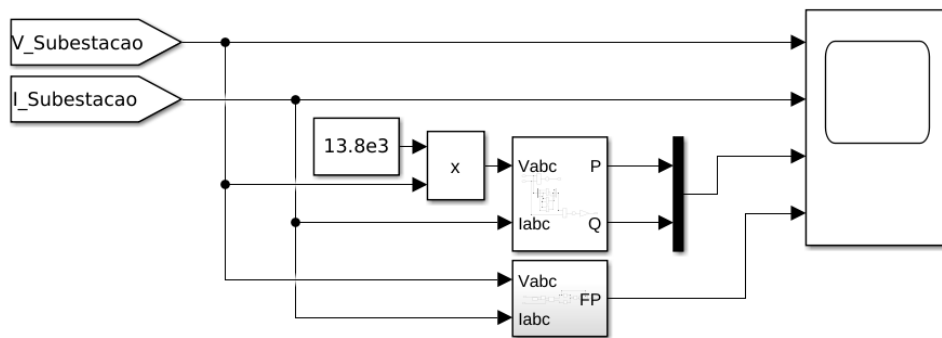
Figura 168 – Conexão do medidor de potências.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para finalizar as conexões, deve-se conectar os sinais de tensão e corrente ao bloco de cálculo de fator de potência, criado anteriormente, então conectar o bloco de fator de potência ao bloco *scope*, finalizando assim as conexões conforme Figura

Figura 169 – *Scope* finalizado.

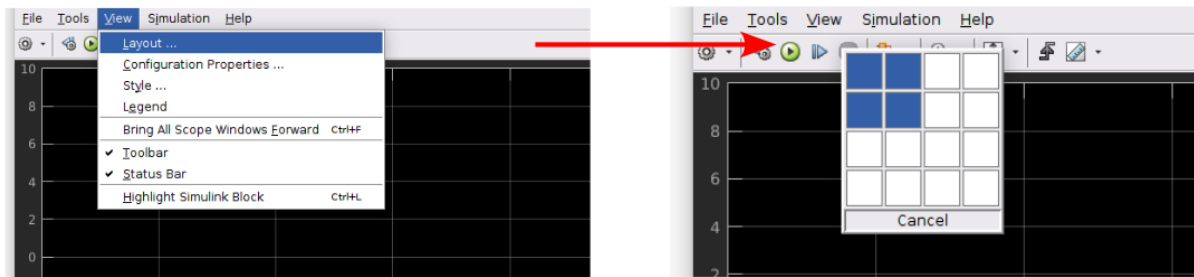


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao abrir o bloco *scope*, percebe-se que, mesmo com quatro entradas de sinais, o bloco apresenta apenas um gráfico. Para configurar como os quatro gráficos irão aparecer, deve-se ir ao menu superior da janela do *scope*, clicar em *View -> Layout ...* e então uma pequena janela aparecerá, para que o leitor selecione como os quatro gráficos devem ficar dispostos, conforme Figura 170.

Após isto, o bloco mostrando os quatro gráficos estará pronto. Para melhorar a compreensão dos gráficos o leitor pode ativar as legendas, para que os quatro gráficos sejam nomeados e para que o leitor tenha a capacidade de isolar os gráficos quando são plotados um sobre o outro.

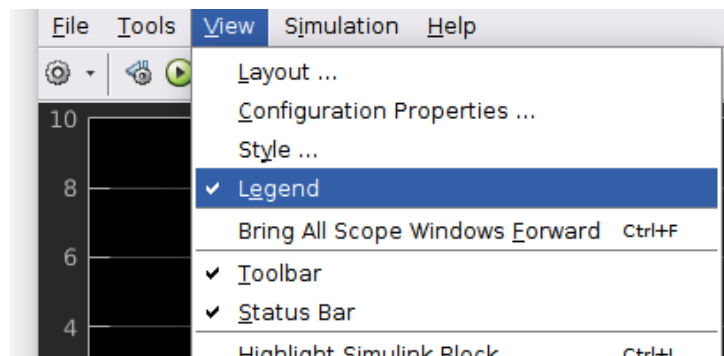
Figura 170 – Configurando a disposição dos gráficos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para isso, é necessário clicar novamente no menu superior *View* e ativar o *Legend* conforme Figura .

Figura 171 – Ativando as legendas dos gráficos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

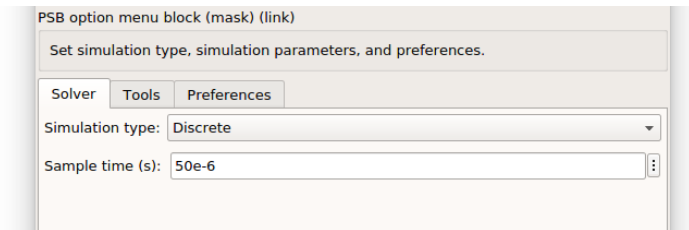
As legendas aparecerão apenas após uma simulação ser executada. Normalmente estarão com nomes dos blocos que enviam o sinal ao bloco *scope*, então, deve-se alterar os nomes apenas dando dois cliques sobre ele.

A.12 Configurando e rodando a simulação

A configuração da simulação é bem simples. O leitor deve configurar o bloco *powergui* para utilizar o tipo de simulação discreta. O tempo de amostragem (*Sample time*), será automaticamente setado para $50 \mu\text{s}$, conforme Figura. Este tempo é normalmente suficiente para todas as simulações, porém, o leitor pode optar por alterá-la.

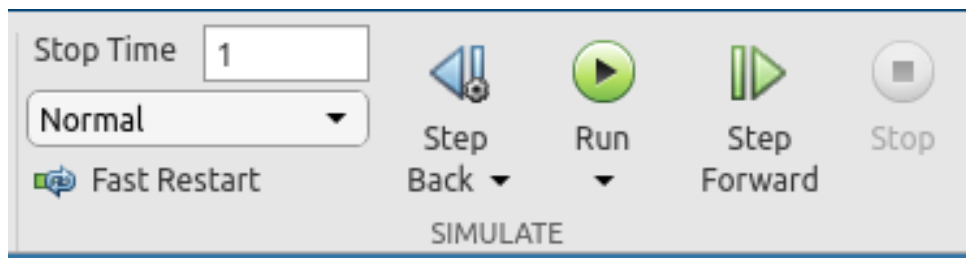
Após configurar o tipo de simulação, o leitor pode alterar o tempo de duração da simulação na parte central do *Toolstrip* e logo após apertar o botão verde *Run*, para rodar a simulação, conforme Figura 173.

Figura 172 – Alterando o tipo de simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 173 – Alterando a duração e executando a simulação.

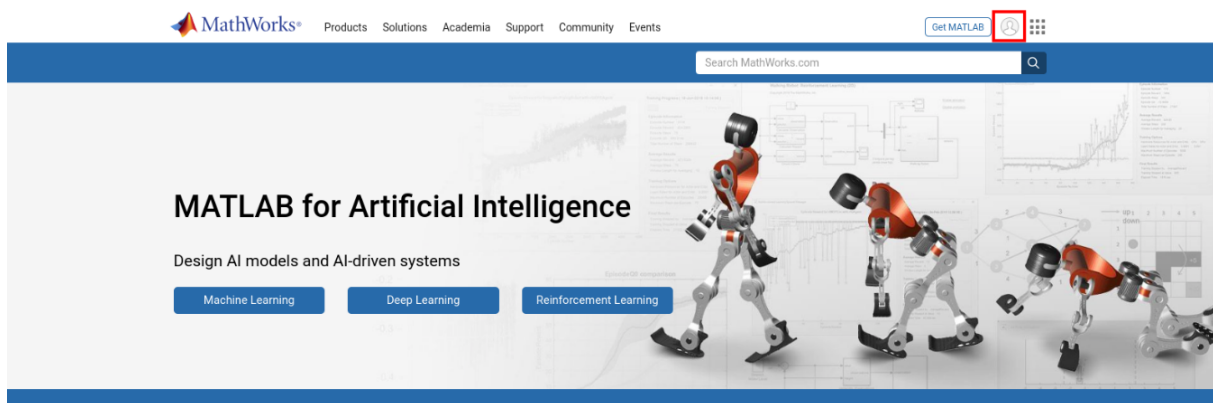


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.13 Utilizando o *File Exchange* da *MathWorks*

O *File Exchange* é uma biblioteca de projetos alimentado e mantido pela comunidade da *MathWorks*. Os arquivos disponíveis neste site são gratuitos e podem ser baixados por qualquer pessoa, apenas necessitando uma conta gratuita.

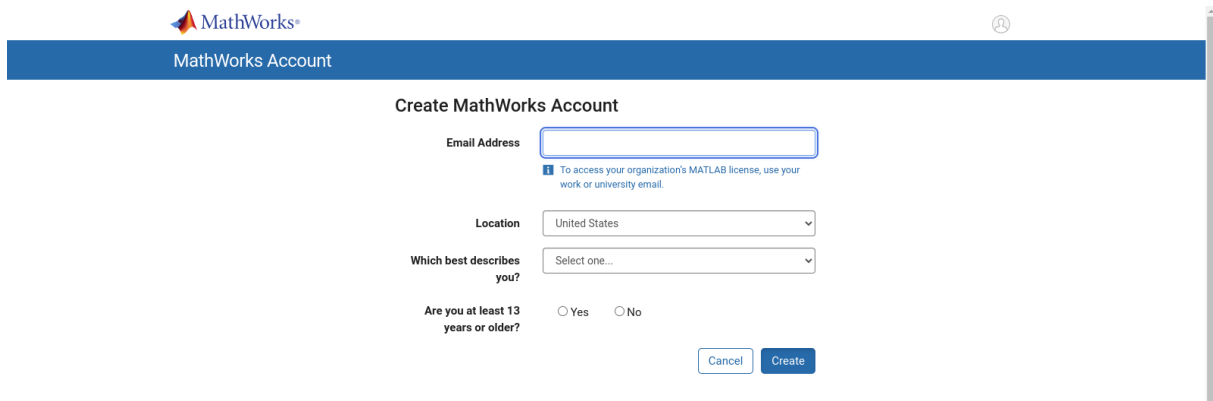
Primeiramente, caso o leitor ainda não possua uma conta da *MathWorks*, será necessário criá-la. Para isto o leitor deverá acessar o link <<https://www.mathworks.com>> e clicar no ícone de avatar no topo a direita, conforme Figura 174.

Figura 174 – Site da *MathWorks*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O leitor será direcionado para uma nova página para fazer *login*, caso já tenha uma conta, ou para criar uma nova conta. Caso ainda não tenha a conta, basta clicar em *Create one!*. Uma nova página será apresentada com informações que o leitor deve preencher, conforme Figura 175. Após preencher, o leitor deve clicar em *Create* para finalizar a criação da conta.

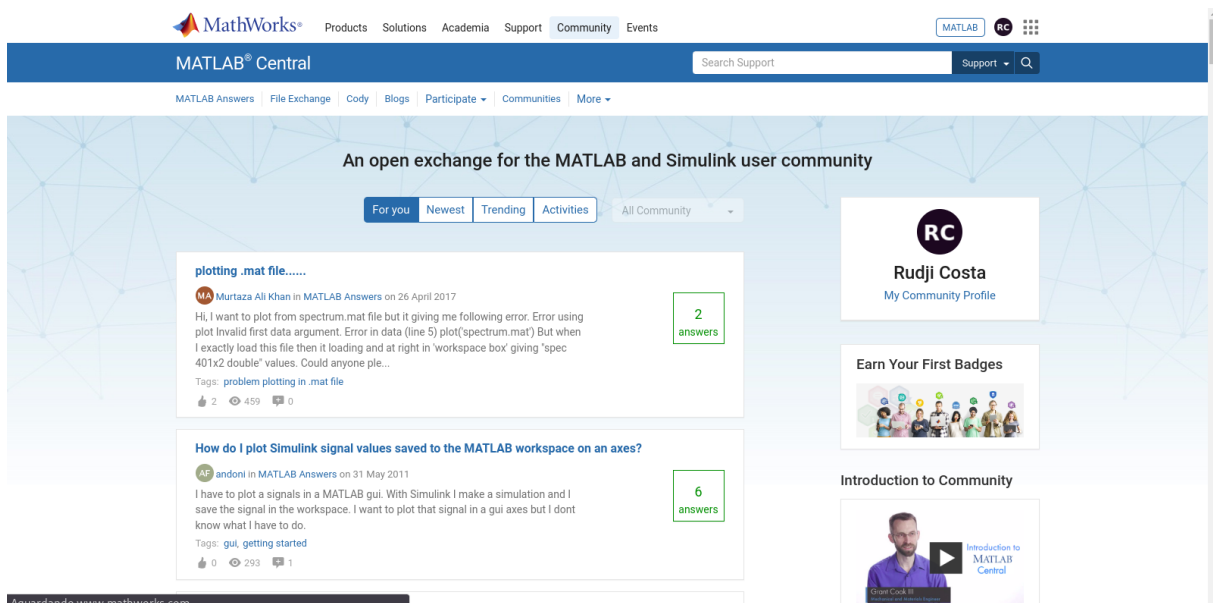
Figura 175 – Criando uma conta na *MathWorks*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com a conta criada, o leitor deverá logar na sua nova conta, ao que então terá acesso a uma nova página pessoal. Na parte superior desta tela, clique em *Community*, conforme Figura 176, onde terá acesso a comunidade, informações e novidades. Nesta tela clique em *File Exchange* no menu superior a esquerda.

Figura 176 – Tela da comunidade da *MathWorks*.

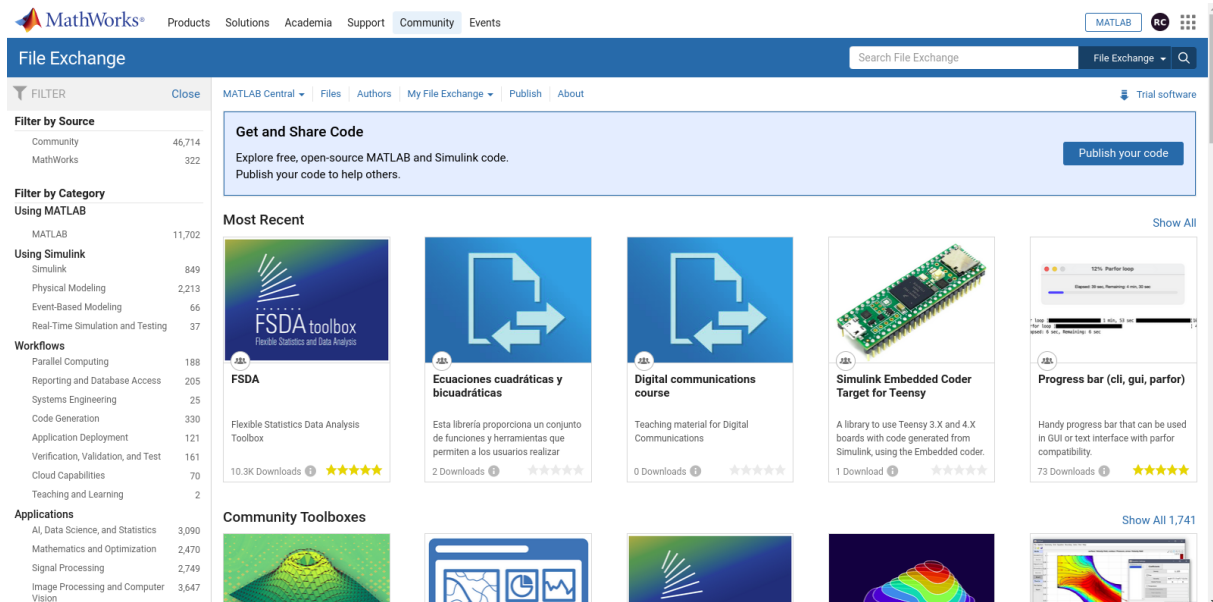


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao entrar no página do *File Exchange*, mostrada na Figura 177, o leitor terá acesso a

milhares de blocos e sistema montados pela comunidade da *MathWorks*, de forma gratuita. Para este trabalho, foram utilizados três projetos, o relé 50, o relé 51 e os blocos de gerador fotovoltaico que fazem parte de um mesmo projeto.

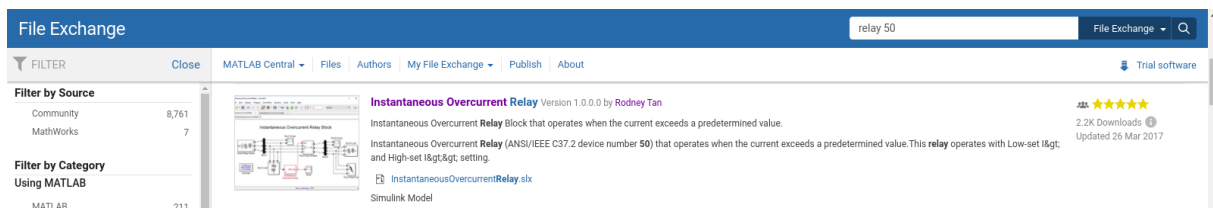
Figura 177 – Página do *File Exchange*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para encontrar os projetos ou blocos, deve-se pesquisar pelo nome na área de texto *Search File Exchange*, na região superior a direita. Para encontrar o relé 50, utilizado neste trabalho, o leitor deve pesquisar pelo nome *relay 50* e encontrar o arquivo *Instantaneous Overcurrent Relay*, do Professor Rodney Tan, conforme Figura 178.

Figura 178 – Busca no *File Exchange* pelo relé 50.

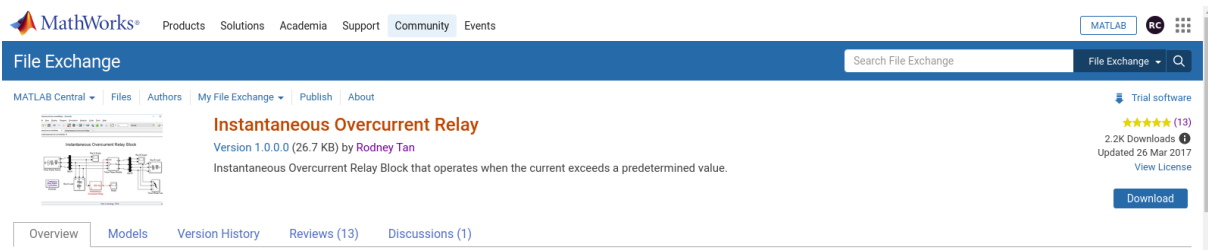


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao clicar sobre este link, o leitor terá acesso as informações sobre este arquivo, como por exemplo, uma visão geral sobre o arquivo, os modelos que o compõem e comentários de outros usuários sobre o arquivo. Para utilizar este arquivo, deve-se clicar no botão azul *Download*, à direita da página, conforme Figura 179.

Após fazer o download, o leitor poderá abrir o arquivo baixado através do botão *Open* na tela do editor *Simulink*.

Figura 179 – Informações do relé 50.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Este mesmo processo deve ser repetido para os arquivos do relé 51 e do projeto que inclui os blocos dos geradores fotovoltaicos. O nome de cada projeto utilizado está na lista abaixo.

- Relé 50: *Instantaneous Overcurrent Relay* por Rodney Tan.
- Relé 51: *AC Time Overcurrent Relay Block* por Rodney Tan.
- Geradores Fotovoltaicos: *Systems-Level Microgrid Simulation from Simple One-Line Diagram* por Jonathan LeSage.

Diferente dos arquivos contendo os relés, o arquivo dos geradores fotovoltaicos contém vários outros modelos. Os blocos ficam localizados no arquivo *exampleMicrogridLibrary.slx*.

A.14 Criação do subsistema dos relés 50/51

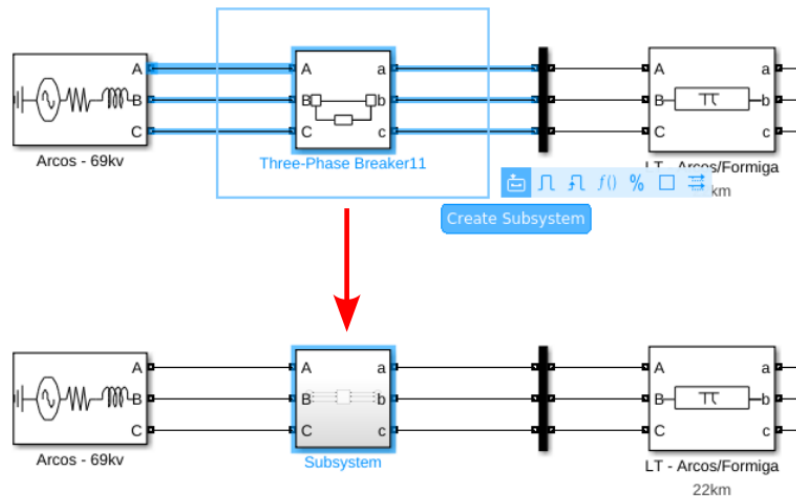
Esta seção é utilizada para a criação do modelo utilizado no exemplo 2 deste trabalho. Por segurança, é aconselhado ao leitor salvar uma cópia da base com carga estática para prosseguir.

Inicialmente, seleciona-se o disjuntor próximo a SE de Arcos para transforma-lo em um subsistema, conforme Figura 180.

Após criar o subsistema, o leitor deve entrar dentro do subsistema dando dois cliques sobre ele. Assim que entrar no subsistema, será necessário importar os blocos de relé 50 e 51, que foram baixados no site da *MathWorks*. Para isso, deve-se clicar em *Open*, na parte superior esquerda, e abrir o arquivo *InstantaneousOvercurrentRelay.slx*. Com o arquivo aberto, o bloco de relé 50 deverá ser copiado do arquivo original para o subsistema que foi criado, conforme Figura 181.

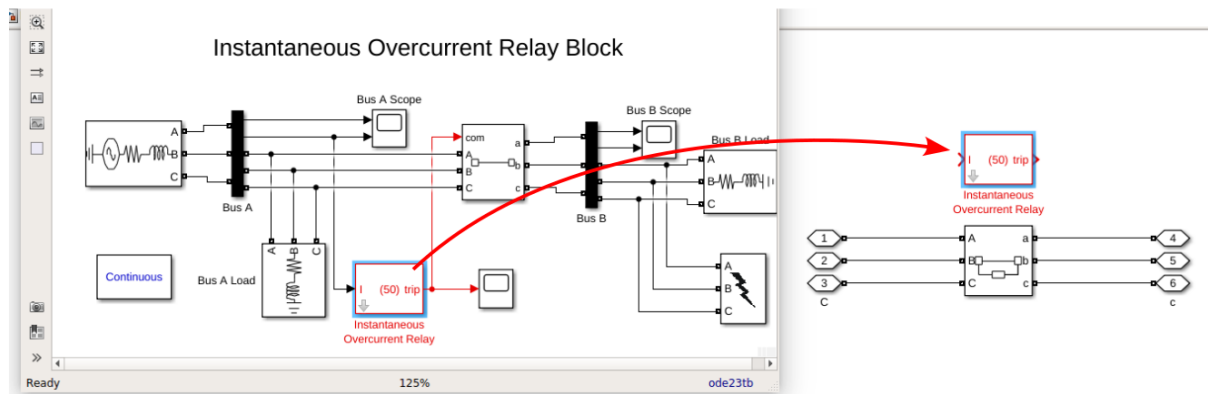
Após a cópia do relé 50, o mesmo deve ser feito para o relé 51 utilizando o arquivo *ACTimeOvercurrentRelayBlock.slx*. Com os dois blocos de relé dentro do subsistema, o leitor

Figura 180 – Criando subsistema do disjuntor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 181 – Copiando relé 50 para subsistema do disjuntor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

deve adicionar um bloco de medição trifásica de tensão e corrente ao subsistema e conecta-lo a esquerda do bloco de disjuntor.

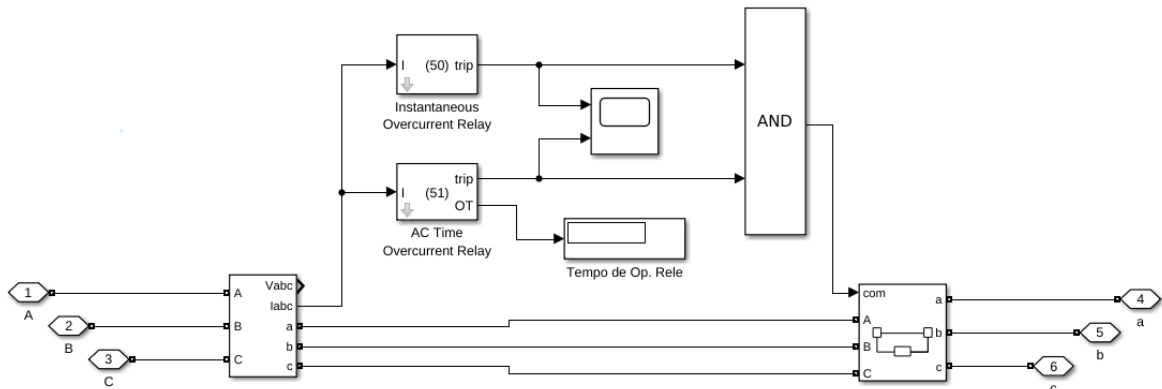
A saída de leitura de corrente, I_{abc} , deve ser conectada a entrada do relé 50 e do relé 51. As saídas *Trip* dos relés, devem ser conectadas a um bloco de porta lógica *AND* e a um scope que fará a leitura de seu comportamento. Um bloco *display* pode ser adicionado a saída *OT* do relé 51 para mostrar o tempo de operação do relé.

Para configurar o disjuntor, o leitor deve abrir suas configurações. Na opção *Switching times* deve-se ativar o *checkbox external*, assim uma nova porta de entrada será adicionada no bloco de disjuntor.

Agora, o leitor deve conectar a saída do bloco lógico *AND* a entrada *com* do bloco

disjuntor. A Figura 182 mostra como ficou as conexões do subsistema do disjuntor.

Figura 182 – Subsistema do disjuntor com relés 50 e 51.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O relé 50 foi configurado com corrente do transformador primário em 600 A e do secundário em 5 A, em 100% com *High-set* em 2x. O relé 51 foi configurado com o primário em 60 A, o secundário em 5, tipo de curva IEC normal inversa.

A.15 Configurando os geradores fotovoltaicos

Utilizando o mesmo método para importar os blocos de relé 50 e 51 do tópico anterior, o leitor deve importar os blocos que fazem parte do arquivo *exampleMicrogridLibrary.slx*, que estão visíveis na Figura .

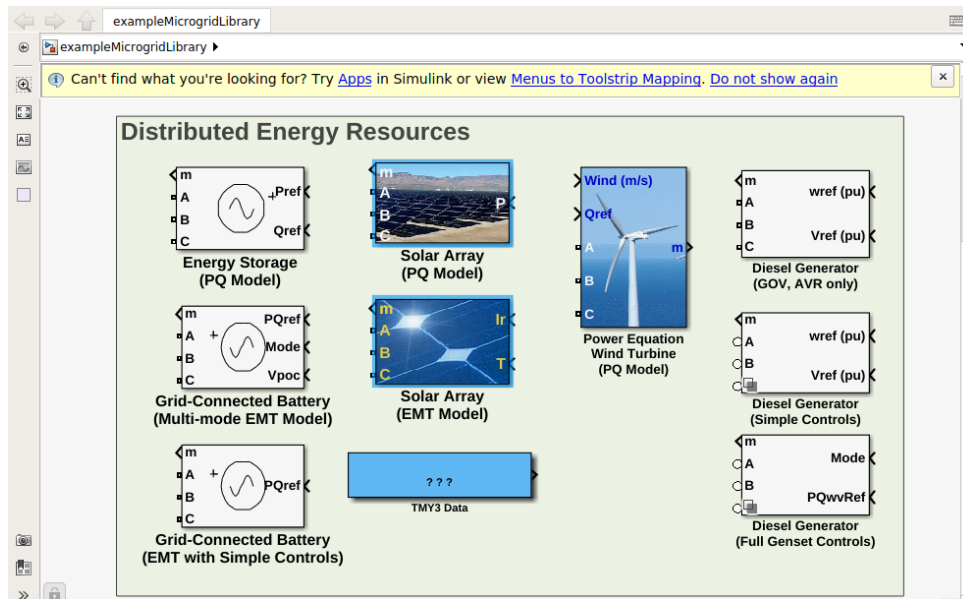
Diferente dos blocos de relé, estes blocos de geradores fotovoltaicos fazem parte de uma biblioteca, deste modo, o leitor apenas será capaz de usar o bloco caso a biblioteca esteja aberta, logo, caso o leitor feche a janela do *Simulink* que contem os blocos, um erro será reportado no próprio bloco, conforme Figura 184.

Para solucionar este problema, deve-se novamente abrir o arquivo da biblioteca *example-MicrogridLibrary.slx*. Com o bloco já importado para o projeto, é necessário fazer a quebra de conexão com a biblioteca, desta forma o bloco funcionará mesmo se a biblioteca for fechada.

Após quebrar a conexão, o bloco agora fará parte do projeto onde foi importado, desta forma, o leitor pode utiliza-lo mesmo após fechar a biblioteca.

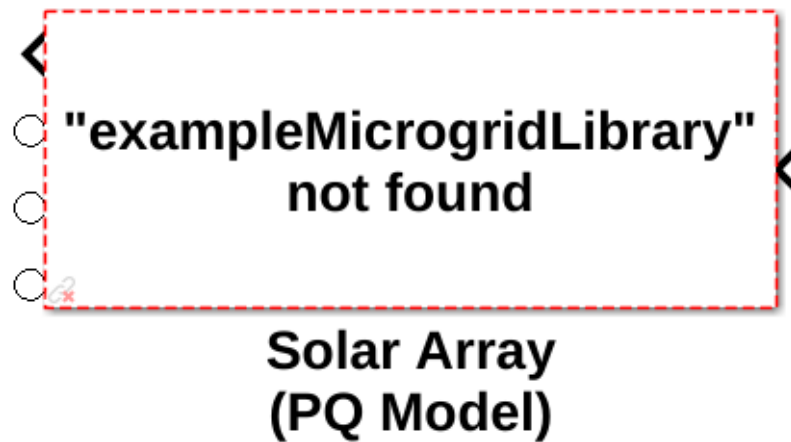
Agora que ambos os blocos estão no projeto, pode-se conectar o bloco escolhido para a simulação no sistema. O bloco gerador fotovoltaico tipo PQ, necessita de uma entrada com a curva de potência a ser gerada, neste caso, é utilizado um bloco de onda senoidal configurado para gerar apenas meia onda, para simular o nascer e por do sol. Para isso, a simulação foi

Figura 183 – Biblioteca com os blocos de geração fotovoltaica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 184 – Erro de bloco desconectado da biblioteca.



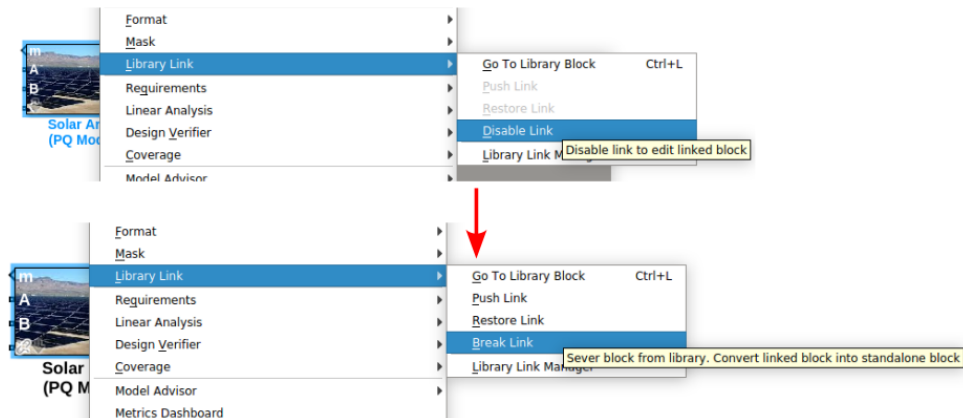
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

configurada para durar apenas 2,4 segundos, sendo que, cada 0,1 segundos representa 1 hora. As configurações do bloco de onda senoidal estão dispostos na Figura 186.

Para finalizar a configuração, o bloco de onda senoidal foi multiplicado por um bloco contante com o valor de $500e3$ e conectado a porta "P" do bloco. O bloco tipo PQ foi configurado com tensão nominal de 13,8 kV, 60 Hz e potência inicial de 500 kW. A configuração final pode ser vista na Figura 187.

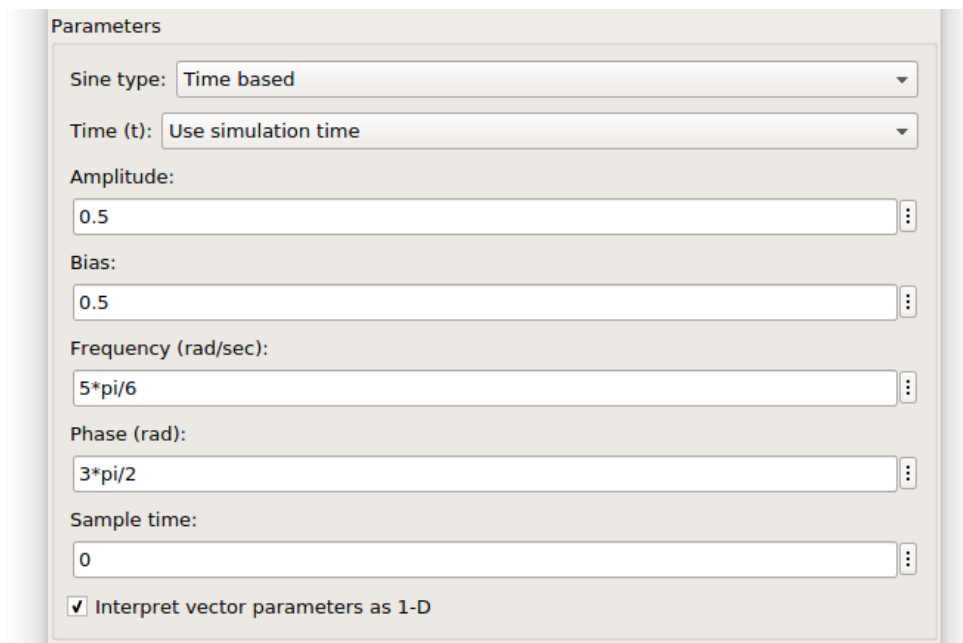
Para o bloco tipo EMT, a mesma conexão da multiplicação entre a onda senoidal e potência deve agora ser conectada na porta "Ir". Neste caso esta porta não recebe a potência e sim

Figura 185 – Quebrando a conexão entre o bloco e a biblioteca.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 186 – Parâmetros utilizados no bloco de onda senoidal.

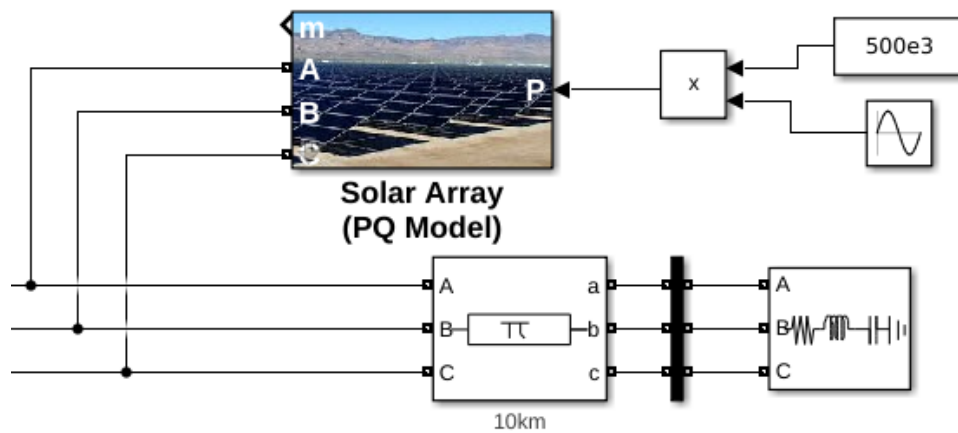


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

a irradiância, logo a constante de valor $500e3$ deve ser alterada para 1000. A segunda porta do bloco recebe a temperatura de operação, neste caso será conectado apenas uma constante de 45.

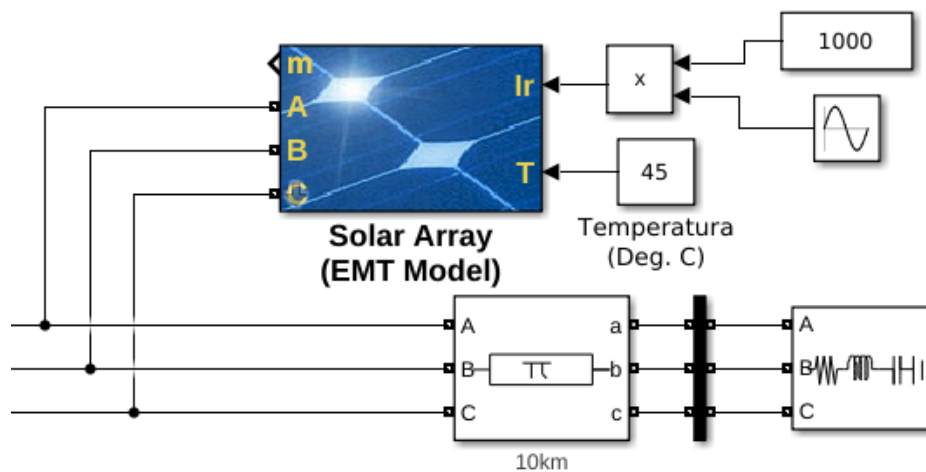
O bloco foi configurado com tensão nominal de 13,8 kV e 60 Hz, a potência se dá em múltiplos de 100 kW, logo foi configurada com o valor 5. O valor de *Simulation Time Step* sempre deve ser o mesmo valor que o valor de tempo de amostragem setado no bloco *powergui*, normalmente $50 \mu s$, e o valor de *Controller Time Step* foi configurado para ser metade do valor do tempo de amostragem, ou $25 \mu s$. A Figura 188 mostra o bloco pronto.

Figura 187 – Bloco gerador fotovoltaico tipo PQ pronto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 188 – Bloco gerador fotovoltaico tipo EMT pronto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

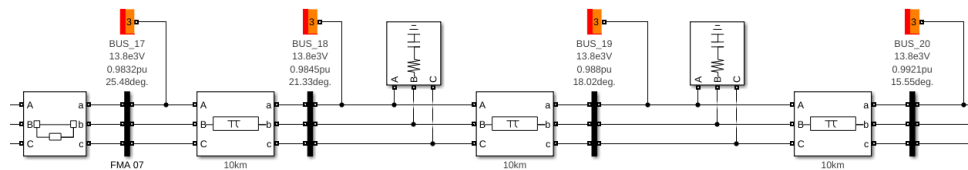
A.16 Utilizando o *Load Flow Analyzer*

Para se utilizar o *Load Flow Analyzer*, primeiramente deve-se conectar o bloco *Load Flow Bus* em cada barramento ao qual o leitor deseja analisar o fluxo de potência. Neste trabalho, o bloco será conectado a todos os barramentos.

O Bloco *Load Flow Bus* necessita de poucas configurações. Primeiro, o tipo de conector, que neste caso será simples ou *single*. O nome do bloco deve ser alterado para que cada bloco tenha um nome único caso contrário a ferramenta de cálculo de fluxo de potência não funcionará. A tensão base deve ser configurada para 13,8 kV para os barramentos após a SE de Formiga e 69 kV para os barramentos anteriores a SE de Formiga. A Figura 189 mostra um exemplo de um

alimentador com os blocos conectados aos barramentos.

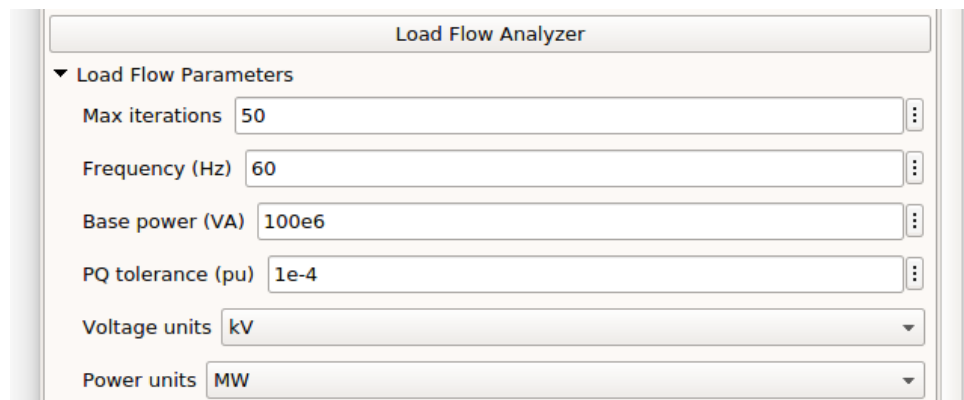
Figura 189 – Conexão dos blocos *Load Flow Bus* nos barramentos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após colocar os blocos no sistema, pode-se então executar a ferramenta *Load Flow Analyzer*. O leitor deve abrir as configurações do bloco *powergui* e ir na aba *Tools*, porém, caso o leitor queira fazer modificações nos parâmetros desta ferramenta há uma seção com o nome *Load Flow Parameters* onde pode-se alterar a quantidade máxima de iterações para os cálculos, frequência nominal, potência base e as unidades de tensão e potência conforme Figura 190.

Figura 190 – Parâmetros da ferramenta *Load Flow Analyzer*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao clicar em *Load Flow Analyzer*, uma nova janela será aberta contendo uma tabela com todos os barramentos e blocos que fazem parte do sistema analisado, além dos valores inicialmente configurados nestes blocos.

Para realizar o cálculo de fluxo de potência, o leitor deve clicar no botão localizado na parte superior da janela chamado *Compute*. Após clicar neste botão, o sistema será compilado, logo após, os valores calculados serão apresentados nas colunas que apresentam o sufixo "_LF", conforme mostrado na Figura 191.

Caso o leitor queira mostrar os valores diretamente nas informações dos blocos *Load Flow Bus*, necessita-se apenas clicar no botão *Apply* ao lado do botão *Compute*.

Figura 191 – Valores calculados pela ferramenta *Load Flow Analyzer*.

Block name	Block type	Bus type	Bus ID	Vbase (kV)	Vref (pu)	Vangle (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Qmin (Mvar)	Qmax (Mvar)	V_LF (pu)	Vangle_LF (deg)	P_LF (MW)	Q_LF (MVA)
1 Load Flow Bus	Bus	-	BUS_1	69.0000	1.0000	0	0	0	0	0	1.0000	0	0	0
2 Load Flow Bus1	Bus	-	BUS_2	69.0000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9946	-1.3240	0	0
3 Load Flow Bus10	Bus	-	BUS_11	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9776	23.3496	0	0
4 Three-Phase Series RLC Load5	RLC load	Z	BUS_12	13.8000	1.0000	0	4.5000	0.7899	-Inf	-Inf	0.9042	18.5685	3.6793	0.6458
5 Load Flow Bus12	Bus	-	BUS_13	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9777	23.3479	0	0
6 Three-Phase Series RLC Load6	RLC load	Z	BUS_14	13.8000	1.0000	0	0.7100	0.1449	-Inf	-Inf	0.9492	21.1973	0.6397	0.1305
7 Three-Phase Series RLC Load7	RLC load	Z	BUS_15	13.8000	1.0000	0	0.8700	0.1649	-Inf	-Inf	0.9303	19.6497	0.7529	0.1427
8 Three-Phase Series RLC Load8	RLC load	Z	BUS_16	13.8000	1.0000	0	0.7350	0.1299	-Inf	-Inf	0.9218	18.9255	0.6246	0.1104
9 Load Flow Bus16	Bus	-	BUS_17	13.8000	1.0000	0	0	0	0	0	0.9776	23.3461	0	0
10 Three-Phase Series RLC Load9	RLC load	Z	BUS_18	13.8000	1.0000	0	0.7650	-0.1290	-Inf	-Inf	0.9789	19.2019	0.7331	-0.1236
11 Three-Phase Series RLC Load...	RLC load	Z	BUS_19	13.8000	1.0000	0	0.7650	-0.1290	-Inf	-Inf	0.9824	15.8922	0.7384	-0.1245
12 Three-Phase Series RLC Load...	RLC load	Z	BUS_20	13.8000	1.0000	0	0.7650	-0.1290	-Inf	-Inf	0.9865	13.4211	0.7445	-0.1255

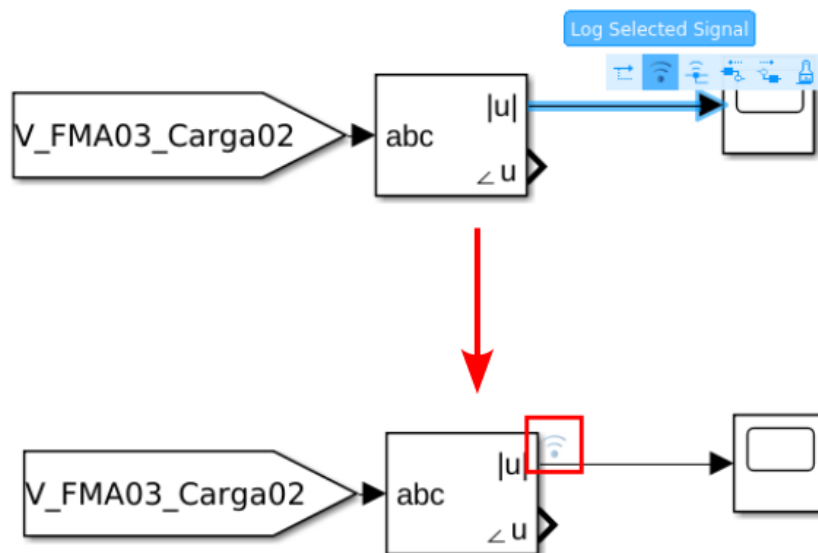
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.17 Utilizando o *Data Inspector* para comparações

Apesar de não ter sido utilizado durante a confecção deste trabalho, o *Data Inspector* é uma ferramenta importante utilizada para analisar os sinais selecionados e fazer comparações entre simulações.

Para utilizar o *Data Inspector*, o leitor deve primeiramente criar um registro (*log*) do sinal, ou sinais, que serão analisados. Desta forma, deve-se selecionar a linha de conexão de saída do sinal desejado e clicar em *Log Selected Signal*. Se o registro for criado, um ícone de sinal será mostrado na saída do sinal, conforme Figura 192.

Figura 192 – Criando registro do sinal para análise.



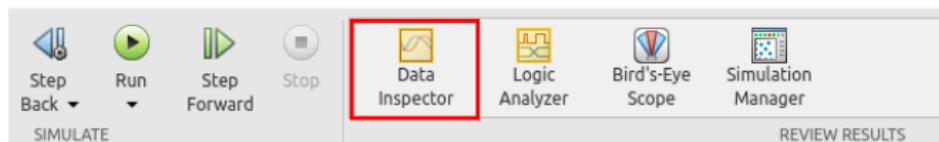
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Como exemplo, será criado o registro da tensão do barramento onde uma GD foi instalada e será feita uma simulação com as placas fotovoltaicas funcionando a 45 graus e a segunda

simulação será com 55 graus. Primeiramente deve-se rodar a simulação com o bloco de geração fotovoltaica setado para 45 graus. Assim que esta simulação for terminada, este valor será alterado para 55 graus e então será simulado novamente.

Após as duas simulações finalizarem, o leitor deve clicar no botão *Data Inspector* localizado na *Toostrip* ao lado dos botões de rodar simulação, visível na Figura 193.

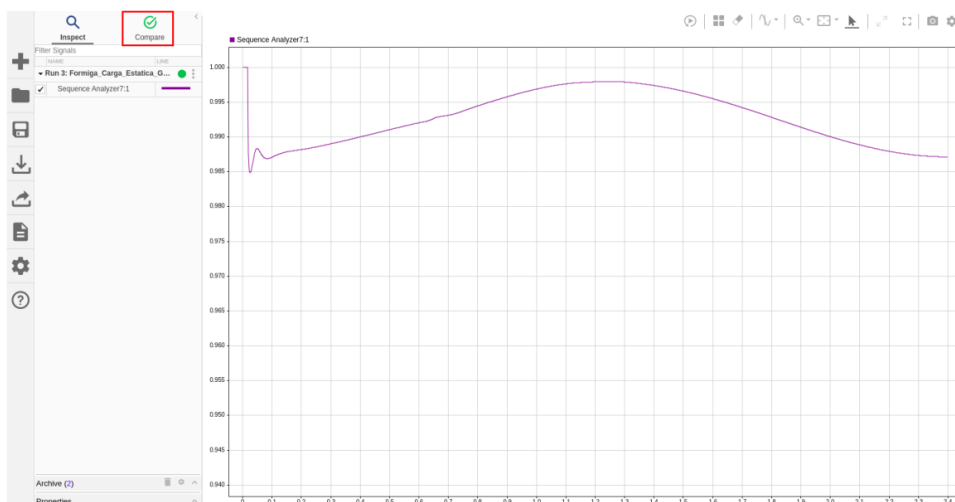
Figura 193 – Localização do *Data Inspector*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após clicar no botão *Data Inspector*, uma nova janela será apresentada. De início, esta janela já se encontra no modo de inspeção, onde o leitor poderá analisar o sinal com todos os detalhes. Para entrar no modo de comparação, deve-se clicar na opção *Compare* na parte superior esquerda da janela, conforme Figura 194.

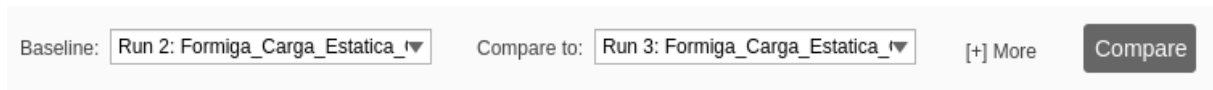
Figura 194 – Janela principal do *Data Inspector*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Assim que clicar no botão *Compare*, a janela será alterada e na parte superior o leitor deverá escolher quais simulações serão comparadas. A primeira seleção é a simulação base, a segunda seleção é a simulação que será comparada com a base. Neste caso, a simulação 2 será comparada com a simulação 3 e logo em seguida, deve-se clicar no botão a direita *compare*, conforme Figura 195.

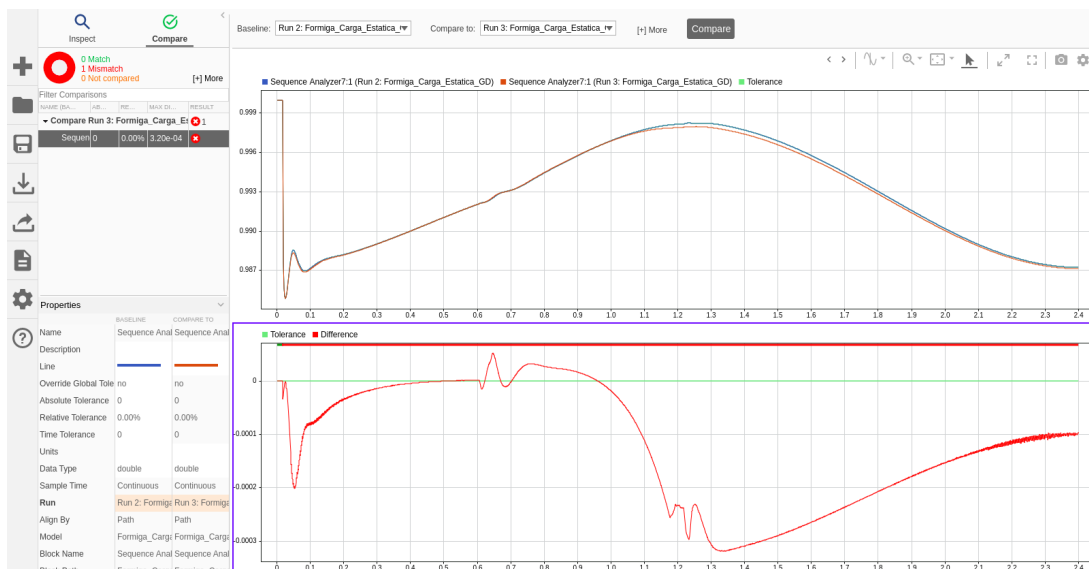
Figura 195 – Seleção entre as simulações que serão comparadas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao clicar para comparar, a ferramenta fará a comparação entre os sinais selecionados e disponibilizará todas as informações em uma janela, conforme demonstra Figura 196. No gráfico superior da janela de comparação, é mostrado a diferença entre os sinais das duas simulações. No gráfico inferior, é mostrado a variação de valores entre o sinal da simulação de base, linha verde, e o sinal da simulação de comparação, linha vermelho, no qual, é apresentado na parte superior, uma barra dina que se estende por todo o gráfico, indicando onde os dois sinais comparados são iguais e onde existe diferença. Caso a barra esteja verde, não há variação entre os sinais, se estiver vermelho, há variação.

Figura 196 – Resultado entre as simulações comparadas.

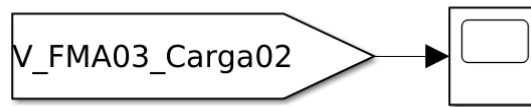


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A.18 Utilizando o *FFT Analysis*

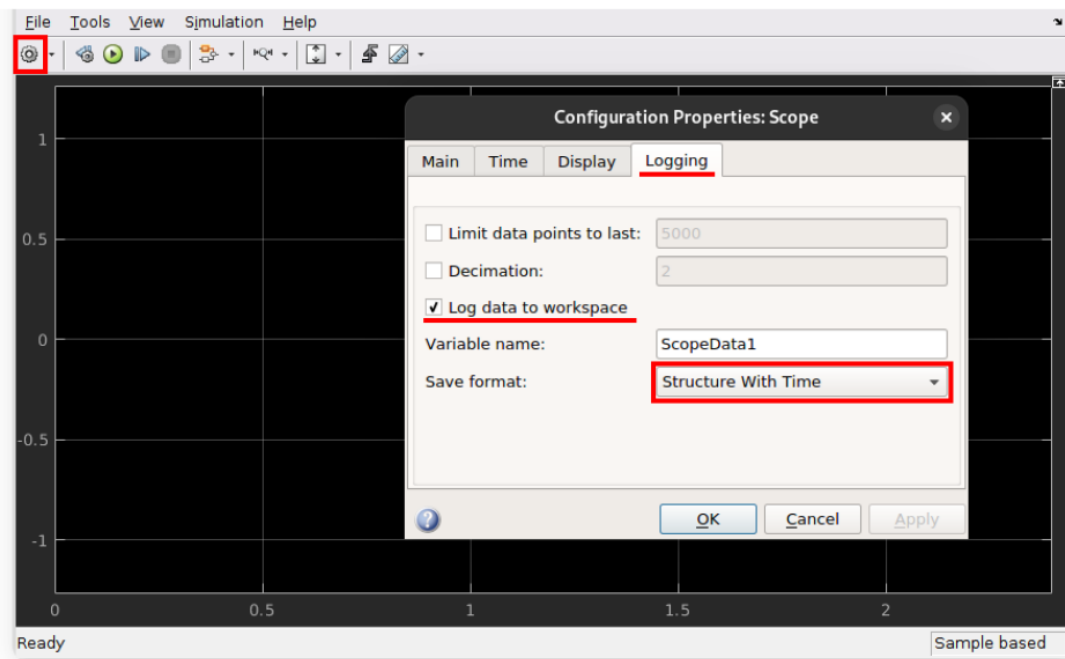
Para utilizar a ferramenta *FFT Analysis*, primeiramente, é necessário conectar o sinal que deseja-se analisar a um bloco de *scope* separado. A Figura 197 mostra o sinal de tensão do barramento da segunda carga do alimentador FMA 03 conectada ao *scope*.

Após a conexão do sinal, o leitor deve abrir o *scope*, e na nova janela aberta, clicar no ícone de engrenagem. Isto abrirá uma nova janela de configurações do *scope*. O leitor deve ir

Figura 197 – Conexão de sinal em *scope* para utilização do *FFT Analysis*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

até a aba *Logging* e ativar o quadro *log data to workspace*, fazendo com que duas opções sejam ativadas. A primeira é o nome da variável que irá guardar todos os dados do sinal conectados ao *scope*, a segunda opção é o formato com o qual esta variável será salva. O nome da variável fica a critério do leitor, porém é necessário alterar o formato da variável para *Structure With Time*, conforme Figura 198.

Figura 198 – Configuração do *scope* para aquisição de dados.

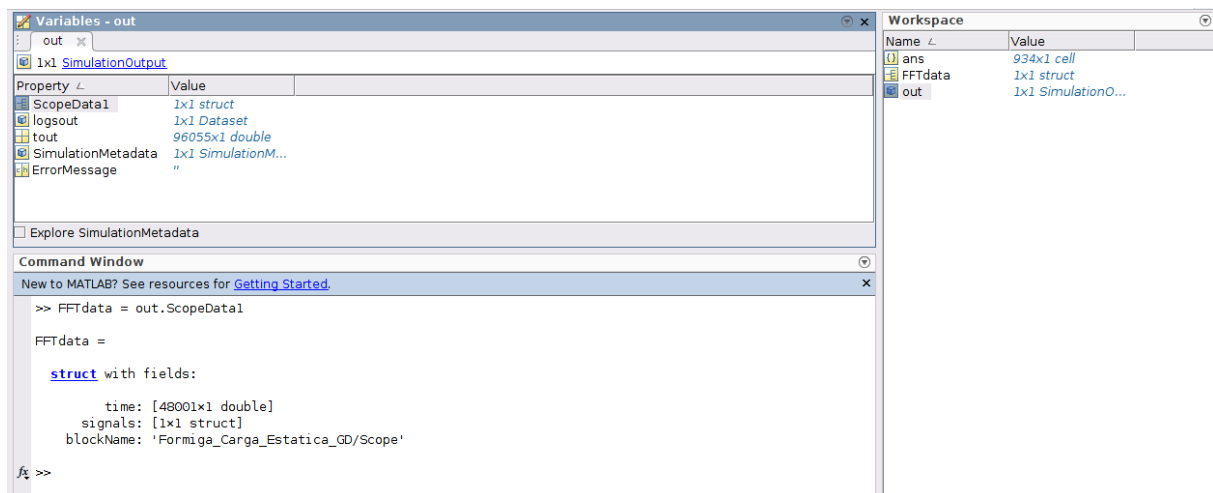
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após esta configuração, o leitor pode então rodar a simulação e os dados serão salvos na variável com o nome escolhido anteriormente. Após a simulação terminar, deve-se voltar a tela principal do MATLAB para extrair os dados salvos na variável. A variável com os dados, fica guardada dentro de um objeto chamado "*out*", que contem todas as informações da simulação realizada pelo *Simulink*. O leitor então deve atribuir uma nova variável para guardar estes dados contidos dentro do objeto "*out*". Sendo assim para executar essa ação o leitor deve apenas utilizar o seguinte código:

```
1 FFTData = out.ScopeData1
```

A Figura 199 mostra a criação de uma variável chamada "FFTData" recebendo os dados do sinal selecionado conectado ao scope após a simulação.

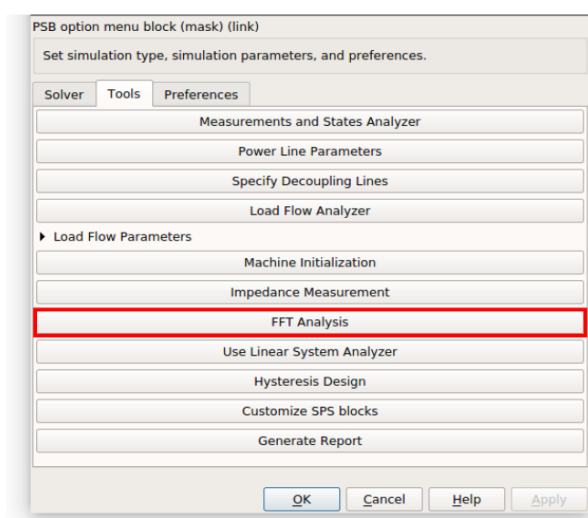
Figura 199 – Criando uma variável com os valores do sinal conectado ao *scope*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Agora, com a variável devidamente criada, pode-se então utilizar a ferramenta *FFT Analysis* para analisar os harmônicos presentes no sinal. Para isso o leitor deve abrir o *powergui* e na aba *Tools* conforme Figura 200.

Figura 200 – Localização da ferramenta *FFT Analysis*.

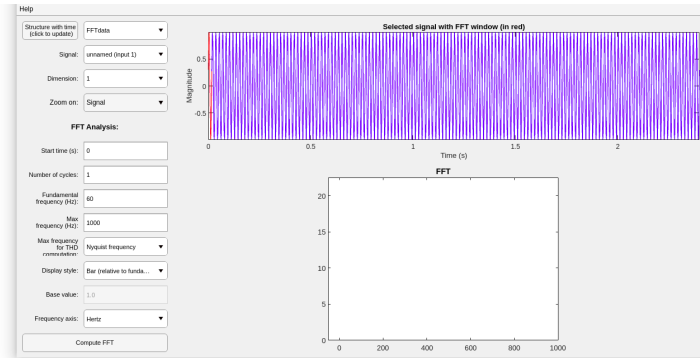


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao clicar na ferramenta, uma nova janela abrirá, conforme Figura 201. Nesta janela o leitor poderá executar a análise utilizando as configurações que forem necessárias. A variável

criada no MATLAB deve estar selecionada automaticamente, desta forma o leitor pode observar apenas um ciclo do sinal caso altere a opção *Zoom on* de *Signal* para *FFT Window*.

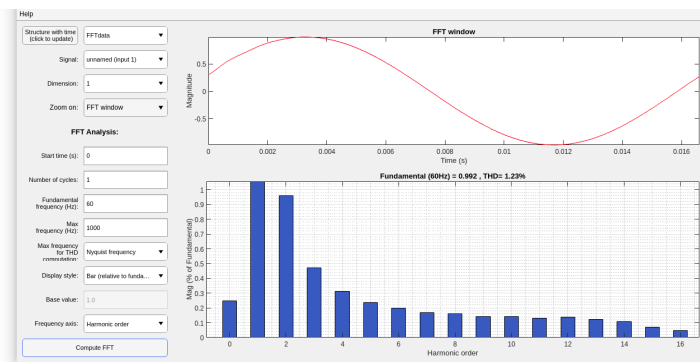
Figura 201 – Tela da ferramenta *FFT Analysis*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para este trabalho, apenas será alterado a forma de visualização do gráfico de frequências para ordem harmônicos. Para isso, o leitor deve apenas alterar a opção *Frequency axis* de *Hertz* para *Harmonic order* e então clicar em *Compute FFT*. Assim que a operação finalizar um gráfico de barras será mostrado com os harmônicos presentes no sinal analisado conforme Figura 202

Figura 202 – Ferramenta *FFT Analysis* com resultados obtidos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Caso o leitor deseje saber as informações em formato de lista deve-se alterar a opção *Display style* de *Bar* para *List*.