

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DANILO ROMULO DANIEL PAGANO LIMA

**Análise do Restaurador Dinâmico de Tensão para Melhorar a Qualidade de
Energia na ocorrência de Faltas e na Restauração de Redes de Distribuição**

**Ilha Solteira
2023**

DANILO ROMULO DANIEL PAGANO LIMA

Análise do Restaurador Dinâmico de Tensão para Melhorar a Qualidade de Energia na ocorrência de Falhas e na Restauração de Redes de Distribuição

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Jonatas Boas Leite
Orientador

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

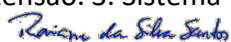
L732a Lima, Danilo Romulo Daniel Pagano.
Análise do restaurador dinâmico de tensão para melhorar a qualidade de energia na isolação de faltas e restauração de redes de distribuição / Danilo Romulo Daniel Pagano Lima. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
66 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Jonatas Boas Leite

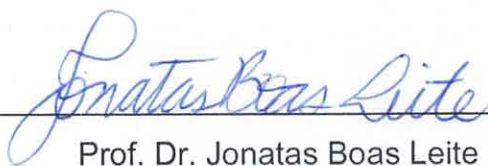
Inclui bibliografia

1. Restaurador dinâmico de tensão. 2. Compensação de tensão. 3. Sistema de distribuição. 5. Matlab. 6. Simulink.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Setor Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Bibliotecas e Documentação
CBB/8 - 9999

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos cinco dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e três, o discente **Danilo Romulo Daniel Pagano Lima**, matriculado sob o nº 212052802, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jonatas Boas Leite, o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro e o Doutorando Cléberton Reiz, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Análise do Restaurador Dinâmico de Tensão para Melhorar a Qualidade de Energia na Isolação Faltas e Restauração de Redes de Distribuição**", obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito APROVADO.



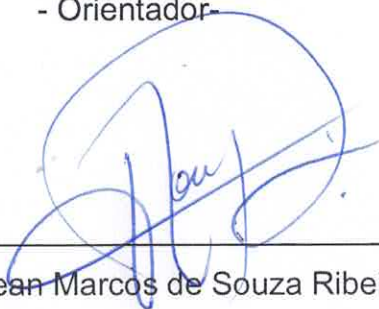
Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -



Danilo Romulo Daniel Pagano Lima

- Discente -



Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro

- Membro da Banca -



Doutorando Cléberton Reiz

- Membro da Banca -

DEDICO

A mim, porquê dificilmente o faço. À
todos que fazem parte da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe por todo abraço que me deu quando pensei em desistir, pelo apoio e sacrifício para que tudo isso fosse possível. A minha avó e irmão, pelo apoio. Aos meus amigos.

Ao professor Jonatas Boas Leite, pela oportunidade e ajuda na construção desse trabalho.

À Batera do Inferno, pela ajuda em um momento difícil, pelas oportunidades, experiências e amizades vividas.

À república Ambeb, por tudo o que vivemos e os jogos do Palmeiras. Em especial ao meu amigo Fernando Jordão Filho.

À UNESP, pelos estudos desenvolvidos e por tornar possível os três últimos parágrafos.

À Isabella Guedes e Iara Ehrenberg, por todo o acompanhamento e incentivo que me deram para finalizar o trabalho e à Fernanda Souza, pelo último impulso.

A Deus e a vida, por tudo, mas principalmente por colocar excelentes pessoas no meu caminho.

“A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas mais difíceis, se você se lembrar de acender a luz”

Alvo Dumbledore.

RESUMO

Neste trabalho, um método de compensação dos níveis de tensão do sistema de distribuição utilizando um restaurador dinâmico de tensão (DVR) (do Inglês, *Dynamic Voltage Restorer*) é proposto e avaliado. Para implementar o dispositivo, um controle é desenvolvido, baseado na transformada $dq0$, para obter um vetor de tensão a partir do barramento imediatamente anterior ao da carga sensível, de forma que esse vetor de tensão seja simétrico e com fator de potência unitário. Então, o dispositivo de compensação é instalado na rede de distribuição para manter a qualidade de energia, devido sua capacidade de identificar o valor da queda de tensão causada por algum tipo de falta na rede e compensá-lo sem que o nível de tensão no barramento de carga sensível seja alterado. As faltas simuladas são trifásica, bifásica e fase-terra, permitindo observar o comportamento e desempenho do DVR. A implementação de todo o sistema é realizada no ambiente MATLAB® - SIMULINK e os resultados obtidos são classificados de acordo com o disposto na resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Restaurador Dinâmico de Tensão. Compensação de tensão. Sistema de distribuição. MATLAB®. Simulink.

ABSTRACT

In this work, a method of compensating the distribution system voltage levels using a Dynamic Voltage Restorer (DVR) is proposed and evaluated. To implement the device, a control is developed, based on the dq0 transform, to obtain a voltage vector from the bus immediately before the sensitive load, so that this voltage vector is symmetrical and with unity power factor. So, the compensation device is installed in the distribution network to maintain the power quality, due to its capability to identify the value of the voltage drop caused by some type of fault in the network and compensate it without the voltage level on the bus of sensitive load is changed. The simulated faults are three-phase, two-phase and phase-to-ground, allowing you to observe the behavior and performance of the DVR. The implementation of the entire system is carried out in the MATLAB® - SIMULINK environment and the results obtained are classified according to the provisions of the National Electric Energy Agency resolution.

Keywords: Dynamic Voltage Restorer. Voltage compensation. Distribution system. MATLAB®. Simulink.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Estrutura convencional de um DVR.....	21
Figura 2	- Diagrama fasorial do método de compensação pré-falta.....	24
Figura 3	- Método de compensação pré-falta: curva de compensação para diferentes saltos de fase.....	25
Figura 4	- Diagrama fasorial do método de compensação em fase.....	26
Figura 5	- Método de compensação em fase: curva de compensação...	27
Figura 6	- Diagrama fasorial do método de compensação pré-falta com otimização de energia.....	28
Figura 7	- Método de compensação em fase: curva de compensação...	29
Figura 8	- Diagrama unifilar da conexão do DVR.....	30
Figura 9	- Bloco Regulador de Tensão.....	32
Figura 10	- Forma de onda da tensão no terminal do conversor.....	34
Figura 11	- Bloco de controle do DVR.....	35
Figura 12	- Sistema de distribuição com instalação do DVR: (a) suprido por linha de back up e (b) suprido por fonte independente.....	36
Figura 13	- Parâmetros da linha de transmissão LT.....	37
Figura 14	- Parâmetros de carga.....	38
Figura 15	- Tensão em B3 e B4 para falta em LD ₀ e DVR com linha de back up.....	40
Figura 16	- Tensão em B3 e B4 para falta em LD ₀ e DVR com fonte independente.....	41
Figura 17	- Tensão em B3 e B4 para falta em LT e DVR com linha de back up	42
Figura 18	- Tensão em B3 e B4 para falta em LT e DVR com fonte independente.....	42
Figura 19	- Tensão em B3 e B4 para falta em LD ₀ /LT e DVR com linha de back up.....	43
Figura 20	- Tensão em B3 e B4 para falta em LD ₀ /LT e DVR com fonte independente.....	43

Figura 21 - Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LD ₀ e DVR com linha de back up.....	44
Figura 22 - Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LD ₀ e DVR com fonte independente.....	45
Figura 23 - Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LT e DVR com linha de back up.....	45
Figura 24 - Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LT e DVR com fonte independente.....	46
Figura 25 - Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LD ₀ /LT e DVR com linha de back up.....	46
Figura 26 - Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LD ₀ /LT e DVR com fonte independente.....	47
Figura 27 - Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LD ₀ e DVR com linha de back up.....	48
Figura 28 - Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LD ₀ e DVR com fonte independente.....	48
Figura 29 - Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LT e DVR com linha de back up.....	49
Figura 30 - Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LT e DVR com fonte independente.....	49
Figura 31 - Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LD ₀ /LT e DVR com linha de back up.....	50
Figura 32 - Tensão em B3 e B4, falta 1 ϕ em LD ₀ /LT e DVR com fonte independente.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Classificação da ANEEL para variações de curta duração.....	20
Tabela 2	- Valores de tensão máxima e mínima durante a compensação em B4.....	51
Tabela 3	- Classificação da ANEEL para a tensão de atendimento.....	52
Tabela 4	- Classificação das tensões em B4 após a compensação – back up.....	52
Tabela 5	- Classificação das tensões em B4 após a compensação – fonte Independente.....	53
Tabela 6	- Estratificação dos eventos de VTCD.....	54
Tabela 7	- Fatores de ponderação e fator de impacto base.....	55
Tabela 8	- Classificação das tensões em B3 após a compensação – back up.....	55
Tabela 9	- Sensibilidade e fator de ponderação para DVR com linha de back up.....	56
Tabela 10	- Sensibilidade e fator de ponderação para DVR com fonte independente.....	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	<i>Alternate Current</i> (Corrente alternada)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i> (Restaurador Dinâmico de Tensão)
IGBT	<i>Isolated-Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
LD	Linha de Distribuição
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso)
SE	Subestação
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i> (Compensador Estático Síncrono)
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i> (Inversor como fonte de tensão)

LISTA DE SÍMBOLOS

φ	Ângulo da tensão da Carga
δ	Ângulo do salto de fase gerado pela falta
γ	Ângulo de salto de fase gerado pelo DVR
β	Ângulo da tensão do DVR
2ϕ	Bifásico
C_{DC}	Capacitor do <i>link</i> DC
$I_S^{postfault}$	Corrente de alimentação após a falta
$I_{Load}^{prefault}$	Corrente na carga antes da falta
S	Grandeza genérica em que S se aplica a transformada dq0
L_{DC}	Indutor do <i>link</i> DC
x	Magnitude ou módulo da tensão do DVR
1ϕ	Monofásico (fase-terra)
pu	Por unidade - unidade de medida
P_L	Potência ativa da carga
Q_L	Potência reativa da carga
$V_S^{postfault}$	Tensão de alimentação após da falta.
$V_{Load}^{prefault}$	Tensão na carga antes da falta
V_{3abc}	Tensão no barramento/barra três
V_{4abc}	Tensão no barramento/barra quatro
S_d	Transformada da grandeza S em relação ao eixo direto
S_q	Transformada da grandeza S em relação ao eixo de quadratura S_0
S_0	Transformada da grandeza S de seuquencia zero
V_{DVR}	Tensão injetada pelo DVR
S_a	Valor da grandeza da fase a
S_b	Valor da grandeza da fase b
S_c	Valor da grandeza da fase c
k	Variação de magnitude da tensão de alimentção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD).....	17
1.1.1	AFUNDAMENTO DE TENSÃO	17
1.1.2	ELEVAÇÃO DE TENSÃO	18
1.1.3	INTERRUPÇÃO DE FORNECIMENTO.....	18
1.1.4	CLASSIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	18
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO	21
2.1	TOPOLOGIAS DO DVR	21
2.1.1	DVR COM UNIDADE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	22
2.1.2	DVR SEM UNIDADE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	22
2.2	COMPONENTES DO DVR	22
2.2.1	INVERSOR DE FONTE DE TENSÃO (VSI)	22
2.2.2	FILTRO DE LINHA.....	23
2.2.3	TRANSFORMADORES DE INJEÇÃO DE TENSÃO.....	23
2.2.4	UNIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	23
2.3	TÉCNICAS DE COMPENSAÇÃO.....	23
2.3.1	MÉTODO DE COMPENSAÇÃO PRÉ-FALTA.....	24
2.3.2	MÉTODO DE COMPENSAÇÃO EM FASE	26
2.3.3	MÉTODO DE COMPENSAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA.....	27
2.4	CONEXÃO DO DVR NO SISTEMA.....	29
2.5	TRANSFORMADA dq0.....	31
3	SISTEMA DE CONTROLE DO DVR	32
3.1	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE	32
3.2	REGULADOR DE TENSÃO.....	32
3.2.1	BLOCOS “abc to dq0” E “Selector”	33
3.2.2	BLOCOS “Abs” E “MinMax”	33
3.2.3	BLOCOS “Mean” E “Gain1”	33
3.2.4	BLOCOS “saturation”, “Math Function”, “Slider Gain” e “Bias”	33
3.2.5	BLOCOS “Product” E “dq0 to abc”	34
3.2.6	FORMAS DE ONDA DO REGULADOR DE TENSÃO.....	34
3.3	BLOCO DE CONTROLE DO DVR.....	35
3.4	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E DVR SIMULADOS	35
3.4.1	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SIMULADO.....	36

3.4.2	CARACTERÍSTICAS DO DVR IMPLEMENTADO.....	38
4	RESULTADOS	39
4.1	FALTA TRIFÁSICA.....	39
4.1.1	FALTA TRIFÁSICA ADJACENTE A LD_0	39
4.1.2	FALTA TRIFÁSICA ADJACENTE A LT.....	41
4.1.3	FALTAS TRIFÁSICAS SEGUIDAS, ADJACENTES A LD_0 E A LT.....	43
4.2	FALTA BIFÁSICA	44
4.2.1	FALTA BIFÁSICA ADJACENTE A LD_0	44
4.2.2	FALTA BIFÁSICA ADJACENTE A LT.....	45
4.2.3	FALTA BIFÁSICA ADJACENTE A LD_0 E A LT.....	46
4.3	FALTA FASE-TERRA.....	48
4.3.1	FALTA FASE-TERRA ADJACENTE A LD_0	48
4.3.2	FALTA FASE-TERRA ADJACENTE A LT.....	49
4.3.3	FALTA BIFÁSICA ADJACENTE A LD_0 E A LT.....	50
4.4	CONFORMIDADE PARA A FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO.....	51
4.4.1	CONFORMIDADE PARA O DVR SUPRIDO POR LINHA DE BACK UP.....	53
4.4.2	CONFORMIDADE PARA O DVR SUPRIDO FONTE INDEPENDENTE.....	54
4.5	SEVERIDADE DO EVENTO DE VTCD	55
4.5.1	SEVERIDADE SEM DVR.....	56
4.5.2	SEVERIDADE PARA O DVR SUPRIDO POR LINHA DE BACKUP	57
4.5.3	SEVERIDADE PARA O DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE	57
5	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60
	ANEXO.....	62
A.1	– PARÂMETROS DOS BLOCOS DO REGULADOR DE TENSÃO	62
A.1.1	BLOCOS “abc to dq0” E “Selector”	62
A.1.2	BLOCOS “Abs” E “MinMax”	62
A.1.3	BLOCOS “Mean” E “Gain1”	62
A.1.4	BLOCOS “saturation”, “Math Function” E “Slider Gain”	63
A.1.5	BLOCOS “product” E “dq0 to abc”	63
A.2	– SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO IMPLEMENTADO.....	64
A.2.1	DVR SUPRIDO POR LINHA DE BACK UP.....	64
A.2.2	DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE.....	65
A.3	– PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES DE INJEÇÃO	66

1 INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição é uma parte do sistema de potência responsável por transportar a energia elétrica até os consumidores finais para sua utilização. Todo consumidor de energia elétrica deseja que a eletricidade disponibilizada em seus terminais tenha uma tensão livre de distorção. Os distúrbios que podem causar essas distorções na tensão podem ser de diversos tipos, como aumento e afundamento de tensão, oscilações, tensões desequilibradas, interrupções momentâneas e transitórios de tensão. Esses exemplos são produzidos nas redes de distribuição e afetam severamente as cargas sensíveis (KHETARPAL; TRIPATHI, 2020).

1.1 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD)

Para este trabalho utilizou-se a classificação de variação de tensão de curta duração dada pela agência nacional de energia elétrica (ANEEL), em sua Resolução Normativa nº 956/2021 – Anexo VIII, os módulos dos procedimentos de distribuição (Resolução Normativa nº956/2021). Antes da classificação das VTCDs, apresentam-se as definições dos fenômenos de afundamento de tensão, elevação de tensão e interrupção do fornecimento, para o entendimento do estudo.

1.1.1 AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Afundamento de tensão é uma queda no valor da magnitude da tensão, seguido por seu reestabelecimento em uma curta faixa de tempo. Quando o evento de afundamento de tensão ocorre, os equipamentos que estiverem conectados a rede podem sofrer com a perda de eficiência na sua operação, ou até ficarem inoperantes (MELHORN; DAVIS; BEAM, 1998). Normalmente, afundamentos de tensão ocorrem devido acionamento de motores de indução, falhas nos equipamentos de proteção, entre outros (SOOMRO; LARIK; et al, 2021).

1.1.2 ELEVAÇÃO DE TENSÃO

Elevação de tensão é um aumento na magnitude da tensão em um curto período de tempo, não é um evento comum. O nível de aumento da magnitude da tensão depende da distância entre a carga e o ponto onde ocorre uma falta, que é o evento responsável pela elevação de tensão na rede, além das características do sistema de distribuição, como a impedância do trecho e o aterramento (AWAD; BLAABJERG, 2004).

1.1.3 INTERRUPÇÃO DE FORNECIMENTO

A interrupção é caracterizada pela ausência de tensão em uma parte ou em todo o sistema de distribuição. Dentre as causas de interrupções destacam-se as descargas atmosféricas, chuva, vento, falhas no equipamento de proteção, objetos na rede, entre outros (ONS. 2023)

1.1.4 CLASSIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

A ANEEL define, nos procedimentos de distribuição, que as variações de tensão de curta duração podem ser classificadas como variação momentânea de tensão e variação temporária de tensão. Elas possuem duração inferior a 3 minutos. Na forma de interrupção, afundamento e elevação de tensão, podem ser classificadas como momentânea, caso o evento dure até 3 segundos e temporárias caso o evento dure entre 3 segundos e 3 minutos (REN 956/2021 – Anexo VIII). Na Tabela 1 há um detalhamento dessa classificação, segundo a ANEEL, para os tipos de VTCDs.

Afundamento e elevamento de tensão, e interrupções momentâneas são consideradas variações de tensão de curta duração (VAN DEN BROECK, et al., 2018). Tais variações representam problemas quanto a qualidade da energia e podem ser produzidas pela comutação de grandes cargas, como os motores de indução, equipamentos de proteção e de automação da rede de distribuição, com mau funcionamento e, também, devido a faltas. Os afundamentos de tensão tem como causas, principalmente, a ligação de máquina pesada, partida de grandes cargas, compensação de reativo incorreta e faltas. Para os consumidores, seja ele

industrial, comercial ou residencial, a qualidade da energia é um fator de grande importância, pois sua baixa qualidade pode afetar a segurança, confiabilidade e eficiência de equipamentos. Por isso, as soluções para esses problemas de variação de tensão é uma preocupação das empresas concessionárias de distribuição de energia.

Tabela 1 – Classificação da ANEEL para variações de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão – IMT	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão – AMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão – EMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão – ITT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão – ATT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão – ETT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: Anexo VIII da Resolução Normativa nº 956/2021.

Para compensar um grande valor de afundamento de tensão, uma alternativa é a compensação de potência ativa e reativa. Assim, a injeção de potência ativa no sistema pode ser feita por meio de uma fonte de fornecimento de energia externa ou dispositivo armazenador de energia. Uma solução simples, que é eficaz e de baixo custo, para a compensação de pequenos e grandes afundamentos de tensão é o restaurador dinâmico de tensão (DVR), do Inglês *Dynamic Voltage Restorer*. O DVR é um dispositivo de energia personalizado, baseado no compensador estático de reativos (STATCOM), muito utilizado nos sistemas de transmissão em corrente alternada. A instalação do DVR se dá conectando-o em série a rede, de forma que seja capaz de injetar uma tensão alternada, que é adicionada ao barramento de carga para as compensações de tensão (HASSANEIN et al., 2020). O primeiro DVR concebido foi de 12,47 kV, fabricado pela Westinghouse e montado pela Duke

Power Company situada na Carolina do Norte no mês de agosto de 1996. Após resultados bem-sucedidos, a aplicação de DVR's tem aumentado dia a dia em todo o mundo.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Neste trabalho de graduação, tem-se como objetivo principal analisar o comportamento de um restaurador dinâmico de tensão (DVR), inserido no sistema de distribuição de energia elétrica. Para isso, primeiramente define-se o método de compensação que o dispositivo realizará, que para esse estudo é a compensação em fase. Em seguida, aponta-se o tipo de controle que o dispositivo deve possuir para poder realizar a compensação e se o dispositivo será suprido por sistema de armazenamento de energia ou por fonte independente. Nesse estudo, opta-se pelo controle baseado na transformada $dq0$, sendo o dispositivo suprido por fonte independente. A partir da simulação do sistema, no ambiente Simulink do MatLAB, testando para as situações de faltas trifásicas, bifásicas e fase-terra, deve-se analisar o comportamento do DVR em cada situação, para as duas possibilidades de suprimento independente propostas, sendo por uma linha de backup do próprio sistema de distribuição e por um barramento proveniente de outra linha ou gerador.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Referente à estrutura deste trabalho, no Capítulo 2 aborda-se o que é o restaurador dinâmico de tensão, quais são suas tipologias mais comuns, os seus componentes e como é conectado no sistema de distribuição, bem como as técnicas de compensação. O Capítulo 3 discute-se o método de controle utilizado, sua implementação e as características do sistema de distribuição simulado.

No Capítulo 4, apresenta-se os resultados obtidos na simulação para cada falta simulada, para o DVR suprido por fonte independente, bem como a análise dos níveis de tensão comparando-os com os níveis de conformidade regulados, além da severidade dos eventos de variação de tensão de curta duração.

No Capítulo 5 é encerrado o trabalho, trazendo as conclusões e análises dos resultados obtidos.

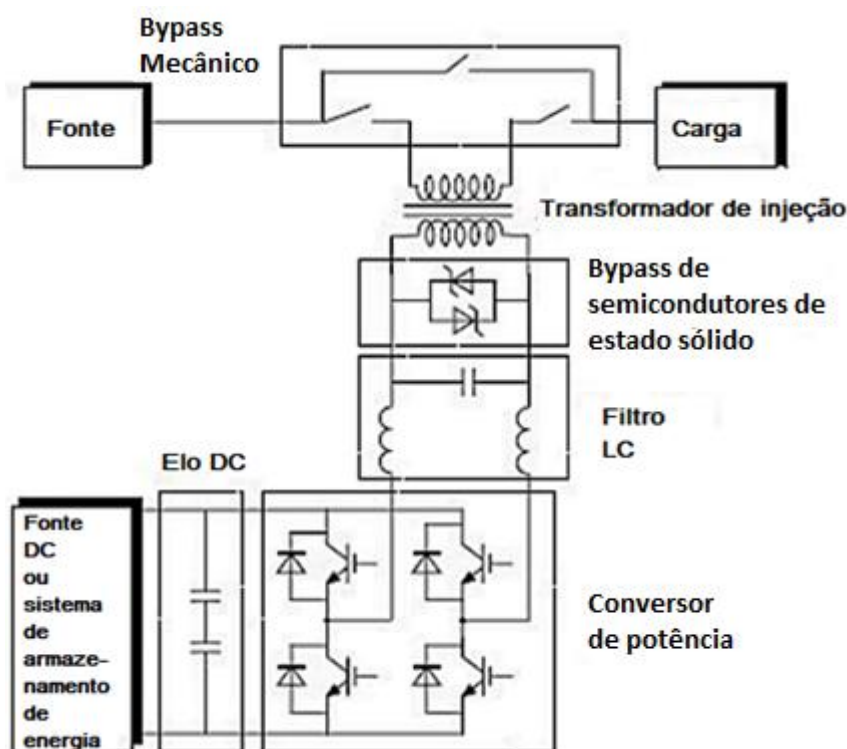
2 RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

Neste Capítulo será abordado as características que compõem o DVR, suas topologias e métodos de compensação.

2.1 TOPOLOGIAS DO DVR

As cargas sensíveis, são aquelas que são suscetíveis aos distúrbios que ocorrem na rede, tem sua utilização aumentando a cada dia, logo os níveis de qualidade da energia que são entregues pelo sistema de distribuição, devem ser cada vez melhores. Uma forma de proteger cargas sensíveis dos eventos de VTCD é o uso do restaurador dinâmico de tensão. O DVR é um dispositivo capaz de injetar uma tensão no sistema de forma a compensar os distúrbios de tensão (Soomro; Larik; Mahar; et al., 2021). A Figura 1 ilustra um DVR em sua estrutura convencional, representado em um diagrama unifilar monofásico (1 ϕ) sendo ele composto por um inversor como fonte de tensão (VSI), filtro, transformador de injeção de tensão e um sistema de energia, que pode ser uma unidade de armazenamento, ou uma fonte DC, ou até mesmo a rede do sistema de distribuição.

Figura 1 – Estrutura convencional de um DVR diagrama 1 ϕ .



Fonte: Adaptado de (G.I. Nicolaescu, H. Andrei, S. Radulescu)

2.1.1 DVR COM UNIDADE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O uso de uma unidade de armazenamento de energia está ligado as condições de tensão da rede. Ela também é capaz de fornecer a tensão necessária para o DVR operar. Por meio do *link* DC, é possível controlar as características do DVR, ou seja, pode-se controlar os valores de amplitude e o ângulo de fase para valores adequados. A desvantagem dessa topologia é sua incapacidade de compensar a tensão por períodos longos (Soomro; Larik; et al., 2021).

2.1.2 DVR SEM UNIDADE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Se o sistema de distribuição for capaz de fornecer a energia para o alimentador com a carga sensível e, também, para o DVR, a unidade de armazenamento é substituída pela conexão com o sistema de distribuição. Se for utilizado um conversor em matriz, dispensa-se o uso de conversores AC – DC e DC – AC, pois ele já faz a conversão dos níveis AC – AC para os valores desejados. Uma característica dessa topologia é que quando ocorre uma falha no sistema, correntes muito altas passam para o DVR, podendo causar um afundamento maior na tensão, mas que é devidamente compensada pelo DVR. Uma fonte DC, também pode ser alocada, para suprir o DVR, utilizando conversores DC – AC (Soomro; Larik; Mahar; et al., 2021).

2.2 COMPONENTES DO DVR

Nesta seção será abordado os componentes que forma o DVR.

2.2.1 INVERSOR DE FONTE DE TENSÃO (VSI)

O conversor como fonte de tensão, é o elemento mais importante do DVR. Ele modula o sinal DC oriundo do *link* DC, convertendo-o para um sinal AC que é injetado no sistema (G.I. NICOLAESCU, H. ANDREI, S. RADULESCU, 2014). O conversor é construído com chaves IGBT's bidirecionais que converte a tensão DC para o valor desejado a ser injetado, a um custo e complexidade menor de operação (SOOMRO; LARIK; et al., 2021).

2.2.2 FILTRO DE LINHA

O elemento principal do DVR são os conversores VSI, como já exposto, e no funcionamento desses conversores há comutações entre as chaves IGBT's. Tais comutações são realizadas em alta frequência, o que gera harmônicos na tensão que será injetada de volta ao sistema (Soomro; Larik; et al., 2021).

2.2.3 TRANSFORMADORES DE INJEÇÃO DE TENSÃO

Este transformador é responsável pela injeção da tensão no sistema. A utilização do transformador adequado é fator determinante para garantir o melhor desempenho do restaurador de tensão. Se ele for subdimensionado o DVR ficará com operação inadequada, por causa da saturação do seu núcleo. Por outro lado, utilizar um transformador superdimensionado significa aumentar os custos de operação do dispositivo de maneira desnecessária (Soomro; Larik; et al., 2021).

2.2.4 UNIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Quando se opta pelo uso da unidade de armazenamento de energia, os problemas devido aos valores altos de corrente absorvidas pelo sistema são resolvidos. Na sua implementação é necessário o uso de conversores DC – AC. (Soomro; Larik; et al., 2021).

2.3 TÉCNICAS DE COMPENSAÇÃO

A compensação no DVR pode ser realizada pela injeção de potência ativa ou reativa e há três técnicas possíveis para isso. Essas possibilidades de compensação são conhecidas como: Método de compensação pré-falta; Método de compensação em fase; e Método de compensação de energia otimizada (SHABANPOUR; SEIFI; 2012).

2.3.1 MÉTODO DE COMPENSAÇÃO PRÉ-FALTA

Nesse método, a magnitude e a fase da tensão são compensadas, ou seja, ele permite que os parâmetros de tensão na pré-falta, sejam reestabelecidos na compensação (SHABANPOUR; SEIFI, 2012).

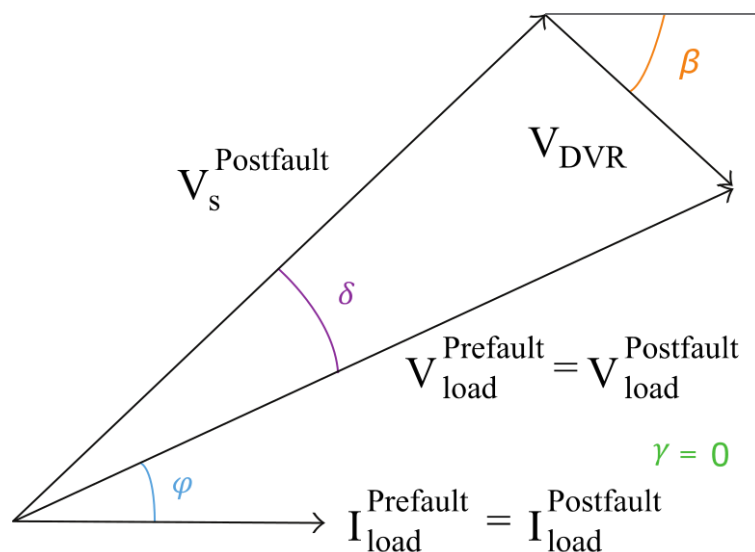
Na Figura 2, ilustra-se o diagrama fasorial para essa compensação. Uma carga genérica é selecionada e a sua corrente antes da falta é considerada como o fasor de referência, $I_{Load}^{prefault} = 1\angle 0$ e a tensão nessa carga, $V_{Load}^{prefault} = 1\angle \varphi$. As faltas podem ocasionar variações na magnitude da tensão de alimentação, k , e saltos de fase, δ , logo a nova tensão de alimentação, após a falta, passa a ser $V_s^{postfault} = k\angle(\varphi + \delta)$ e, portanto, o DVR deve inserir uma tensão capaz de compensar a variação na magnitude e fase da tensão, $V_{DVR} = x\angle\beta$.

Dessa forma, a magnitude x deve compensar o valor a diferença entre a tensão da carga e a tensão do alimentador pós-falta, e o ângulo β deve anular o salto de fase δ gerando um salto de fase de $\gamma = 0$. As tensões e correntes pré e pós-falta na carga devem ser a mesma após a compensação (SHABANPOUR & SEIFI, 2012).

$$V_{Load}^{Pré-fault} = V_{Load}^{post-fault} \quad (1)$$

$$I_{Load}^{Pré-fault} = I_{Load}^{post-fault} \quad (2)$$

Figura 2 – Diagrama fasorial do método de compensação pré-falta.



Fonte: (Shabanpour e Seifi, 2012).

O procedimento para o cálculo da tensão a ser injetada é definida pelas equações (3) à (6).

$$V_{DVR} = x \angle \beta \quad (3)$$

$$V_{DVR} = V_{Load}^{postfault} - V_S^{PostFault} \Rightarrow$$

$$V_{DVR} = 1 \angle \varphi - k \angle (\varphi + \delta) \Rightarrow$$

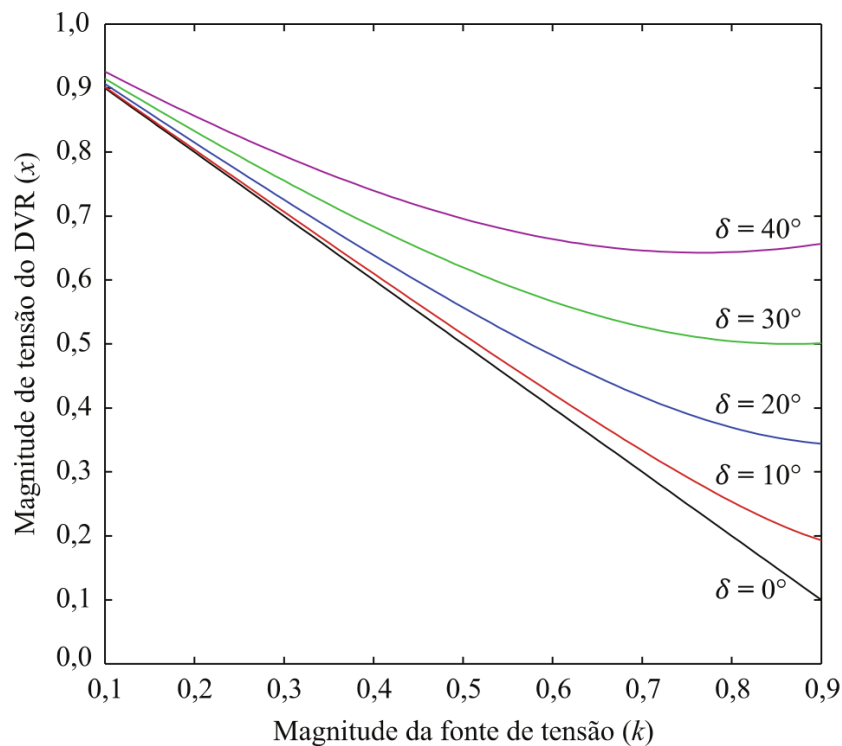
$$V_{DVR} = [\cos(\varphi) - k \cdot \cos(\varphi + \delta)] + j[\sin(\varphi) - k \cdot \sin(\varphi + \delta)] \quad (4)$$

$$x = \sqrt{1 + k^2 - 2 \cdot k \cdot \cos(\delta)} \quad (5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\varphi) - k \cdot \sin(\varphi + \delta)}{\cos(\varphi) - k \cdot \cos(\varphi + \delta)} \right] \quad (6)$$

De acordo com (5), a magnitude da tensão que deve ser injetada depende apenas da magnitude k da falta incidente no sistema. Na Figura 3 ilustra-se as curvas de magnitudes de tensões injetada x e de alimentação k , para saltos de fase δ , de 10° em 10° (SHABANPOUR; SEIFI, 2012).

Figura 3 – Método de compensação pré-falta: curva de compensação para diferentes saltos de fase.



Fonte: (Shabanpour e Seifi, 2012).

2.3.2 MÉTODO DE COMPENSAÇÃO EM FASE

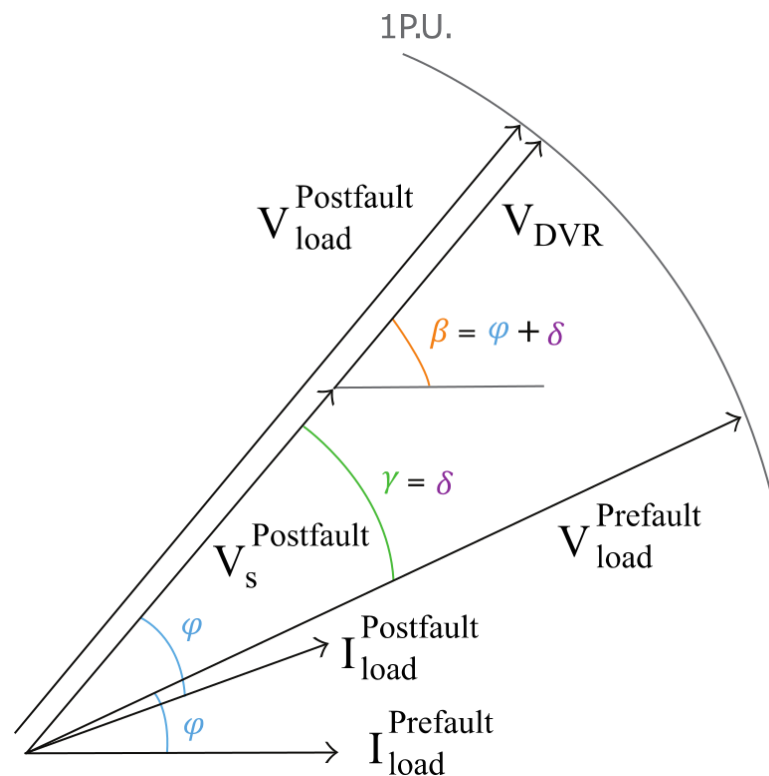
Este método realiza apenas a compensação da magnitude da tensão, ou seja, quando houver o salto de fase, o DVR não faz sua compensação. Dessa forma, o equacionamento para o cálculo da tensão injetada, se restringe a magnitude. A partir das equações (7) e (8), obtém-se os valores da magnitude de tensão x e fase β para a tensão injetada pelo DVR (SHABANPOUR; SEIFI, 2012).

$$x = 1 - k \quad (7)$$

$$\beta = \varphi + \delta \quad (8)$$

Na Figura 4 mostra-se o diagrama fasorial para esse método, onde observa-se o salto de fase que há entre as tensões na carga antes da falta e a tensão de alimentação após a falta, de ângulo δ (SHABANPOUR & SEIFI, 2012).

Figura 4 – Diagrama fasorial do método de compensação em fase.



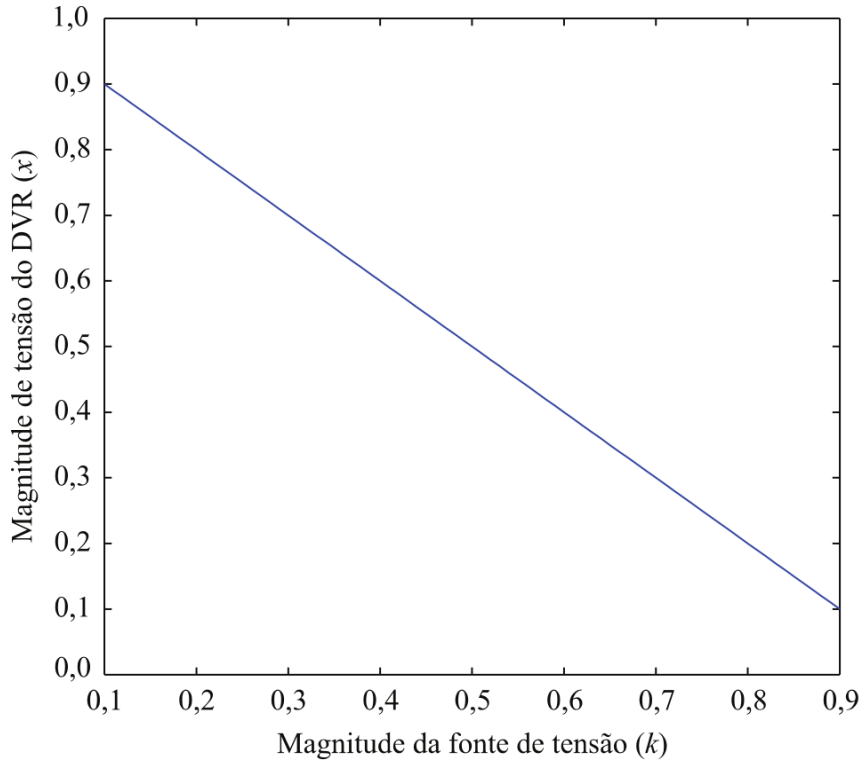
Fonte: Shabanpour e Seifi, (2012).

Após a compensação, as tensões e correntes pré e pós-fault na carga são definidas de acordo com (9) e (10). Na Figura 5 é apresentada a curva de magnitude da tensão injetada x e de alimentação k , para um salto de fase de $\gamma = \delta$ (SHABANPOUR; SEIFI, 2012).

$$V_{Load}^{postfault} = 1 \angle (\varphi + \delta) \quad (9)$$

$$I_{Load}^{postfault} = 1 \angle \delta \quad (10)$$

Figura 5 – Método de compensação em fase: curva de compensação.



Fonte: (Shabanpour e Seifi, 2012).

2.3.3 MÉTODO DE COMPENSAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA

Nesse método, injeta-se uma tensão de forma a manter o fasor de tensão injetado em um ângulo mais próximo a 90° em relação ao fasor de corrente da carga, minimizando a injeção de energia ativa no sistema. No equacionamento desse método, o ângulo de salto de fase é introduzido.

$$V_{DVR} = x \angle \beta \quad (11)$$

$$V_{DVR} = V_{Load}^{postfault} - V_S^{postfault} \Rightarrow$$

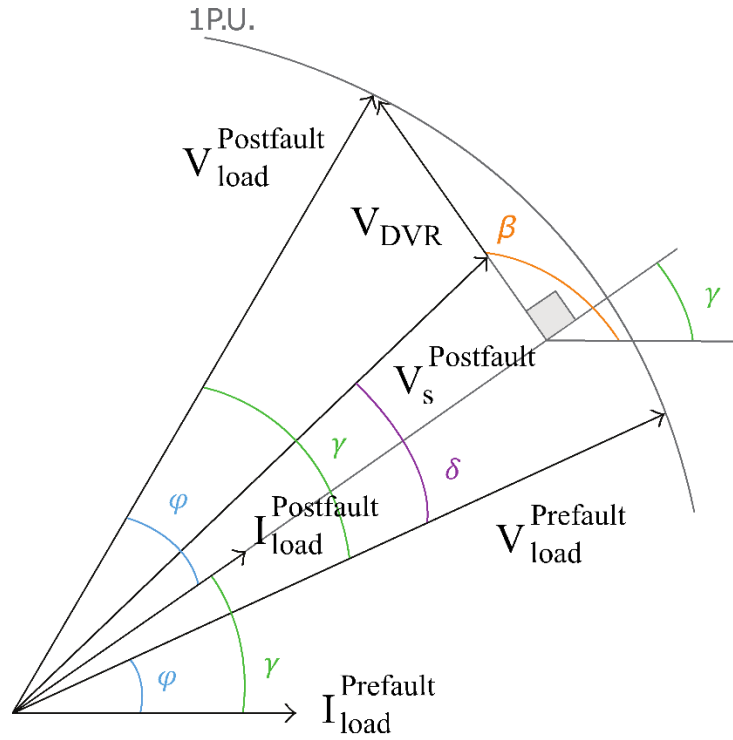
$$V_{DVR} = 1 \angle (\varphi + \gamma) - k \angle (\varphi + \delta) \Rightarrow$$

$$V_{DVR} = [\cos(\varphi + \gamma) - k \cdot \cos(\varphi + \delta)] + j[\sin(\varphi + \gamma) - k \cdot \sin(\varphi + \delta)] \quad (12)$$

$$x = \sqrt{1 + k^2 - 2 \cdot k \cdot \cos(\delta - \gamma)} \quad (13)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\varphi + \gamma) - k \cdot \sin(\varphi + \delta)}{\cos(\varphi + \gamma) - k \cdot \cos(\varphi + \delta)} \right] \quad (14)$$

Figura 6 – Diagrama fasorial do método de compensação pré-falta com otimização de energia.



Fonte: (Shabanpour e Seifi, 2012).

O ângulo de injeção β , denotado pelo arco em vermelho, é a soma do salto de fase, com os 90° desejado de defasagem para a corrente na carga. Equacionado o exposto, resulta-se em (15). Estabelecendo-se a igualdade entre as equações (14) e (15), encontra-se o valor do salto de fase (SHABANPOUR; SEIFI, 2012).

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \gamma \quad (15)$$

$$\tan^{-1} \left[\frac{\sin(\varphi + \gamma) - k \cdot \sin(\varphi + \delta)}{\cos(\varphi + \gamma) - k \cdot \cos(\varphi + \delta)} \right] = \frac{\pi}{2} + \gamma \Rightarrow \quad (16)$$

$$\left[\frac{\sin(\varphi + \gamma) - k \cdot \sin(\varphi + \delta)}{\cos(\varphi + \gamma) - k \cdot \cos(\varphi + \delta)} \right] = \cotg(\gamma) \Rightarrow \quad (17)$$

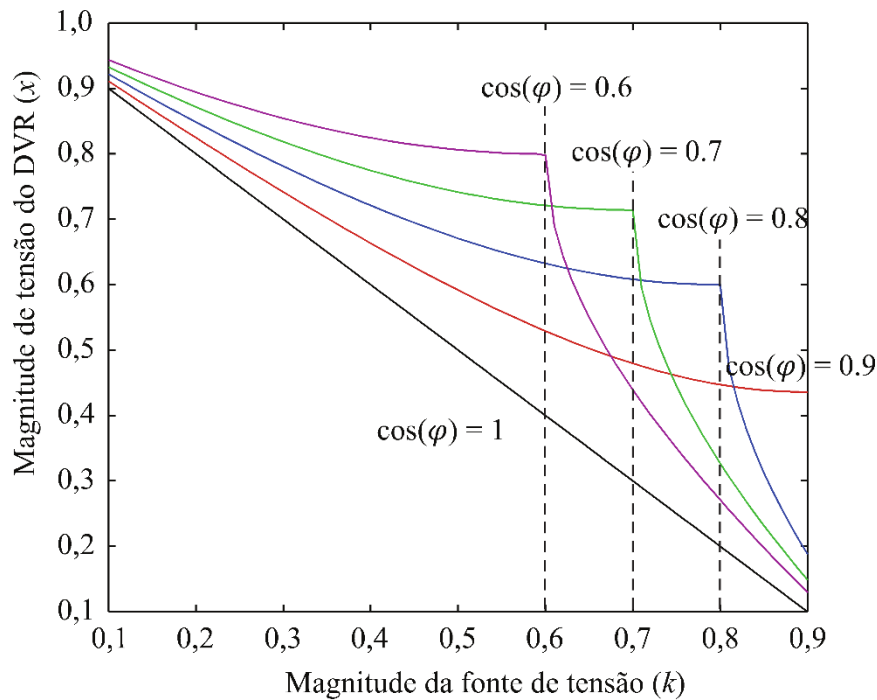
$$\gamma = \varphi + \delta - \cos^{-1} \left[\frac{1}{k} \cos(\varphi) \right] \quad (18)$$

De acordo com as referências para (18) atender ao caso, o termo $\frac{1}{k} \cos(\varphi) \leq 1$. Para isso, o valor da magnitude da tensão de alimentação deve ser maior que o fator de potência da carga $k > \cos(\varphi)$. Caso contrário, o salto de fase deve ser calculado conforme (19) (SHABANPOUR & SEIFI, 2012).

$$\gamma = \varphi + \delta \quad (19)$$

Na Figura 7, mostra-se a curva de compensação para esse método. Como o valor da magnitude da tensão de alimentação, V_s , tem que obedecer a condição de $k > \cos(\varphi)$, tem-se uma curva de compensação distinta para cada valor do fator de potência $\cos(\varphi)$ (SHABANPOUR; SEIFI, 2012).

Figura 7 - Método de compensação em fase: curva de compensação.



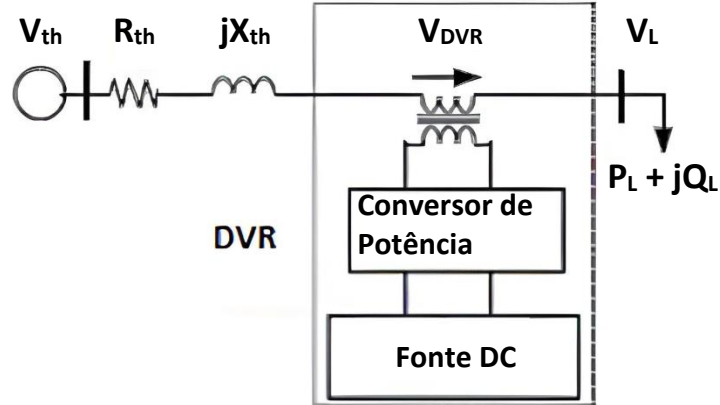
Fonte: (Shabanpour e Seifi, 2012).

2.4 CONEXÃO DO DVR NO SISTEMA

A conexão do DVR no sistema, objeto desse estudo, foi proposto por Nicolaescu, Andrei e Radulescu (2014). Ele consiste em um DVR, em sua estrutura convencional, como mostrado na Figura 1. A compensação realizada pelo DVR proposto é por meio do método de compensação em fase. Na Figura 8 é ilustrada a conexão pretendida para a implementação do DVR, em que R_{th} é a resistência equivalente do sistema, X_{th} é a reatância equivalente do sistema, logo a associação desses dois parâmetro forma a impedância equivalente de Thévenin do sistema, $Z_{th} = R_{th} + jX_{th}$. O dispositivo DVR é conectado em série ao sistema e a tensão V_{DVR} é a tensão injetada no sistema, para fins de compensação. Os parâmetros P_L e Q_L são

as potências ativas e reativas, respectivamente, absorvidas pela carga, V_{th} é a tensão fornecida ao sistema e I_L a corrente que passa pelo sistema (NICOLAESCU, ANDREI; RADULESCU, 2014).

Figura 8 – Diagrama unifilar da conexão do DVR.



Fonte: Adaptado (Nicolaescu, Andrei e Radulescu, 2014).

A tensão série injetada pelo DVR, no circuito da Figura 8, é dado pela equação (19) e a corrente I_L pela equação (20):

$$V_{DVR} = V_L + Z_{th} \cdot I_L - V_{th} \quad (19)$$

$$I_L = \left(\frac{P_L + jQ_L}{V_L} \right)^* \quad (20)$$

Considerando a tensão da carga como a tensão de referência, a equação (20) pode ser reescrita como (21), onde β , φ e θ são os ângulos de fase dos parâmetros V_{DVR} , Z_{th} e V_{th} , respectivamente. O ângulo α do fator de potência da carga é dado por (22) (NICOLAESCU, ANDREI & RADULESCU, 2014).

$$\begin{aligned} V_{DVR} [\cos(\beta) + j \sin(\beta)] = \\ = V_L [\cos(0) + j \sin(0)] + Z_{th} I_L [\cos(\varphi - \alpha) + j \sin(\varphi - \alpha)] - V_{th} [\cos(\theta) + j \sin(\theta)] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Q_L}{P_L} \right) \quad (22)$$

2.5 TRANSFORMADA dq0

Para o controle do DVR, objeto desse estudo, é aplicado um conceito chamado de transformada dq0. Essa ideia origina-se nos trabalhos do francês André Blondel e muito desenvolvida por Nickle. Devido a complexidade das análises de circuitos trifásicos, recorre-se a essa ferramenta para realizar o controle vetorial de máquinas elétricas, simplificando o sistema trifásico e reduzindo suas variáveis.

A transformada dq0 é representada em termo do ângulo elétrico θ_{me} entre o eixo direto do rotor e o eixo de fase do estator. A transformada é aplicada a uma grandeza do estator, como a corrente, a tensão ou o fluxo, para escrevê-la na forma matricial. Adotando-se S como símbolo da grandeza a ser transformada, tem-se a relação dada por (23).

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & \cos(\theta_{me} + 120^\circ) \\ -\sin(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

em que S_d refere-se a transformada da grandeza em relação ao eixo direto e S_q a transformada da grandeza em relação ao eixo de quadratura. S_0 é a transformada da grandeza de sequência zero e ela é necessária para se obter uma única interpretação das grandezas de fase do estator. Essa transformada é aplicada, apenas, às grandezas instantâneas do sistema. A transformada inversa dq0 é obtida por (24), aplicado à grandeza de interesse (UMANS, 2014).

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me}) & 1 \\ \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta_{me} + 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

3 SISTEMA DE CONTROLE DO DVR

Neste capítulo será abordado o sistema de controle adotado para o DVR, bem como a sua simulação.

3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

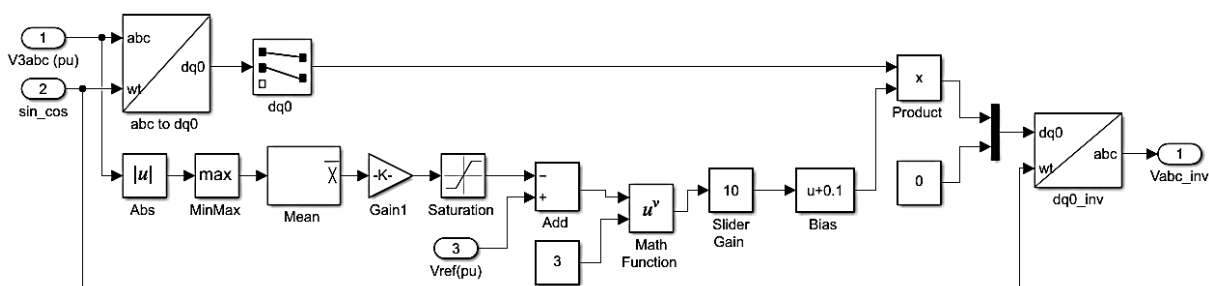
O conceito de transformada dq0, apresentado, é aplicado para transformar a tensão na barra de carga e utilizá-lo como referência para gerar um vetor de tensão simétrico na barra de saída do DVR. Assumindo a premissa que o sistema elétrico não possua componentes de sequência zero, os parâmetros de tensão e corrente são transformados em componentes exclusivas do quadro de referência dq, de forma que o eixo direto sempre será coincidente com o vetor de tensão (MOLINA & MERCADO, 2006).

Todas as implementações para a simulação do estudo são feitas no Simulink e os parâmetros de todos os blocos utilizados no regulador de tensão estão no anexo A.1.

3.2 REGULADOR DE TENSÃO

O regulador de tensão é o principal componente do sistema de controle do DVR. O regulador está representado na Figura 9 e é responsável por realizar a transformada dq0, a partir do sinal de tensão da barra 4 (V_{4abc}), que é a tensão da carga. Essa ideia permite obter um vetor de tensão de carga com simetria e fator de potência unitário, que é utilizado como referência para os valores de tensão a serem injetados pelo DVR. A descrição dos blocos é feita nas subseções a seguir.

Figura 9 – Bloco Regulador de Tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 BLOCOS “abc to dq0” E “Selector”

O bloco “abc to dq0” faz a transformada dq0 do sinal trifásico (V_{abc}) para um frame de referência giratório dq0. A posição angular da estrutura rotativa é dada pela entrada “wt”, que é gerada a partir do bloco gerador da função senoidal “sin_cos”, de amplitude 1 e frequência 60 Hz. Quando o sistema rotativo em $wt=0$ estiver 90 graus adiantado em relação a fase A, tem-se um sinal de sequência positiva com magnitude 1 e fase 0° e que produz os valores direto e de quadratura iguais a $d=1$, $q=0$. Em seguida, o sinal passa pelo bloco “Selector”, onde é feita a seleção dos sinais de tensão para os eixos direto e quadratura. Após essa seleção, o sinal segue para o bloco “Product” cuja função é discutida na subseção 3.2.5.

3.2.2 BLOCOS “Abs” E “MinMax”

Paralelo ao fluxo da subseção 3.2.1, um outro fluxo acontece, a fim de obter um sinal final do regulador de tensão. Tomando-se o sinal V_{abc} (pu), leva-se ao bloco “Abs”, fazendo com que a parcela negativa do sinal de tensão seja convertida em uma parcela positiva. Na sequência, o sinal passa pelo bloco “MinMax”, onde se aplica um operador, para esse caso “MAX”, no sinal de entrada para obter um sinal retificado.

3.2.3 BLOCOS “Mean” E “Gain1”

No bloco seguinte, “Mean”, ocorre o cálculo do valor médio do sinal de entrada para uma janela de um ciclo da frequência fundamental especificada, sendo que para o primeiro ciclo de simulação, a saída é mantida constante para o valor de entrada inicial especificado. Em seguida, o sinal passa pelo bloco “Gain1” onde é aplicado um ganho ao sinal no valor 1/0,95 pu. Tal valor faz com que o sinal seja elevado para o nível 1 pu, na condição normal de operação.

3.2.4 BLOCOS “saturation”, “Math Function”, “Slider Gain” e “Bias”

Seguindo o circuito, o sinal passa pelo “saturation”, bloco que vai limitar o valor do sinal de entrada entre 0 e 1 e em seguida é comparado com o valor de referência $V_{ref}(pu)=1$ e nesse processo é obtido um sinal de valor 0,0, pois, na

condição normal de operação, o sinal de entrada é subtraído em 1,0. O controle da amplitude é feito pelos blocos “Math Function” e “Slider Gain”. O bloco “Math Function” corresponde à uma função cúbica que é capaz de controlar a injeção de tensão tanto para quedas leves, quanto para severas, de forma a se obter uma velocidade maior na compensação. O “Slider Gain” faz o ajuste fino dessa compensação, garantindo um ajuste equilibrado para ambos os tipos de queda de tensão.

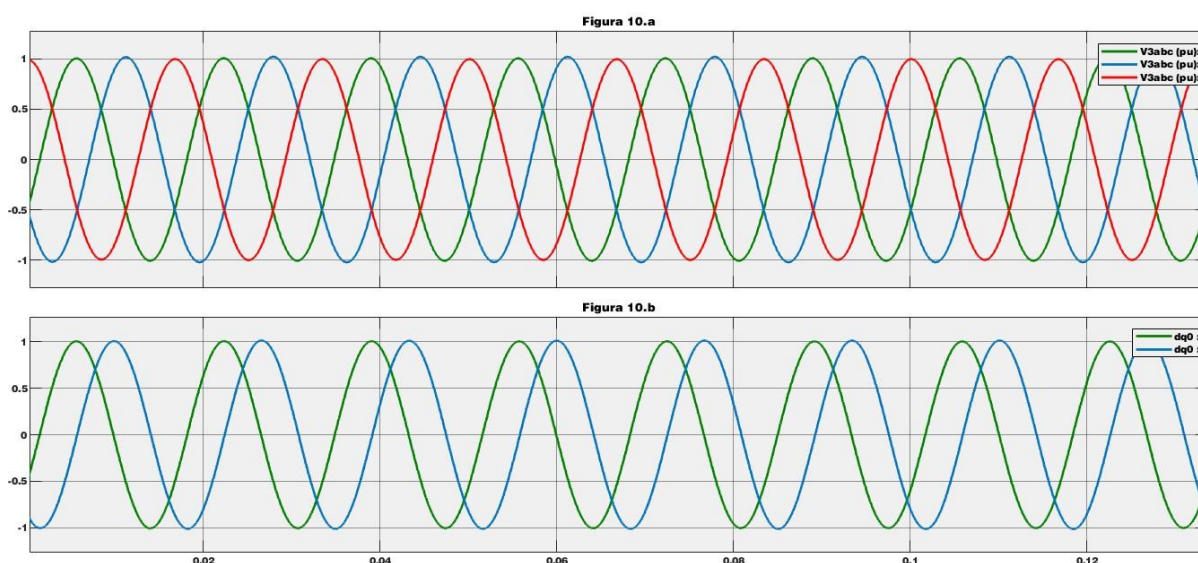
3.2.5 BLOCOS “Product” E “dq0 to abc”

Seguindo, reúne-se o sinal recém obtido junto ao sinal do “Selector” no bloco “Product”, que retorna o valor do sinal com relação aos eixos direto e em quadratura. Por fim, o sinal vetorizado passa pelo bloco “dq0 to abc” que converte o sinal vetorizado em um sinal trifásico de tensão.

3.2.6 FORMAS DE ONDA DO REGULADOR DE TENSÃO

Na Figura 10.a, pode-se observar a forma de onda trifásica de tensão na barra da carga sensível quando não há ocorrências de VTCD, que é a referência de tensão para o DVR. Na Figura 10.b é mostrads a transformada dq0 da tensão de referência (V_{3abc}), em verde a forma de onda da tensão em eixo direto e em azul a tensão em quadratura. Todos os valores estão em p.u.

Figura 10 – Forma de onda da tensão no terminal do conversor.

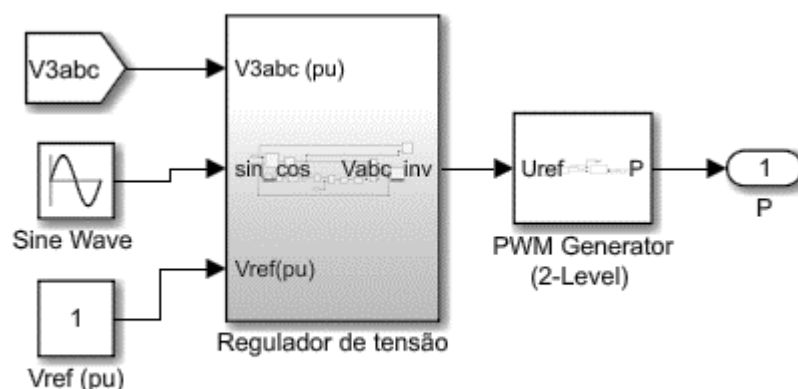


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 BLOCO DE CONTROLE DO DVR

Após passar pelo regulador de tensão, o sinal obtido é modulado. O método escolhido é a modulação por largura de pulso (PWM). A modulação por esse método ajuda a reduzir harmônicos que seriam percebidos no sinal de injeção. Além disso, o sinal P gerado pela modulação, presente na Figura 11, é usado para o controle de disparo dos IGBT's do conversor. Dessa forma tem-se todo o bloco de controle para a operação do DVR.

Figura 11 – Bloco de controle do DVR.

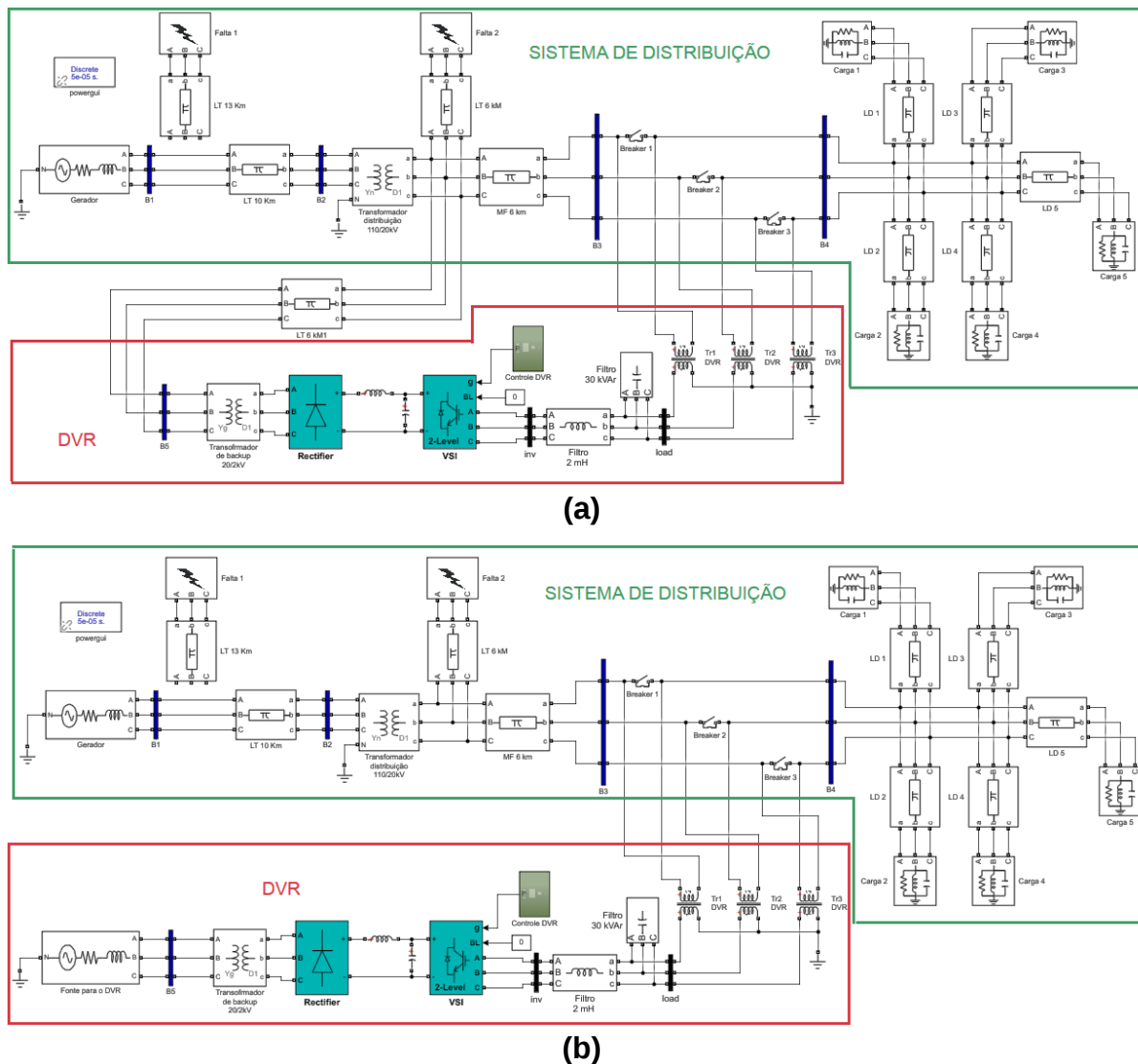


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E DVR SIMULADOS

A tipologia escolhida para implementar o DVR, é sem armazenamento de energia. Nessa tipologia é necessário a utilização de uma fonte para suprir o VSI. Nesse trabalho, aborda-se dois modos de suprir o VSI: utilizando uma linha de *back up* a partir da subestação; e a outra a partir de um gerador independente. Na Figura 12 (a) está representado o sistema de distribuição, genérico, em que o DVR foi instalado, com VSI suprido por uma linha de backup. Na Figura 12 (b) está representado o mesmo sistema de distribuição, porém o DVR é suprido por uma fonte independente. As figuras dos dois métodos de suprimento podem ser vistas com mais detalhes no anexo A.2.

Figura 12 – Sistema de distribuição com instalação do DVR: (a) suprido por linha de *back up* e (b) suprido por fonte independente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SIMULADO

O sistema genérico conta com uma unidade de geração de 110 kV a 60 Hz ligado por uma linha de transmissão de 10 km até a subestação de distribuição. Os parâmetros da linha de transmissão estão na Figura 13.

Figura 13 – Parâmetros da linha de transmissão LT.

Parameters	
Line length (km):	10
Frequency used for rlc specification (Hz):	60
Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [r1 r0]:	[0.01273 0.3864]
Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [l1 l0]:	[0.9337e-3 4.1264e-3]
Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [c1 c0]:	[12.74e-9 7.751e-9]

Fonte: Elaborado pelo autor.

O transformador de distribuição é um transformador trifásico, seus enrolamentos configurados em estrela aterrado/triângulo, com capacidade de 40 MVA, tensões AT/BT iguais a 110/20 kV, em frequência de 60Hz, com resistências e indutância do primário e secundário iguais a $R_1 = R_2 = 0,002$ pu e $L_1 = L_2 = 0,08$ pu e resistência e indutância de magnetização iguais a $R_m = L_m = 500$ pu.

O transformador de distribuição é conectado a uma linha de distribuição de 6 km até o barramento da carga, B3-B4. Desse barramento, saem mais cinco linhas de distribuição de 1 km cada (LD1, LD2, LD3, LD4 e LD5). Os parâmetros dessas linhas, com exceção do comprimento da linha, são os mesmos da Figura 13. Essas LD's ligam o barramento B4 até as cargas (carga 1, carga 2, carga 3, carga 4 e carga 5). Todas as cargas possuem os mesmos parâmetros, que podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros de carga.

Parameters	
Configuration	Y (grounded)
Nominal phase-to-phase voltage Vn (Vrms)	20e3
Nominal frequency fn (Hz)	60
☐ Specify PQ powers for each phase	
Active power P (W):	500e3
Inductive reactive Power QL (positive var):	100
Capacitive reactive power Qc (negative var):	100
Measurements	None

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 CARACTERÍSTICAS DO DVR IMPLEMENTADO

O DVR implementado, tanto para quando ele é suprido por uma linha de backup, quanto para o suprimento independente é o mesmo, como apresentado nas Figuras 12 (a) e 12 (b). O dispositivo é composto por um transformador de *back up*, seus enrolamentos são configurados em estrela aterrado/triângulo, possui potência de 7,5 MVA, com tensões AT/BT iguais a 20/2 kV, em frequência de 60Hz, com resistências e indutância do primário e secundário iguais a $R_1 = R_2 = 0,002$ pu e $L_1 = L_2 = 0,08$ pu e resistência e indutância de magnetização iguais a $R_m = L_m = 500$ pu.

Um retificador é utilizado para converter a tensão para o conversor VSI e entre eles há o link DC, cujos valores são $L_{DC} = 2$ mH $C_{DC} = 50$ mF. O VSI tem sua porta gate conectada ao controle do DVR, e sua saída conectada a um filtro LC, cujos valores da indutância trifásica é de 2 mH e o banco de capacitor possui potência reativa capacitiva de 20 kVAr. Esse filtro é utilizado para filtrar os harmônicos que podem ser gerados pelo chaveamento dos IGBTs do VSI.

O filtro é conectado a três transformadores monofásicos de 2,5 MVA de capacidade, tensão primário/secundário iguais a 1/10 kV. Os demais parâmetros desses transformadores monofásicos encontram-se no anexo A.3. Os transformadores tem os primários conectados em estrela aterrados. O secundário é ligado entre o barramento da rede principal (B3) e o barramento das cargas (B4).

4 RESULTADOS

Para o controle utilizado, baseado na transformada dqo, e para os dois métodos de suprimento do DVR, foram feitas simulações de falta para verificar o comportamento do DVR nos seguintes casos:

- Falta trifásica
 - i. Em uma linha adjacente a linha de distribuição LD₀;
 - ii. Em uma linha adjacente a linha de transmissão LT;
 - iii. Em ambas as linhas adjacentes a LD₀ e LT;
- Falta bifásica
 - i. Em uma linha adjacente a linha de distribuição LD₀;
 - ii. Em uma linha adjacente a linha de transmissão LT;
 - iii. Em ambas as linhas adjacentes a LD₀ e LT;
- Falta fase-terra
 - i. Em uma linha adjacente a linha de distribuição LD₀;
 - ii. Em uma linha adjacente a linha de transmissão LT;
 - iii. Em ambas as linhas adjacentes a LD₀ e LT;

A falta aplicada adjacente a linha LT é mais severa que a falta aplicada adjacente a LD₀. Além disso a faixa da amplitude da tensão de injeção, depende do valor que é inserido no *slider gain* que compõe o regulador de tensão.

4.1 FALTA TRIFÁSICA

Nesta seção será mostrado os resultados da aplicação de uma falta trifásica ao sistema.

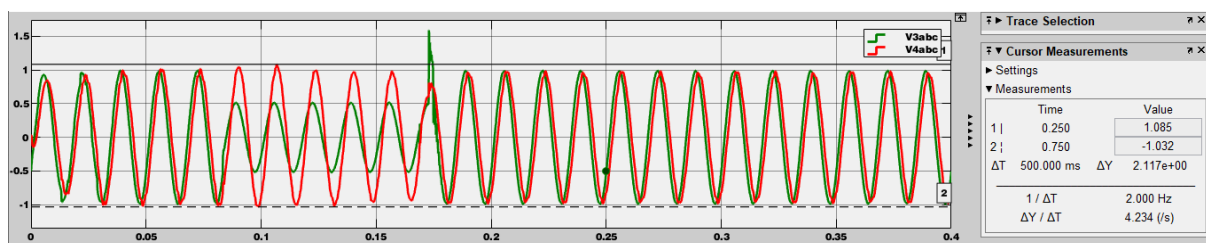
4.1.1 FALTA TRIFÁSICA ADJACENTE A LD₀

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacente a LD₀.

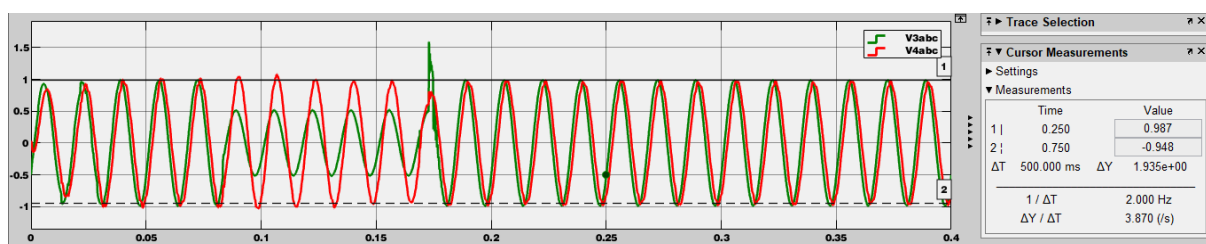
4.1.1.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE BACK UP

Aplica-se uma falta na linha adjacente a LD₀ em $t=0,08s$. O resultado dessa falta é observado na Figura 15. Nela observa-se o comportamento da tensão em B4, comparado com a tensão em B3. Nota-se que a tensão em B3, que está a montante do DVR, sofre uma queda de tensão. Porém, a tensão em B4, a jusante do DVR, tem seu valor compensado por ele. Na Figura 15.a mostra-se os valores da tensão injetadas em B4, sendo que para o semiciclo positivo e negativo tem-se pico máximo, respectivamente, de $V_{4abc_máx}^+ = 1,085pu$ e $V_{4abc_máx}^- = 1,032pu$. Na Figura 15.b tem-se os valores mínimos de tensão compensada para cada semiciclo, $V_{4abc_min}^+ = 0,987pu$ e $V_{4abc_min}^- = 0,948pu$. Outro aspecto possível de se observar é que, ao fim da falta em $t=0,165s$, a tensão em B3 tem um pico pouco acima de 1,5 pu, quando o DVR é alimentado por linha de *back up*, resultado do fim da falta.

Figura 15 – Tensão em B3 e B4 para falta em LD₀ e DVR com linha de *back up*.



(a)



(b)

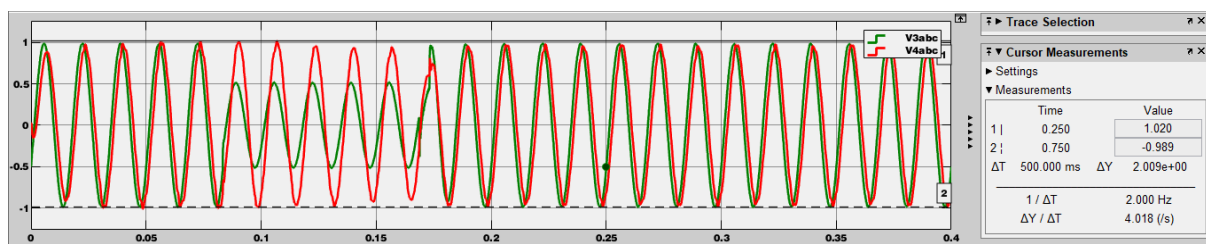
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

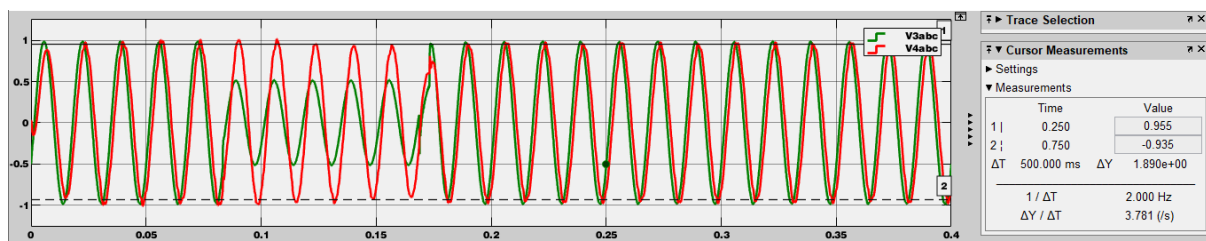
O mesmo processo do item 4.1.1.1, foi aplicado para o DVR suprido por fonte independente. Aplicou-se uma falta em $t=0,08s$ e o resultado está na Figura 16. A compensação é realizada com valores de tensão máxima para cada semiciclo de $V_{4abc_máx}^+ = 1,02pu$ e $V_{4abc_máx}^- = 0,989pu$ (Figura 16 (a)) e valores mínimos por

semiciclo de $V_{4abc_min}^+ = 0,955\text{pu}$ e $V_{4abc_min}^- = 0,935$ (Figura 16 (b)). Também, observa-se que ao fim da falta, em $t=0,165\text{s}$, a tensão em B3 não tem o salto de tensão, mas uma deformação devido ao fim dessa falta.

Figura 16 – Tensão em B3 e B4 para falta em LD₀ e DVR com fonte independente.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2. FALTA TRIFÁSICA ADJACENTE A LT

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacente a LT.

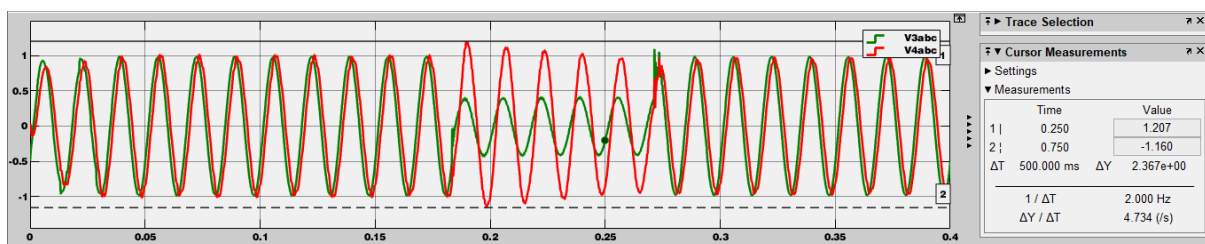
4.1.2.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE BACK UP

O mesmo procedimento dos itens anteriores são aplicados novamente, mas para uma falta na linha adjacente a LT em $t=0,18\text{s}$. Na Figura 17, observa-se a queda de tensão em B3, e sua compensação em B4. Os valores máximos de tensão em B4 para o semiciclo são de $V_{4abc_máx}^+ = 1,207\text{pu}$ e $V_{4abc_máx}^- = 1,160\text{pu}$ (Figura 17 (a)). Para os valores mínimos de tensão em B4, em cada semiciclo, tem-se $V_{4abc_min}^+ = 0,974\text{pu}$ e $V_{4abc_min}^- = 0,961\text{pu}$ (Figura 17 (b)). O salto de tensão retorna, para esse esquema de ligação, mas seu valor é de $1,1\text{pu}$.

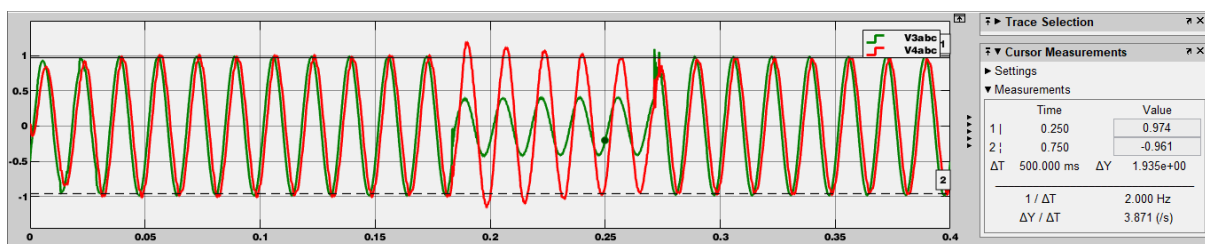
4.1.2.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

Seguindo, na Figura 18, observa-se a compensação em B4, com valores máximos para cada semiciclo de $V_{4abc_m\acute{a}x}^+ = 1,129\text{pu}$ e $V_{4abc_m\acute{a}x}^- = 1,113\text{pu}$ (Figura 18 (a)). Os valores de tensão em B4 mínimos, nos ciclos de compensação são de $V_{4abc_min}^+ = 0,973\text{pu}$ e $V_{4abc_min}^- = 0,957\text{pu}$ (Figura 18 (b)). O salto de tensão em B3, ao fim da falta é de 1,12 pu.

Figura 17 – Tensão em B3 e B4 para falta em LT e DVR com linha de *back up*.



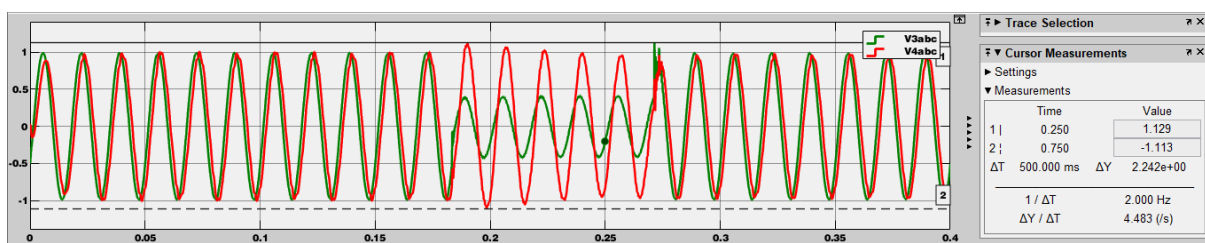
(a)



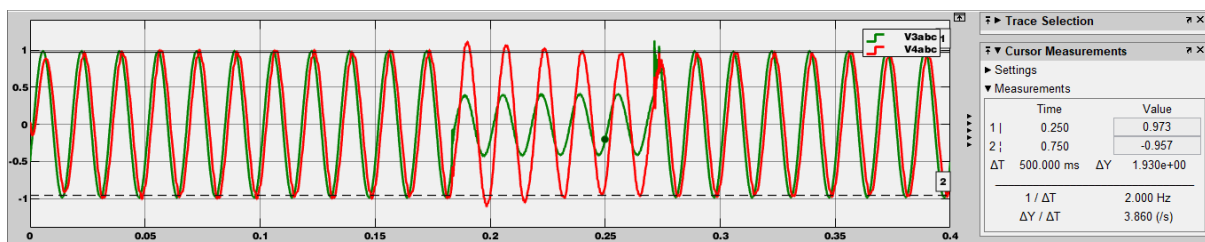
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Tensão em B3 e B4 para falta em LT e DVR com fonte independente.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

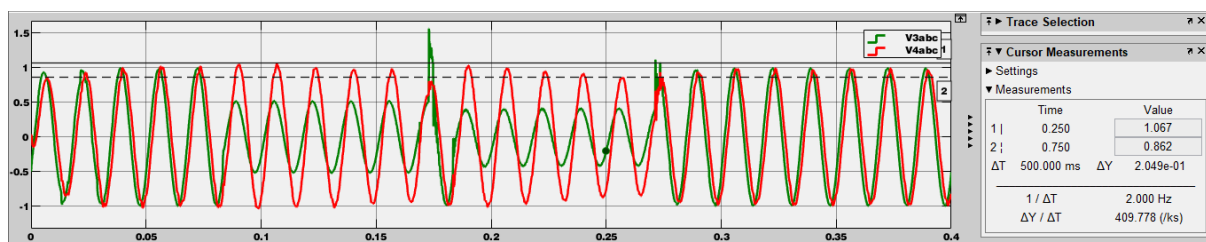
4.1.3 FALTAS TRIFÁSICAS SEGUIDAS, ADJACENTES A LD₀ E A LT

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacentes a LD₀ e LT.

4.1.3.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE *BACK UP*

Nesse item tem-se as duas faltas aplicadas para verificar o comportamento do DVR. Primeiro a falta em LD₀, seguida pela falta em LT. Observa-se na Figura 19 que as pontuações feitas nos itens 4.1.1.1 e 4.1.2.1, permanecem. A compensação para uma falta mais distante e severa (LT), nesse sistema de suprimento, tem uma diferença perceptível. Os valores máximos e mínimos em B4 na compensação são de $V_{4abc_{m\acute{a}x}}=1,067\text{pu}$ e $V_{4abc_{m\grave{a}n}}=0,862\text{pu}$.

Figura 19 – Tensão em B3 e B4 para falta em LD₀/LT e DVR com linha de *back up*.

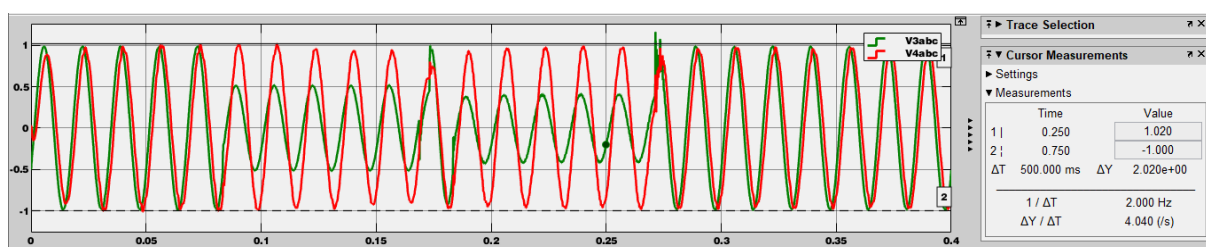


Fonte: Elaborado pelo autor.

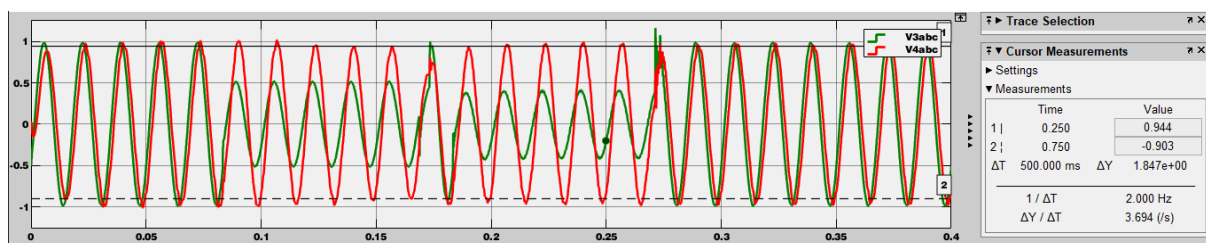
4.1.3.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

Para a configuração de suprimento independente do DVR, ocorre uma compensação mais uniforme para ambas as faltas. Os valores máximos para cada semiciclo são de $V_{4abc_{m\acute{a}x}}^+=1,02\text{pu}$ e $V_{4abc_{m\acute{a}x}}^-=1,0\text{pu}$ (Figura 20 (a)) e os valores mínimos de $V_{4abc_{m\grave{a}n}}^+=0,944\text{pu}$ e $V_{4abc_{m\grave{a}n}}^-=0,903\text{pu}$ (Figura 20 (b)).

Figura 20 – Tensão em B3 e B4 para falta em LD₀/LT e DVR com fonte independente.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 FALTA BIFÁSICA

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta bifásica

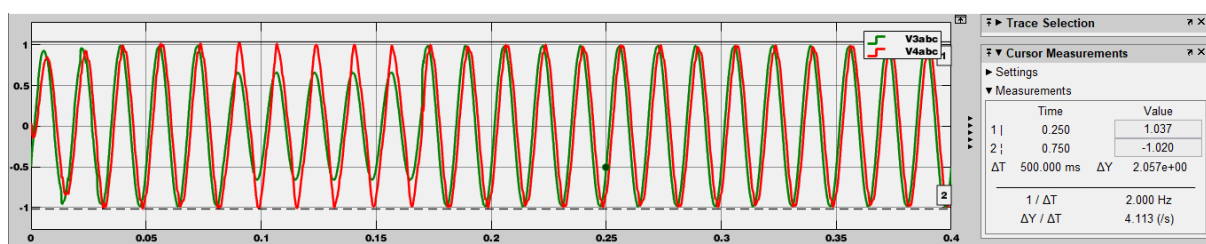
4.2.1 FALTA BIFÁSICA ADJACENTE A LD₀

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacente a LD₀.

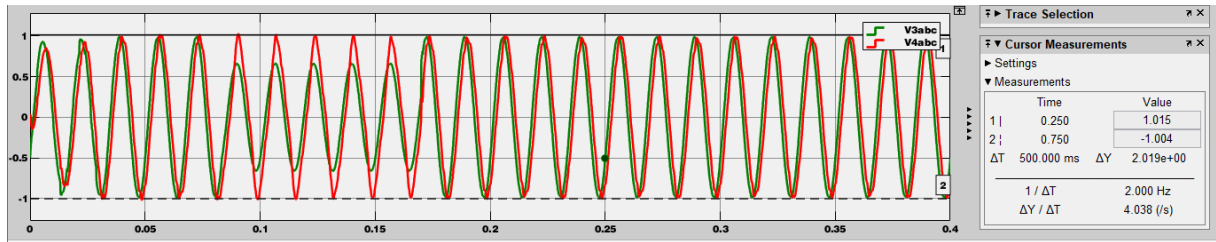
4.2.1.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE *BACK UP*

Segue-se com os mesmos procedimento realizados para a falta trifásica, mas para uma falta bifásica (2ϕ). Para a configuração de suprimento por linha de *back up*, a compensação, Figura 21, ocorre sem problemas, com valores de tensão máxima para cada semiciclo de $V_{4abc_m\acute{a}x}^+ = 1,037\text{pu}$ e $V_{4abc_m\acute{a}x}^- = 1,02\text{pu}$ (Figura 21 (a)), e valores de tensão mínima de $V_{4abc_min}^+ = 1,015\text{pu}$ e $V_{4abc_min}^- = 1,004\text{pu}$ (Figura 21 (b)).

Figura 21 – Tensão em B3 e B4 para falta 2ϕ em LD₀ e DVR com linha de *back up*.



(a)



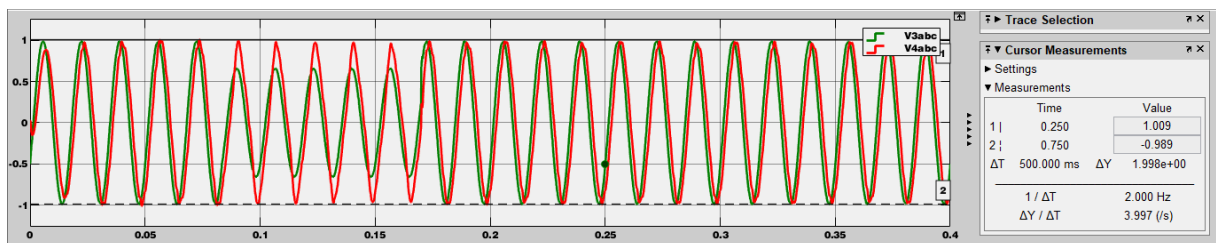
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

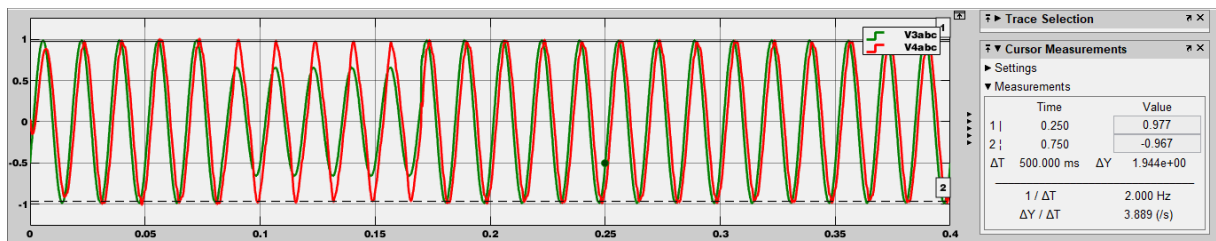
4.2.1.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

Para o DVR suprido por fonte independente, a compensação, Figura 22, ocorre conforme o esperado, com valores de tensão máxima e mínima para cada semiciclo, respectivamente, de $V_{4abc_m\acute{a}x}^+ = 1,009\text{pu}$ e $V_{4abc_m\acute{a}x}^- = 0,989\text{pu}$ (Figura 22 (a)), $V_{4abc_min}^+ = 0,977\text{pu}$ e $V_{4abc_min}^- = 0,967\text{pu}$ (Figura 22 (b)).

Figura 22 – Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LD₀ e DVR com fonte independente.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

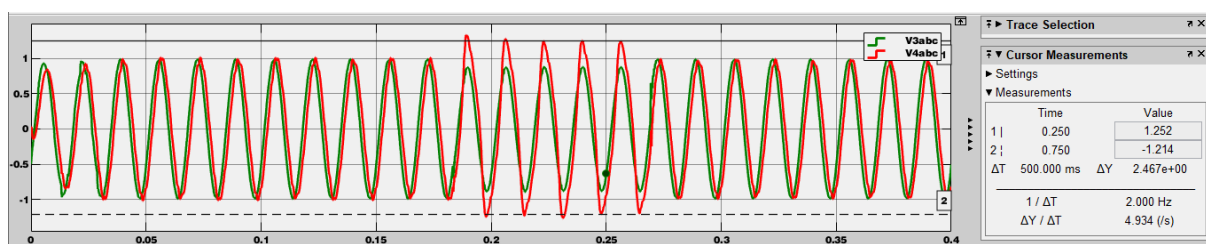
4.2.2 FALTA BIFÁSICA ADJACENTE A LT

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacente LT.

4.2.2.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE *BACK UP*

Para a configuração de suprimento por linha de *back up*, com uma falta mais distante do DVR, a compensação já não ocorre de maneira adequada. A amplitude de tensão em B4, Figura 23, tem valores altos por todo o período de compensação, com valores de tensões máximas para cada semiciclo de $V_{4abc_{máx}}=1,252\text{pu}$ e $V_{4abc_{min}}=1,214\text{pu}$.

Figura 23 – Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LT e DVR com linha de *back up*.

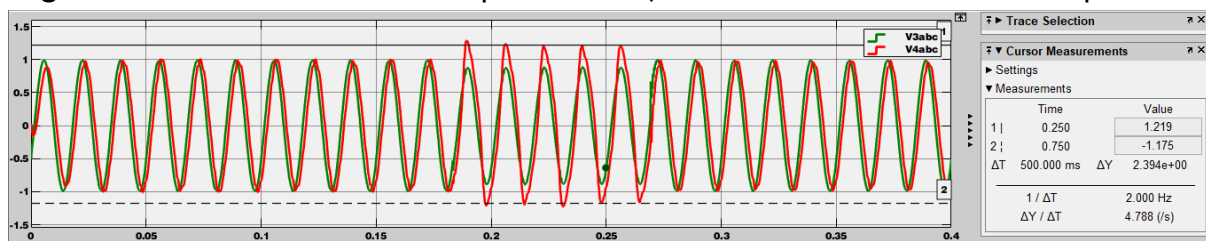


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

Para o DVR suprido por fonte independente, tem-se o mesmo resultado do item anterior. A compensação ocorre, com valores mínimos em B4 de $V_{4abc_{min}}^+=1,219\text{pu}$ e $V_{4abc_{min}}^-=1,175\text{pu}$ (Figura 24).

Figura 24 – Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LT e DVR com fonte independente



Fonte: Elaborado pelo autor.

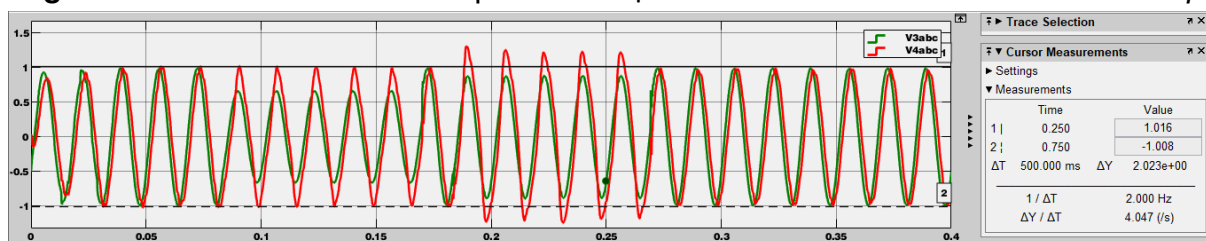
4.2.3 FALTA BIFÁSICA ADJACENTE A LD0 E A LT

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacente a LT.

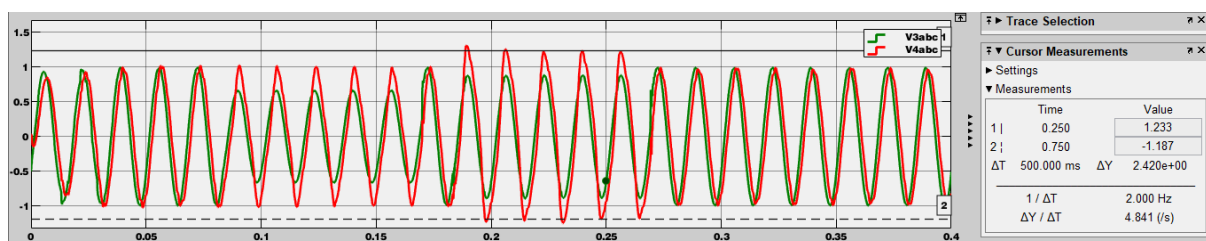
4.2.3.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE BACK UP

Para a situação de faltas seguidas, no suprimento por linha de *back up*, a compensação para a mais próxima, em LD₀, a compensação ocorre da maneira semelhante aos casos anteriores, com valores de tensão para cada semiciclo em B4. Mesmos valores máximos e mínimos em B4 de $V_{4abc}^+ = 1,016\text{pu}$ e $V_{4abc}^- = 1,008\text{pu}$ (Figura 25 (a)). Porém para a falta em LT, a compensação ocorre com valores mais altos sendo o mínimo para cada semiciclo de $V_{4abc_min}^+ = 1,233\text{pu}$ e $V_{4abc_min}^- = 1,187\text{pu}$ (Figura 25 (b)).

Figura 25 – Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LD₀/LT e DVR com linha de *back up*.



(a)



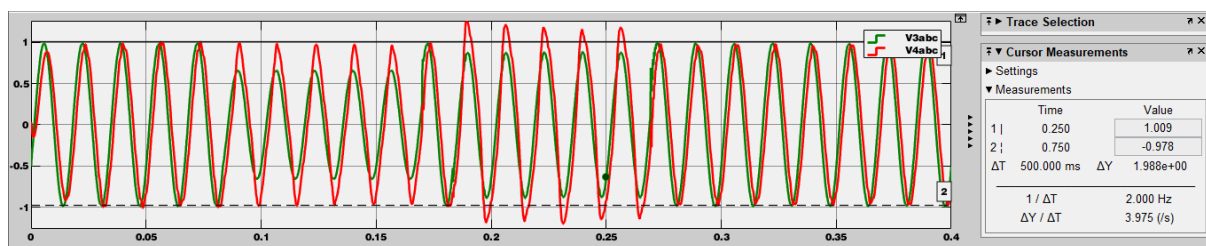
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

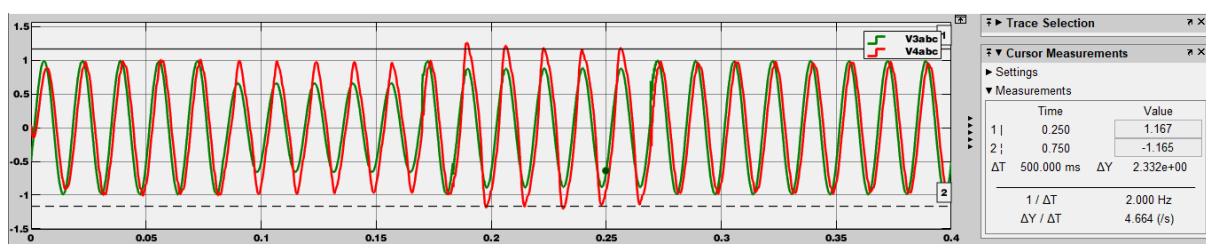
4.2.3.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

As mesmas faltas são aplicadas no sistema, mas com o DVR suprido por fonte independente e o mesmo comportamento é observado. Na Figura 26 (a) os valores de tensão, em B4, para a compensação da falta em LD₀ em cada semiciclo são de $V_{4abc_m\acute{a}x} = 1,009\text{pu}$ e $V_{4abc_min} = 0,978\text{pu}$. Para a compensação da falta em LT os valores para cada semiciclo são de $V_{4abc_m\acute{a}x} = 1,167\text{pu}$ e $V_{4abc_min} = 1,165\text{pu}$ (figura 26 (b)).

Figura 26 – Tensão em B3 e B4 para falta 2 ϕ em LD₀/LT e DVR com fonte independente.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 FALTA FASE-TERRA

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta fase-terra.

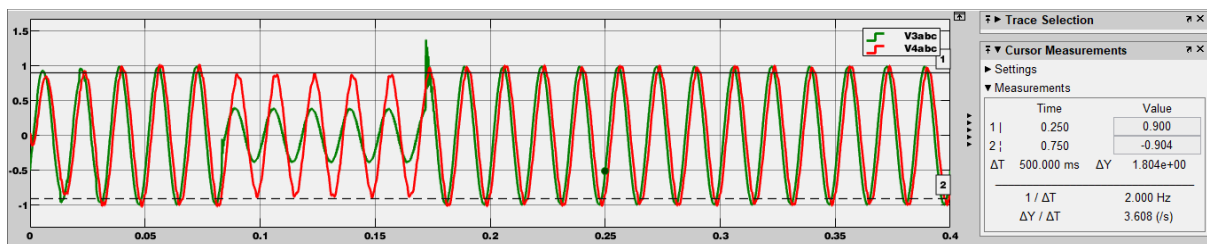
4.3.1 FALTA FASE-TERRA ADJACENTE A LD₀

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacente a LD₀.

4.3.1.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE *BACK UP*

Para a configuração de suprimento por linha de *back up*, a compensação, em faltas fase-terra (1 ϕ), é feita abaixo da faixa de 1 pu. Na Figura 27 é possível observar os valores compensado para cada semiciclo em B4, que são de $V_{4abc}^+ = 0,9\text{pu}$ e $V_{4abc}^- = 0,904\text{pu}$.

Figura 27 – Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LD₀ e DVR com linha de *back up*.

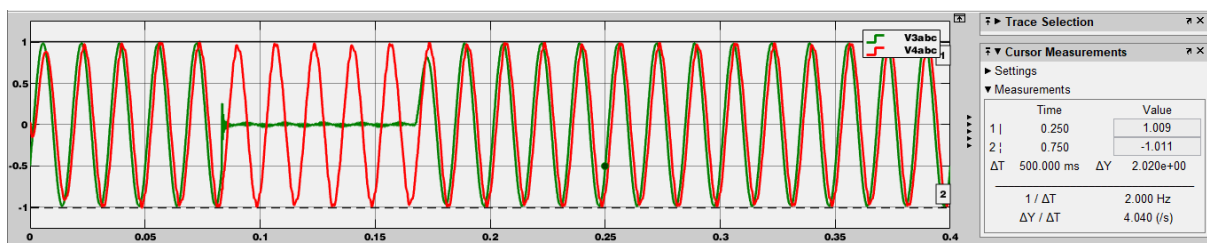


Fonte: Elaborado pelo autor.

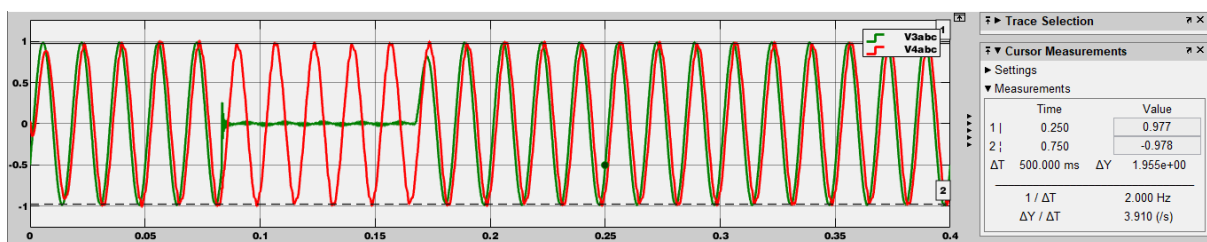
4.3.1.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

Para o DVR suprido por fonte independente, a compensação, Figura 28, ocorre com valores em B4, para cada semiciclo de $V_{4abc_m\acute{a}x}^+ = 1,009\text{pu}$ e $V_{4abc_m\acute{a}x}^- = 1,011\text{pu}$ e $V_{4abc_min}^+ = 0,977\text{pu}$ e $V_{4abc_min}^- = 0,978\text{pu}$.

Figura 28 – Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LD₀ e DVR com fonte independente



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

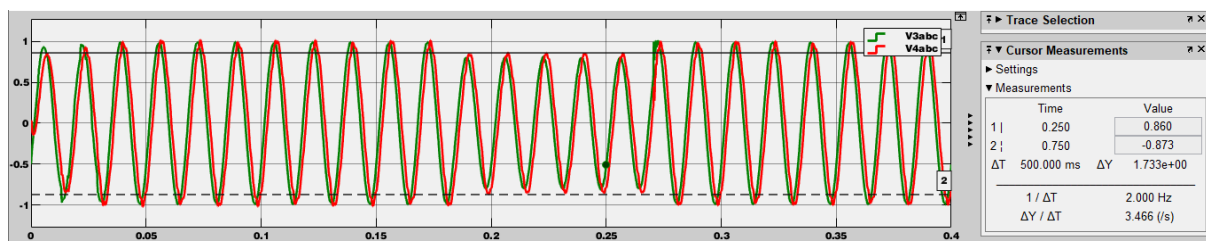
4.3.2 FALTA FASE-TERRA ADJACENTE A LT

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacente a LT.

4.3.2.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE *BACK UP*

Para a configuração de suprimento por linha de *back up*, a compensação, Figura 29, ocorre com valores de tensão para cada semiciclo, em B4, de $V_{4abc}^+ = 0,860\text{pu}$ e $V_{4abc}^- = 0,873\text{pu}$.

Figura 29 – Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LT e DVR com linha de *back up*.

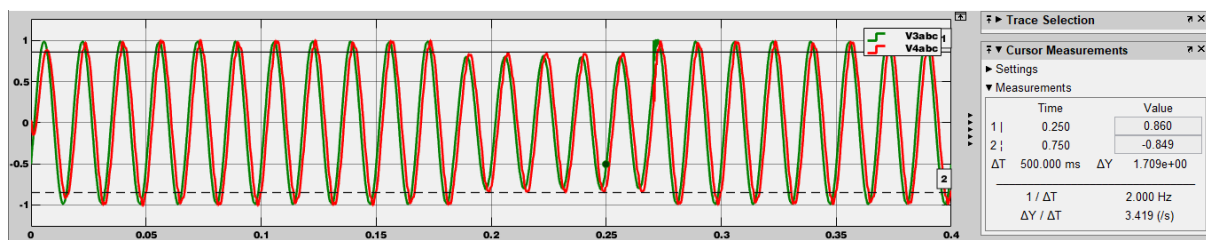


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

Para o DVR suprido por fonte independente, a compensação, Figura 30, ocorre da mesma maneira que o suprimento por linha de *back up*, com valores de tensão para cada semiciclo, em B4, de $V_{4abc}^+ = 0,859\text{pu}$ e $V_{4abc}^- = 0,875\text{pu}$.

Figura 30 – Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LT e DVR com fonte independente.



Fonte: Elaborado pelo autor

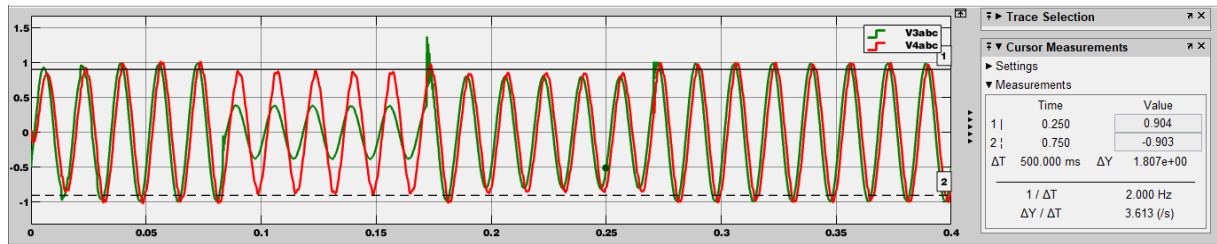
4.3.3 FALTA BIFÁSICA ADJACENTE A LD0 E A LT

Nesta subseção os resultados obtidos são para uma falta trifásica adjacentes a LD0 e a LT.

4.3.3.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE *BACK UP*

Para as duas faltas seguidas no sistema, com o DVR suprido por linha de *back up*, a compensação ocorre próximo dos itens 8.3.1 e 8.3.2, com valores de tensão para cada semiciclo, em B4, de $V_{4abc}^+ = 0,898\text{pu}$ e $V_{4abc}^- = 0,901\text{pu}$ (Figura 31).

Figura 31 – Tensão em B3 e B4 para falta 1 ϕ em LD₀/LT e DVR com linha de *back up*

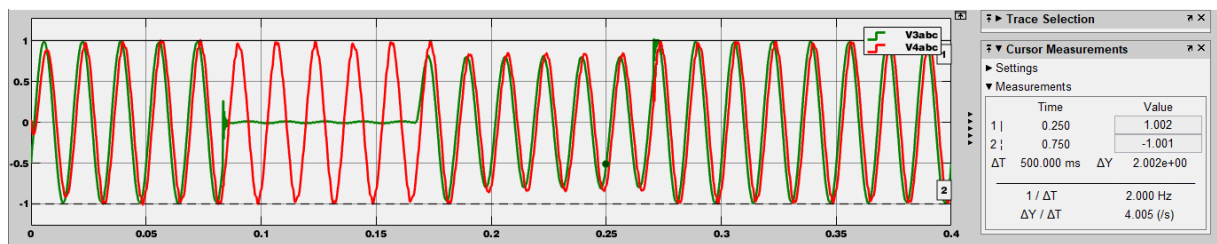


Fonte: Elaborado pelo autor.

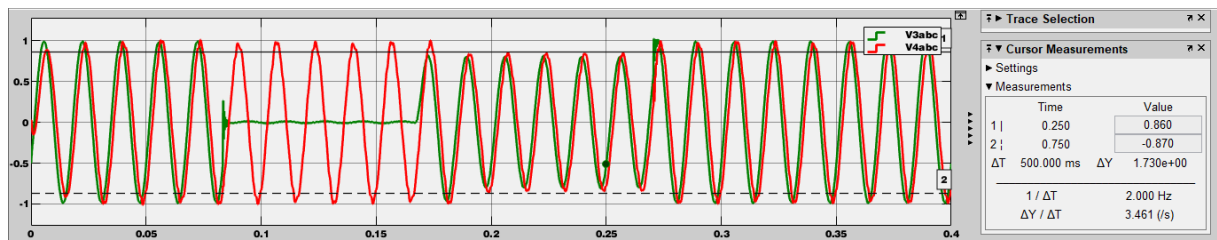
4.3.3.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

Para o DVR suprido por fonte independente, tem-se uma mudança, a compensação para a falta em LD₀, com valores de tensão, em B4, de $V_{4abc}^+ = 1,002\text{pu}$ e $V_{4abc}^- = 1,001\text{pu}$ (Figura 32 (a)). Para a falta em LT, a compensação permanece dentro do que foi apresentado nos itens anteriores, com valores de tensão em B4, para cada semiciclo de $V_{4abc}^+ = 0,860\text{pu}$ e $V_{4abc}^- = 0,870\text{pu}$ (Figura 32 (b)).

Figura 32 – Tensão em B3 e B4, falta 1 ϕ em LD₀/LT e DVR com fonte independente.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 CONFORMIDADE PARA A FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO

Os valores de tensão no barramento B4, obtidos nas simulações do capítulo 8, são organizados e apresentados sistematicamente na Tabela 2. Como foram obtidos valores máximos e mínimos para os semiciclos positivo e negativo, tomou-se o valor absoluto de cada medida obtida e para o valor máximo o de maior valor,

independente se o valor é referente ao semiciclo positivo ou negativo. O mesmo critério foi aplicado para o valor mínimo.

Tabela 2: Valores de tensão máxima e mínima durante a compensação em B4.

	Linha de <i>backup</i>					
	Trifásica		Bifásica		Fase-Terra	
	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)
LD0	1,085	0,948	1,037	1,004	0,904	0,900
LT	1,207	0,961	1,252	1,214	0,873	0,860
LD0 e LT	1,067	0,862	1,223	1,008	0,901	0,898

	Fonte independente					
	Trifásica		Bifásica		Fase-Terra	
	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)
LD0	1,020	0,935	1,009	0,967	1,011	0,977
LT	1,129	0,957	1,219	1,175	0,860	0,849
LD0 e LT	1,020	0,944	1,167	0,978	1,002	0,860

Tensão de referência = 1 pu

Fonte: Elaborado pelo autor.

O anexo 8 da Resolução Normativa nº 956/2021 – Módulo 8 do PRODIST, classifica os níveis de tensão de atendimento em regime permanente como adequada, precária e crítica. Para o sistema simulado, as cargas possuem ponto de conexão em tensão nominal superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV. Sendo assim, usa-se os intervalos apresentados na Tabela 3 obtidos do referido anexo para subsidiar as conclusões dos resultados obtidos para o intervalo entre 0,9 e 1,1 pu da amplitude do evento VTCD.

Tabela 3 – Classificação da ANEEL para a tensão de atendimento.

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: Anexo 8.A da Resolução Normativa nº 956/2021.

A atribuição de um valor numérico para cada faixa de variação da tensão como forma de medir a conformidade do desvio de tensão permite quantificar a

atuação do DVR. A conformidade por faixa é dada por: $C_{ADEQUADA} = 1,0$; $C_{PRECARIA} = 0,5$; e $C_{CRITICA} = 0,0$. Assim, sem DVR, a conformidade é nula, $C_{SEM_DVR} = 0,0$, pois o nível de tensão em B3 é crítico para as faltas simuladas.

4.4.1 CONFORMIDADE PARA O DVR SUPRIDO POR LINHA DE BACK UP

Para o DVR suprido por linha de *back up* e com o controle proposto, tem-se a classificação das tensões em B4 conforme a Tabela 4. A conformidade total é então dada por:

$$C_{BACK-UP} = 5 * 1,0 + 3 * 0,5 + 10 * 0,0 = 6,5 \quad (25)$$

Tabela 4 – Classificação das tensões em B4 após a compensação – *back up*.

	Linha de backup					
	Trifásica		Bifásica		Fase-Terra	
	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)
LD0	1,085	0,948	1,037	1,004	0,904	0,900
LT	1,207	0,961	1,252	1,214	0,873	0,860
LD0 e LT	1,067	0,862	1,223	1,008	0,901	0,898

Legenda: Nível de tensão - Adequada Precária Crítica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a falta trifásica em LD₀ e em LT, a tensão mínima em B4 tem seus valores dentro dos níveis adequados, segundo a ANEEL. Já o valor máximo de tensão na barra, para falta em LD₀, é classificado como crítica, excedendo em 0,035pu o limite do valor adequado. Em LT a tensão é classificada como crítica, superando o limite em 0,157pu.

Para a falta bifásica, em LD₀, tem os valores de tensão em B4, dentro dos níveis adequados. Porém para a falta em LT, os níveis de tensão estão em níveis críticos. Para a falta fase-terra em LD₀, os valores de tensão são precários e, para falta em LT, os valores de tensão são críticos. O mesmo ocorre quando as duas faltas ocorrem no sistemas, seguidamente uma da outra.

Dessa forma é possível concluir que, para o modelo proposto de DVR, o dispositivo funciona adequadamente para a falta bifásica em LD₀, que é mais próxima do dispositivo e da carga. Para a falta trifásica e fase-terra, tem-se a mesma diferença de 0,03pu para o sistema ficar enquadrado com tensão de atendimento

adequada. Para a falta mais distante, em LT, o cenário é mais distante do ideal, pois os valores estão muito distantes do limite considerado adequado. Outra conclusão é que no suprimento por linha de *back up*, é comum surgir um pulso espúrio na forma de onda da tensão, ocasionado pelo fim da falta no sistema.

4.4.2 CONFORMIDADE PARA O DVR SUPRIDO FONTE INDEPENDENTE

Para o DVR suprido por fonte independente e com o controle proposto, tem-se a classificação das tensões em B4 conforme a Tabela 4. A conformidade total é então dada por: $C_{\text{FONTE}} = 11,0$, ou seja 70% maior que a conformidade total obtida para o DVR suprido por linha de *back up*.

$$C_{\text{FONTE}} = 11 * 1,0 + 0 * 0,5 + 7 * 0,0 = 11,0 \quad (26)$$

Tabela 5 – Classificação das tensões em B4 após a compensação – fonte independente.

	Fonte independente					
	Trifásica		Bifásica		Fase-Terra	
	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)
LD0	1,02	0,935	1,009	0,967	1,011	0,977
LT	1,129	0,957	1,219	1,175	0,860	0,849
LD0 e LT	1,020	0,944	1,167	0,978	1,002	0,860
Legenda:		Nível de tensão -		Adequada	Precária	Crítica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a falta mais próxima, em LD₀, os níveis de tensão na barra B4, estão dentro dos padrões considerados adequados pela ANEEL. Para a falta mais distante, em LT, os níveis de tensão são considerados críticos, semelhante ao que ocorreu no item 4.4.1. Para as falta em LD₀ e LT, seguidas, o desempenho do DVR é adequado para uma falta trifásica, somente.

Dessa forma, conclui-se que, para faltas mais próximas, o DVR suprido por fonte independente é capaz de compensar os três tipos de falta que ocorrem próximo ao dispositivo e ao barramento de carga e para uma falta trifásica em LD₀ seguida de outra em LT.

4.5 SEVERIDADE DO EVENTO DE VTCD

O anexo 8.A da Resolução Normativa nº 956/2021 – Módulo 8 do PRODIST, além de classificar os eventos de VTCD, como apresentado na Tabela 1, também apresenta a estratificação em nove regiões de sensibilidade, visando correlacionar a importância de cada evento de VTCD com os níveis de sensibilidade das diferentes cargas conectadas aos sistemas de distribuição, em média e alta tensão. Essas nove regiões de sensibilidade são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Estratificação dos eventos de VTCD.

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min]
> 1,15	REGIÃO H			REGIÃO I			
(1,10 - 1,15]							
(0,85 - 0,90]	REGIÃO A			REGIÃO G			
(0,80 - 0,85]							
(0,70 - 0,80]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO F			
(0,60 - 0,70]							
(0,50 - 0,60]	REGIÃO C						
(0,40 - 0,50]							
(0,30 - 0,40]	REGIÃO E						
(0,20 - 0,30]							
(0,10 - 0,20]							
≤ 0,10							

Fonte: Anexo 8.A da Resolução Normativa nº 956/2021.

Adicionalmente, a ANEEL define o indicador Fator de Impacto, que caracteriza a severidade da incidência de eventos de VTCD, que é calculado conforme (27):

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times f_{pond_i})}{FI_{BASE}} \quad (27)$$

em que f_{ei} é a frequência de ocorrência de eventos de VTCD para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I , f_{pond_i} o fator de ponderação para cada região de sensibilidade i e FI_{BASE} o fator de impacto base, que pode ser obtido da Tabela 7 de acordo com a tensão nominal da rede.

A frequência de ocorrência de eventos de VTCD (f_{ei}) obtida para a análise é a soma do número de eventos por tipo de falta, totalizando 18 eventos.

Tabela 7 – Fatores de ponderação e fator de impacto base.

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (fpond)	Fator de Impacto Base (FI _{BASE})	
		2,3 kV < V _n < 69 kV	69 kV ≤ V _n < 230kV
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

Fonte: Anexo 8.A da Resolução Normativa nº 956/2021.

4.5.1 SEVERIDADE SEM DVR

Para a simulação das faltas com duração de 5 ciclos, ou seja 83 ms, e desconsiderando a compensação do afundamento de tensão, tem-se as regiões de sensibilidade e os fatores de ponderação na barra B3 como na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação das tensões em B3 após a compensação – *back up*.

	Sem DVR					
	Trifásica		Bifásica		Fase-Terra	
	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)
LDO	C/0,07	C/0,07	B/0,04	B/0,04	E/0,25	E/0,25
LT	E/0,25	E/0,25	B/0,04	B/0,04	B/0,04	B/0,04
LDO e LT	C/0,07	E/0,25	B/0,04	B/0,04	B/0,04	E/0,25

Legenda: Região de sensibilidade - Região B Região C Região E

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a rede sem DVR, o fator de impacto nessa condição de operação é então dado por (28):

$$FI_{SEM-DVR} = \frac{9 \cdot 0,04 + 3 \cdot 0,07 + 6 \cdot 0,25}{2,13} = 0,97 \quad (28)$$

4.5.2 SEVERIDADE PARA O DVR SUPRIDO POR LINHA DE *BACKUP*

Para o DVR suprido por linha de *backup* e com o controle proposto tem-se as regiões de sensibilidade e os fatores de ponderação na barra B4 como na Tabela 9.

Tabela 9 – Sensibilidade e fator de ponderação para DVR com linha de *backup*.

	Linha de back up					
	Trifásica		Bifásica		Fase-Terra	
	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)
LDO	A/0,00	A/0,00	A/0,00	A/0,00	A/0,00	A/0,00
LT	H/0,02	A/0,00	H/0,02	H/0,02	A/0,00	A/0,00
LDO e LT	A/0,00	A/0,00	H/0,02	A/0,00	A/0,00	A/0,00

Legenda: Região de Sensibilidade - Região A Região H

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a rede sem DVR, o fator de impacto nessa condição de operação é então dado por: $FI_{\text{BACK-UP}} = 0,04$, ou seja 96% menor que o fator de impacto obtido para a rede operando sem DVR.

$$FI_{\text{BACK-UP}} = \frac{14 * 0,00 + 4 * 0,02}{2,13} = 0,04 \quad (29)$$

4.5.3 SEVERIDADE PARA O DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE

Para o DVR suprido por fonte independente e com o controle proposto tem-se as regiões de sensibilidade e os fatores de ponderação na barra B4 como na Tabela 10.

Tabela 10 – Sensibilidade e fator de ponderação para DVR com fonte independente.

	Fonte independente					
	Trifásica		Bifásica		Fase-Terra	
	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)	Tensão Máx (pu)	Tensão Min (pu)
LDO	A/0,00	A/0,00	A/0,00	A/0,00	A/0,00	A/0,00
LT	H/0,02	A/0,00	H/0,02	H/0,02	A/0,00	A/0,00
LDO e LT	A/0,00	A/0,00	H/0,02	A/0,00	A/0,00	A/0,00

Legenda: Região de Sensibilidade - Região A Região H

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a rede sem DVR, o fator de impacto nessa condição de operação é então dado por: $FI_{\text{FONTE}} = (14 \cdot 0,00 + 4 \cdot 0,02) / 2,13 = 0,04$, ou seja igual ao fator de impacto obtido para o DVR suprido por linha de *back up*.

$$FI_{\text{FONTE}} = \frac{14 * 0,00 + 4 * 0,02}{2,13} = 0,04 \quad (29)$$

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a análise de um dispositivo, o regulador dinâmico de tensão baseado em D-FACTS, capaz de compensar quedas de tensões na rede de distribuição de energia elétrica quando ocorrem faltas que acometam o sistema. Utilizando uma estratégia de controle a partir da transformada $dq0$, o dispositivo possui o objetivo de identificar uma queda de tensão devido a uma falta e realizar a compensação dessa queda no barramento da carga, evitando que os níveis de qualidade do fornecimento de energia elétrica sejam prejudicados.

A partir dos valores adquiridos na simulação do sistema testado, conclui-se que o dispositivo tem desempenho satisfatório, redução em 96% do fator de impacto de eventos VTCD, para as três faltas que ocorrem perto do barramento de carga e do dispositivo. Na configuração em que o DVR é suprido por fonte independente, um resultado positivo foi obtido para uma falta trifásica em LD_0 , seguida por uma falta trifásica em LT. Para o DVR suprido por linha de *back up*, somente na falta bifásica, o dispositivo apresentou desempenho satisfatório. Esse melhor comportamento do DVR com fonte independente é mensurado por sua conformidade de tensão de valor 40% maior que a conformidade obtida para o DVR com linha de backup.

Dessa forma, para o trabalho desenvolvido e dada as características apresentadas do sistema, a estratégia empregada mostra-se eficiente quando empregada, pois a redução no indicador de Fator de Impacto é reduzido em 96%. Além disso, a utilização de uma fonte independente para suprir o DVR tem conformidade de tensão 40% maior, quando comparado com o DVR suprido por linha de backup.

REFERÊNCIAS

P. KHETARPAL; M. M. TRIPATHI – **“A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification”** - Sustainable Computing: Informatics and Systems, Volume 28, 2020.

Van den Broeck, G., Stuyts, J., Driesen, J. - **“A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids”**. Appl. Energy 229, 2018.

Hassanein, W.S., Ahmed, M.M., abed el Raouf, M.O., Ashmawy, M.G., Mosaad, M.I. – **“Performance improvement of off-grid hybrid renewable energy system using dynamic voltage restorer”**. Alexandria Engineering Journal, Volume 59, Issue 3, Pages 1567-1581, 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL - **ANEXO VIII DA RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 956, DE 7 DE DEZEMBRO 2021 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST MÓDULO 8 – QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA**. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em 07 de janeiro de 2023.

MELHORN, C. J.; DAVIS, T. D.; BEAM, G. E. **Voltage sags: Their impact on the utility and industrial customers**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 34, n.3, p.549-558,1998.

A. H. SOOMRO; A. S. LARIK; M. A. MAHAR; A. A. SAHITO; A. M. SOOMRO; G. S. KALOI – **“Dynamic Voltage Restorer - A comprehensive review”**, Energy Reports, 2021.

AWAD, H.; BLAABJERG, F. - **Mitigation of voltage swells by static series compensator**. In: IEEE-PELS. Proceedings of Power Electronics Specialists Conference. Mexico City, 2004. v. 5, p. 3505-3511. PESC'04.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Qualidade do suprimento**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>. Acesso em 07 de janeiro de 2023.

G.I. NICOLAESCU, H. ANDREI, S. RADULESCU - **Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sags Mitigation in Medium Voltage Networks with Secondary Distribution Configuration**. IEEE Xplore, 2014.

A. SHABANPOUR; A. R SEIFI – “**Comparative Studies of Different Control Strategies of a Dynamic Voltage Restorer Based on Matrix Converter**”. Hindawi Publishing Corporation, Advances in Power Electronics, 2012.

S. D. Umans, **Máquinas elétricas** de Fitzgerald e Kingsley, 7ª ed., Porto Alegre: AMGH, 2014.

M.G. Molina, P.E. Mercado – “**Control Design and Simulation of DSTATCOM with Energy storage for Power Quality Improvements**”, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, 2006.

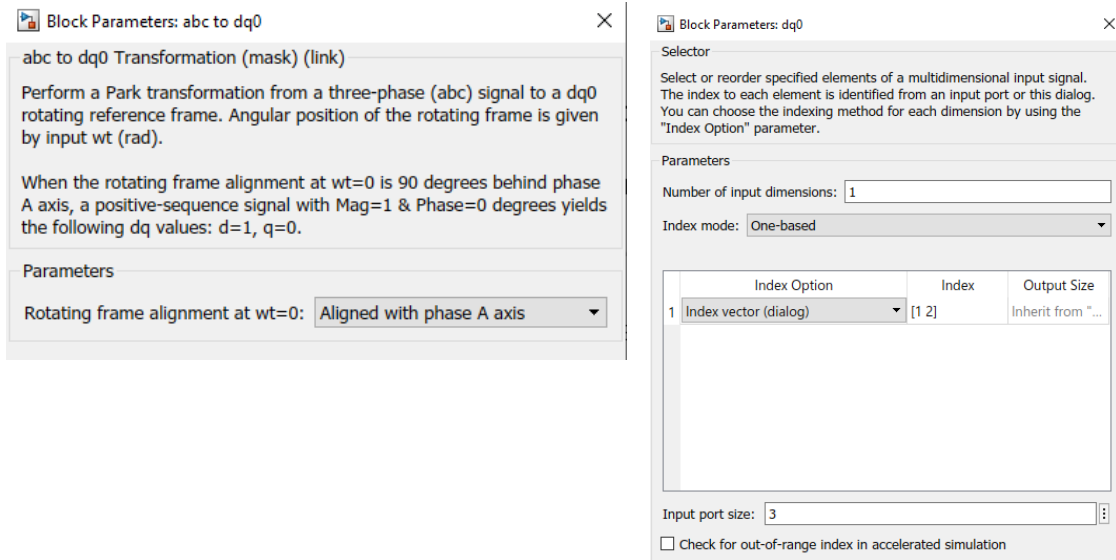
A. Ghosh, A.K. Jindal, A. Joshi – “**Design of A Capacitor-Supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Unbalanced and Distorted Loads**”, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 19, No. 1, January 2004

SANTOS, R. S.; BARBOSA, J. J. **Template para produção de trabalhos acadêmicos na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Biblioteca, 2021. 40 p.

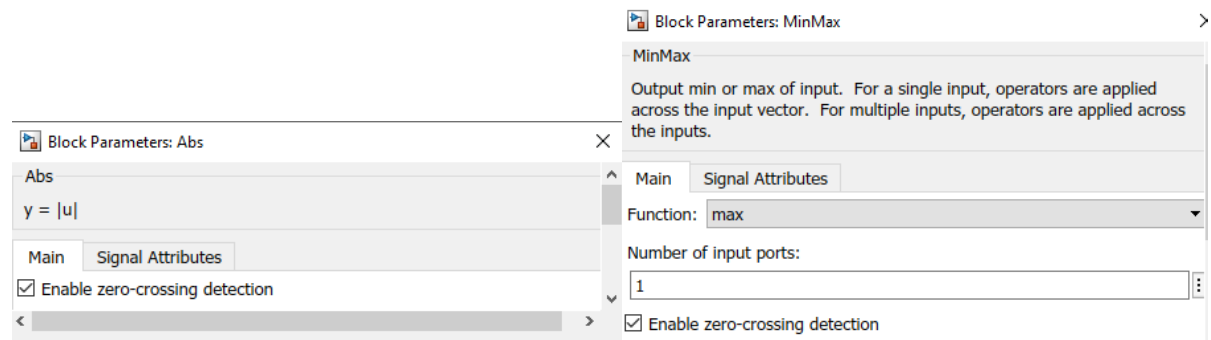
ANEXO

A.1 – PARÂMETROS DOS BLOCOS DO REGULADOR DE TENSÃO

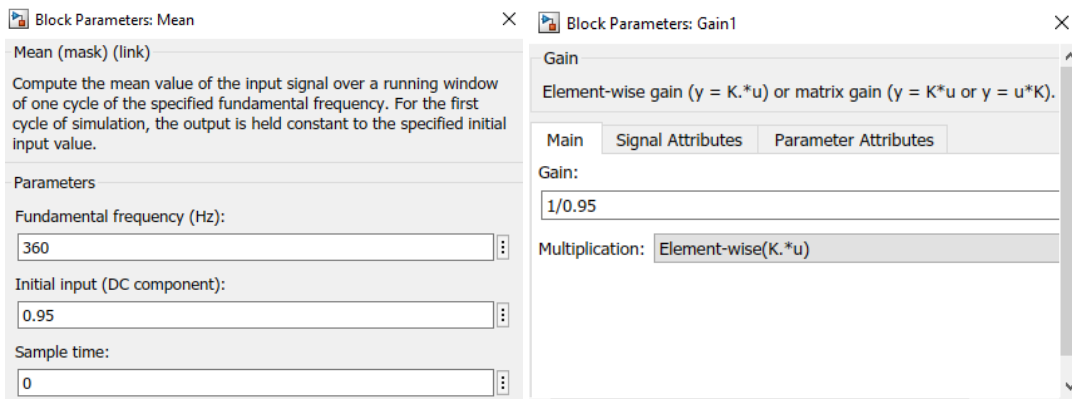
A.1.1 BLOCOS “abc to dq0” E “Selector”



A.1.2 BLOCOS “Abs” E “MinMax”



A.1.3 BLOCOS “Mean” E “Gain1”



A.1.4 BLOCOS “saturation”, “Math Function” E “Slider Gain”

Block Parameters: Saturation

Saturation

Limit input signal to the upper and lower saturation values.

Main Signal Attributes

Upper limit:

1.00

Lower limit:

0.00

☒ Treat as gain when linearizing

☒ Enable zero-crossing detection

Block Parameters: Slider Gain

Slider Gain (mask) (link)

Move the slider to modify the scalar gain.

Parameters

0.0 15.0

10.0

Low High

0 15

Block Parameters: Math Function

Math

Mathematical functions including logarithmic, exponential, power, and modulus functions. When the function has more than one argument, the first argument corresponds to the top (or left) input port.

Main Signal Attributes

Function: pow

☐ Signed power

Output signal type: auto

A.1.5 BLOCOS “product” E “dq0 to abc”

Block Parameters: dq0_inv

dq0 to abc Transformation (mask) (link)

Perform an inverse Park transformation from a dq0 rotating reference frame to a three-phase (abc) signal. Angular position of the rotating frame is given by input wt (rad).

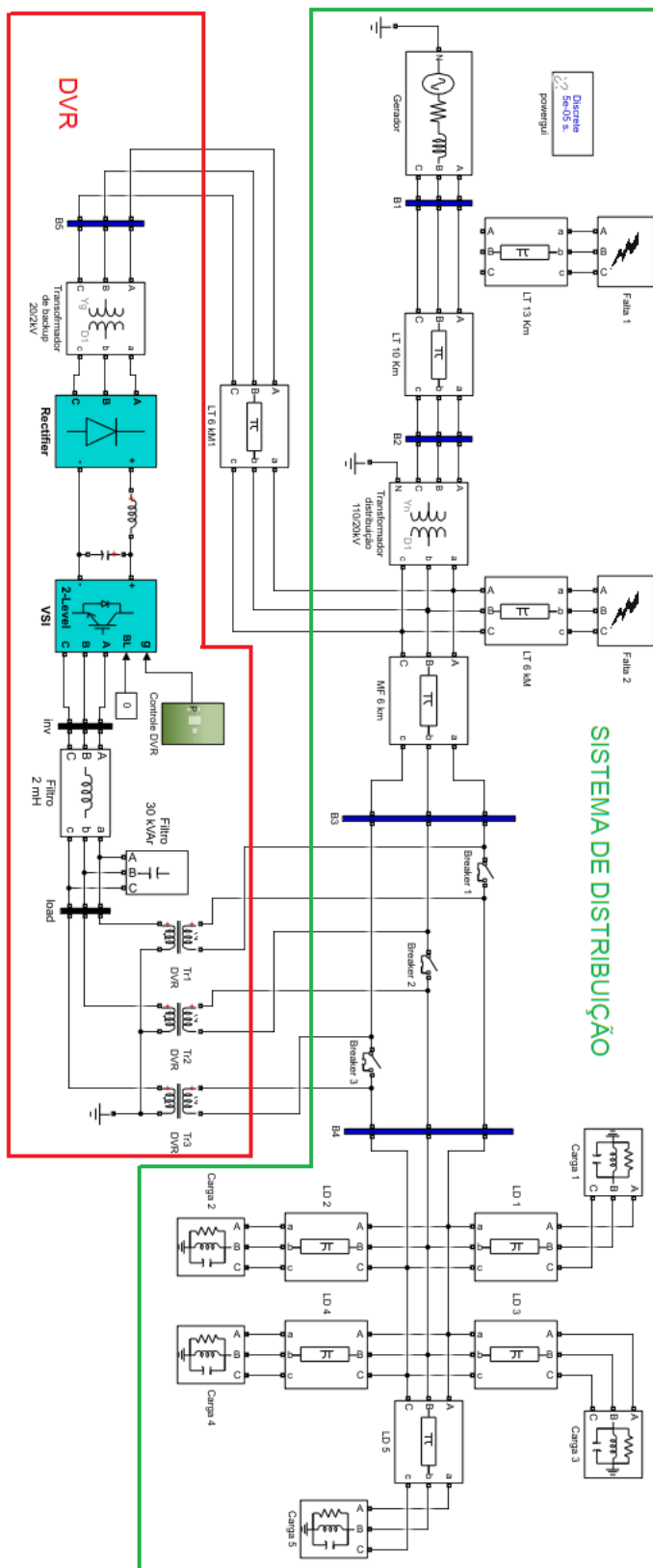
When the rotating frame alignment at wt=0 is 90 degrees behind phase A axis, a positive-sequence signal with Mag=1 & Phase = 0 degrees yields the following dq values: d=1, q=0.

Parameters

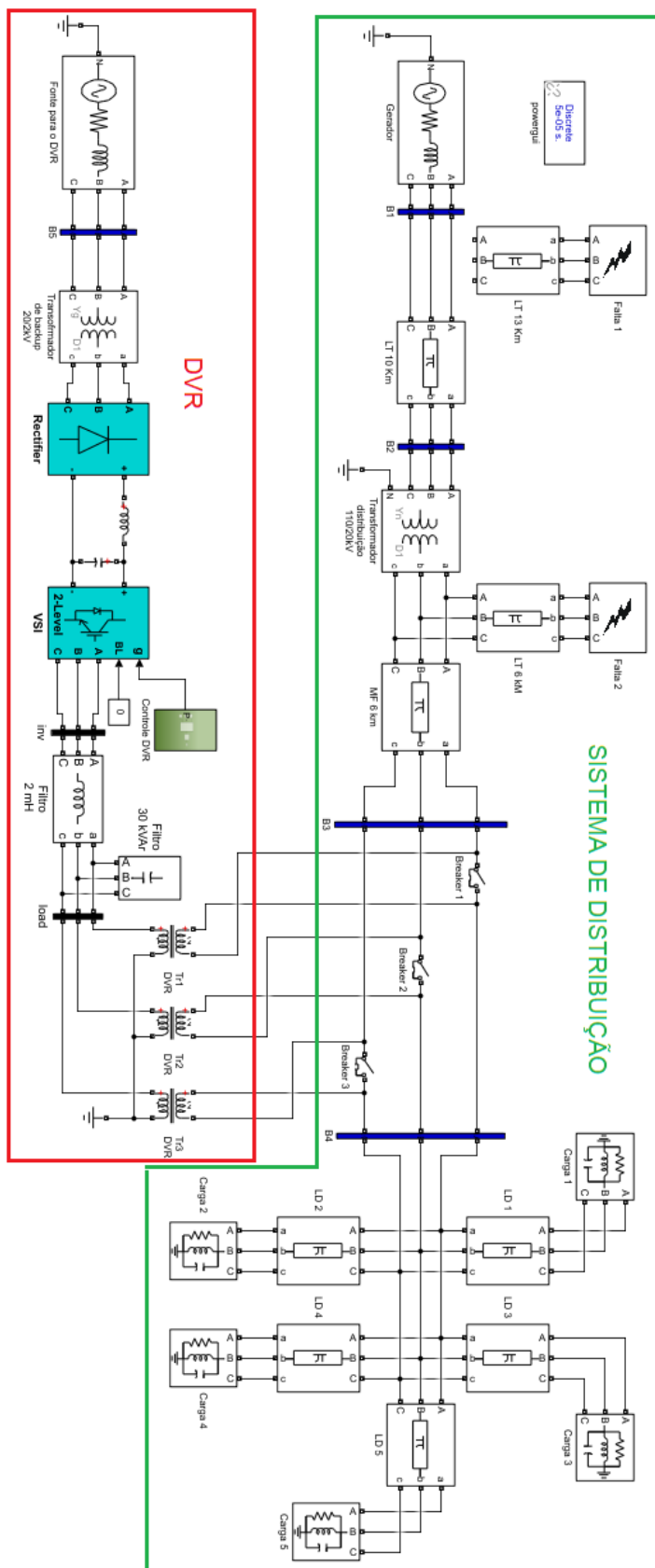
Rotating frame alignment at wt=0: Aligned with phase A axis

A.2 – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO IMPLEMENTADO

A.2.1 DVR SUPRIDO POR LINHA DE BACK UP



A.2.2 DVR SUPRIDO POR FONTE INDEPENDENTE



A.3 – PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES DE INJEÇÃO

 Block Parameters: Tr1 DVR
 ×

Linear Transformer (mask) (link)

Implements a three windings linear transformer.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Parameters

Units pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]:

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]:

☐ Three windings transformer

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]:

Magnetization resistance and inductance [Rm(pu) Lm(pu)]:

Measurements None