

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO DE SENSIBILIDADE DE DISPOSITIVO DE
COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIO DE CARGA**

UBERLÂNDIA/MG

2018

LEONARDO RESENDE CANDIDO

**AVALIAÇÃO DE SENSIBILIDADE DE DISPOSITIVO DE
COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIO DE CARGA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito de avaliação
do curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia para
obtenção do título de bacharel.

Orientador: Ivan Nunes Santos

Assinatura do Orientador

UBERLÂNDIA/MG

2018

LEONARDO RESENDE CANDIDO

**AVALIAÇÃO DE SENSIBILIDADE DE DISPOSITIVO DE
COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIO DE CARGA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito de avaliação
do curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia para
obtenção do título de bacharel.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ivan Nunes Santos

Prof. José Carlos de Oliveira

Raquel Cristina Filiagi Gregory

UBERLÂNDIA/MG

2018

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter iluminado meu caminho nas horas difíceis durante a graduação.

Ao professor Ivan Nunes pela oportunidade de realizar este trabalho e por toda ajuda prestada.

A Raquel Filiagi por todas as sugestões e disponibilidade em ajudar na realização deste trabalho.

Ao Lucas Tiago por permitir a realização deste trabalho com base em seus estudos realizados.

À minha família, em especial meus pais, irmãs e avós por todo carinho, suporte e cuidado especial que sempre tiveram comigo.

Ao meu amigo Eduardo Borges por me ajudar nos momentos mais críticos da graduação.

Aos meus amigos de graduação por todos os bons momentos vividos e conhecimentos compartilhados.

RESUMO

O desequilíbrio de tensão no sistema elétrico é um fenômeno relacionado aos âmbitos da qualidade da energia elétrica, sendo que são diversas as causas que levam a sua origem. Em suma, o desequilíbrio pode impactar severamente no funcionamento do sistema, principalmente de alguns tipos de cargas a este conectadas. Entretanto, tal fenômeno pode ser causado tanto pela conexão de cargas desequilibradas, quando por problemas nos sistemas de geração e transmissão. De modo a corrigir os efeitos causados por estas cargas, dispositivos como os compensadores dinâmicos são desenvolvidos e inseridos no sistema. Contudo, tais dispositivos de mitigação são dimensionados, via de regra, partindo do princípio de que a fonte supridora de energia é equilibrada. Devido a esta perspectiva, este trabalho busca avaliar, através de simulações computacionais, o comportamento de um dispositivo compensador, desenvolvido em pesquisas anteriores na UFU, quando este é inserido em um sistema onde a fonte é desequilibrada.

Palavras-chave: desequilíbrio de tensão, compensador dinâmico, qualidade da energia, compartilhamento de responsabilidade.

ABSTRACT

Voltage imbalance is a phenomenon that occurs in electrical systems and it's related to the power quality fields, besides there might have lots of situations that can cause it. In short, the voltage imbalance may result serious damage on the electrical system behavior, especially in some kind of the loads connected to it. However, this phenomenon can be caused by unbalanced loads but also by bad functioning or troubles in transmission or power supply. In order to fix the effects caused by these loads, devices as thought dynamic imbalance compensator is built and plugged into the systems. Although, such devices are developed, as a general rule, based on the principle that the power supply it's completely balanced. In charge of this perspective, this work proposes to evaluate, through computational simulations, the behavior of an imbalance compensator, developed in previous researches on UFU, when such device is plugged into a system where power source is unbalanced.

Keywords: voltage imbalance, dynamic imbalance compensator, power quality, sharing responsibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre os métodos de cálculo do fator de desequilíbrio (GOUVEIA TEODORO, 2005).....	19
Figura 2 - Representação da carga desequilibrada (DE OLIVEIRA, 2018).....	24
Figura 3 - Representação do conjunto carga e compensador dinâmico (DE OLIVEIRA, 2018).....	25
Figura 4 - Elementos que compõem o compensador dinâmico (DE OLIVEIRA, 2018)	28
Figura 5 - Fluxograma: lógica de controle (DE OLIVEIRA, 2018)	30
Figura 6 - Diagrama unifilar do sistema elétrico estudado (DE OLIVEIRA, 2018)	31
Figura 7 - Sistema elétrico representado no MATLAB, sem alterar a fonte de alimentação (DE OLIVEIRA, 2018)	35
Figura 8 - Sistema elétrico representado no MATLAB, para a variação do FD numa mesma simulação	35
Figura 9 - Representação no MATLAB da carga desequilibrada	36
Figura 10 - Simulação para $FD = 0,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma	39
Figura 11 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 0,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma	39
Figura 12 - Simulação para $FD = 1,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma	40
Figura 13 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 1,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma	40
Figura 14 - Simulação para $FD = 1,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma	41
Figura 15 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 1,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma	41
Figura 16 - Simulação para $FD = 2,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma	42

Figura 17 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 2,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma	42
Figura 18 - Simulação para $FD = 0,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma	43
Figura 19 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 0,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma	43
Figura 20 - Simulação para $FD = 1,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma	44
Figura 21 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 1,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma	44
Figura 22 - Simulação para $FD = 1,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma	45
Figura 23 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 1,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma	45
Figura 24 - Simulação para $FD = 2,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma	46
Figura 25 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 2,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma	46
Figura 26 - Níveis de desequilíbrios resultantes da alteração do FD da fonte de 1% para 2%, com tais desequilíbrios causados pela alteração apenas das magnitudes das tensões do sistema supridor	47
Figura 27 - Fator de potência resultante da alteração do FD da fonte de 1% para 2%, com tais desequilíbrios causados pela alteração apenas das magnitudes das tensões do sistema supridor	47
Figura 28 - Níveis de desequilíbrios resultantes da alteração do FD da fonte de 1% para 2%, com tais desequilíbrios causados pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões do sistema supridor	48

Figura 29 - Níveis de desequilíbrios resultantes da alteração do FD da fonte de 1% para 2%, com tais desequilíbrios causados pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões do sistema supridor 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros elétricos do elementos do sistema estudado (DE OLIVEIRA, 2018).....	32
Tabela 2 - Características de potência demandada pela carga desequilibrada (DE OLIVEIRA, 2018)	33
Tabela 3 - Tempo dos estágios de carga (DE OLIVEIRA, 2018)	33
Tabela 4 - Características elétricas das cargas equilibradas (DE OLIVEIRA, 2018)	34
Tabela 5 - Grandezas dos elementos passivos do compensador (DE OLIVEIRA, 2018)	34
Tabela 6 - Parâmetros simulados para o sistema supridor	37
Tabela 7 - Parâmetros da alimentação do sistema para simulação da alteração do FD	38

LISTA DE ABREVIATURAS

FD	Fator de desequilíbrio
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
RCT	Reator Controlado por Tiristores
CCT	Capacitor Chaveado por Tiristores
PI	Proporcional Integral
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Operador de rotação igual a $1 \angle 120^\circ$
B_{ab}	Susceptância da carga entre as fases A e B
B_{bc}	Susceptância da carga entre as fases B e C
B_{ca}	Susceptância da carga entre as fases C e A
B'_{ab}	Susceptância do compensador entre as fases A e B
B'_{bc}	Susceptância do compensador entre as fases B e C
B'_{ca}	Susceptância do compensador entre as fases C e A
$FD\%_{carga}$	Fasor do desequilíbrio referente a carga conectada
$FD\%_{pós}$	Fasor do desequilíbrio referente ao instante após a conexão da carga
$FD\%_{pré}$	Fasor do desequilíbrio referente ao instante antes da conexão da carga
G_{ab}	Condutâncias equivalentes da carga entre as fases A e B
G_{bc}	Condutâncias equivalentes da carga entre as fases B e C
G_{ca}	Condutâncias equivalentes da carga entre as fases C e A
G_{eq}	Condutância equivalente da associação carga e compensador
I	Módulo da corrente de linha
P_{ab}	Potência ativa entre as fases A e B, referentes à carga
P_{bc}	Potência ativa entre as fases B e C, referentes à carga
P_{ca}	Potência ativa entre as fases C e A, referentes à carga
Q_{ab}	Potência reativa entre as fases A e B, referentes à carga
Q_{bc}	Potência reativa entre as fases B e C, referentes à carga
Q_{ca}	Potência reativa entre as fases C e A, referentes à carga
Q'_{ab}	Potência reativa entre as fases A e B, referentes ao compensador
Q'_{bc}	Potência reativa entre as fases B e C, referentes ao compensador
Q'_{ca}	Potência reativa entre as fases C e A, referentes ao compensador
V	Módulo da tensão fase-neutro
V_{ab}	Módulo da tensão entre as fases A e B
V_{bc}	Módulo da tensão entre as fases B e C
V_{ca}	Módulo da tensão entre as fases C e A
V_m	Média de todas as tensões de linha
$V_{máx}$	Maior valor das tensões de linha medidas
$V_{mín}$	Menor valor das tensões de linha medidas

V_1	Módulo da tensão eficaz de sequência positiva
V_2	Módulo da tensão eficaz de sequência negativa
$\dot{V}_a$	Tensão da fase A
$\dot{V}_b$	Tensão da fase B
$\dot{V}_c$	Tensão da fase C
$\dot{V}_{ab}$	Fasor de tensão entre as fases A e B
$\dot{V}_{bc}$	Fasor de tensão entre as fases B e C
$\dot{V}_{ca}$	Fasor de tensão entre as fases C e A
$\dot{V}_0$	Tensão da componente de sequência zero
$\dot{V}_1$	Tensão da componente de sequência positiva
$\dot{V}_2$	Tensão da componente de sequência negativa
$\dot{Y}_{ab}$	Admitâncias equivalentes da carga entre as fases A e B
$\dot{Y}_{bc}$	Admitâncias equivalentes da carga entre as fases B e C
$\dot{Y}_{ca}$	Admitâncias equivalentes da carga entre as fases C e A
ΔV	Desvio máximo da tensão de linha média
ϕ	Ângulo do fator de potência desejado após a inserção do compensador
θ_a	Ângulo de fase da tensão A
θ_b	Ângulo de fase da tensão B
θ_c	Ângulo de fase da tensão C

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Introdução Geral	14
1.2	Objetivos	15
1.3	Metodologia	15
2	ESTADO DA ARTE SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO	16
2.1	Conceito	16
2.2	Fator De Desequilíbrio	16
2.2.1	Método Das Componentes Simétricas	16
2.2.2	Método CIGRÉ	17
2.2.3	Método ANSI/NEMA	18
2.2.4	Método IEEE Clássico	18
2.2.5	Comparação Entre Os Métodos Apresentados	19
2.3	Causas Do Desequilíbrio De Tensão	20
2.4	Efeitos Do Desequilíbrio De Tensão	20
2.5	Normas	21
2.6	Divisão de responsabilidade	22
3	COMPENSADOR DE DESEQUILÍBRIOS	23
3.1	Filosofia Do Compensador	23
3.2	Especificação Dos Parâmetros Do Compensador	24
3.3	Compensação Dinâmica	27
3.4	Sistema de Controle	29
4	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO COMPENSADOR	31
4.1	Caracterização Do Sistema Elétrico Simulado	31
4.2	Representação Do Sistema Implementado No MATLAB/SIMULINK	34
4.3	Simulações Computacionais	36
4.3.1	Estudo De Caso 1	39
4.3.2	Estudo De Caso 2	40
4.3.3	Estudo De Caso 3	41
4.3.4	Estudo De Caso 4	42
4.3.5	Estudo De Caso 5	43
4.3.6	Estudo De Caso 6	44
4.3.7	Estudo De Caso 7	45
4.3.8	Estudo De Caso 8	46
4.3.9	Estudo De Caso 9	47
4.3.10	Estudo De Caso 10	48
4.4	Análise De Resultados	49

4.5	Desafios E Estudos Futuros.....	50
5	CONCLUSÃO.....	52
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução Geral

Dada a importância da energia elétrica no atual cenário mundial e sua relação direta com o desenvolvimento econômico e social dos países (NIZUMA SIMABUKULO, DA SILVA CORREA, *et al.*), a qualidade da energia elétrica é um dos tópicos com maior enfoque por parte de pesquisadores e cientistas do ramo. Isto se deve, além da necessidade inerente em se oferecer ao consumidor um suprimento de energia elétrica cada vez com melhor qualidade, mas também ao fato de que a difusão dos meios de informação tem tornado os consumidores bastante exigentes e criteriosos com relação a este assunto.

De modo mais amplo, a qualidade da energia elétrica fornecida está atrelada basicamente em analisar o comportamento das magnitudes das tensões e dos seus respectivos defasamentos angulares, da sua forma de onda, além do comportamento da frequência (NUNES SANTOS, 2018). Sob esta perspectiva de análise, dentre os diversos problemas enfrentados pelos sistemas elétricos, o desequilíbrio de tensão vem sendo bastante abordado por pesquisas, que, no geral, visam estudar suas causas e efeitos no sistema elétrico, bem como maneiras de mitigar os problemas causados em decorrência de tais manifestações.

Resumidamente, o desequilíbrio de tensão ocorre quando o sistema elétrico se encontra desbalanceado, ou seja, quando as magnitudes das tensões e ou, a defasagem angular entre elas, não são iguais (PAULILO, 2013). Uma das formas de se tentar corrigir um sistema quando este se encontra desequilibrado é fazendo o uso de compensadores, que podem ser tanto estáticos quanto dinâmicos. Independentemente do tipo destes dispositivos, eles atuam no sistema corrigindo os problemas causados ao se conectar cargas desbalanceadas. Entretanto, o desequilíbrio pode ser causado também por assimetrias de impedâncias do sistema ou, ainda, assimetrias nos próprios meios existentes de geração, como alguns modelos de geração distribuída.

Além disso, parte dos compensadores são projetados partindo do princípio que a rede supridora do sistema, ao qual estes dispositivos possivelmente serão instalados, é equilibrada, fato este que nem sempre ocorre na prática. Assim, faz-se necessário entender como se comporta um conjunto carga e compensador, quando

há, inerente ao sistema de distribuição, um desequilíbrio de tensão. Isso se torna relevante, uma vez que é bastante difícil de se obter um sistema elétrico totalmente balanceado, dado as situações que envolvem seu uso e até mesmo devido a razões físicas (OLIVEIRA, FILIAGI GREGORY e DE OLIVEIRA, 2017).

1.2 Objetivos

Este trabalho busca estudar como será o comportamento de um específico conjunto carga e compensador dinâmico, quando o fornecimento de energia pelo sistema de distribuição já se encontra desequilibrado por natureza. A razão em se optar pelo estudo do compensador dinâmico é bem simples, as cargas desbalanceadas conectadas ao sistema elétrico, em geral, não possuem um padrão específico de comportamento ao longo do tempo, fazendo com que o uso de compensadores dinâmicos seja mais aplicável.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se como base o sistema elaborado em (DE OLIVEIRA, 2018). Desta forma, o comportamento das cargas equilibradas e desequilibradas conectadas neste sistema, bem como o compensador dinâmico implementado, não sofreram alterações. Com isso, não se desenvolveu um novo conjunto, mas sim buscou-se executar os estudos utilizando o trabalho já citado.

Fazendo uso dos recursos presentes na ferramenta SIMULINK, contida no *software* MATLAB, buscou-se realizar simulações computacionais do sistema em questão, porém aplicando uma fonte supridora desequilibrada no mesmo. A partir das simulações, visou-se comparar o comportamento das tensões e do fator de potência (fp) no barramento da carga em três situações diferentes: barramento em vazio, barramento com a conexão apenas da carga, e barramento com a conexão do conjunto carga e compensador.

2 ESTADO DA ARTE SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

2.1 Conceito

Como citado brevemente na introdução deste trabalho, o desequilíbrio de tensão em sistemas trifásicos ocorre quando as magnitudes das tensões apresentam valores distintos entre si ou defasagem angular entre os fasores diferente de 120° elétricos, ou ainda quando ocorrem estas duas condições conjuntamente (PAULILO, 2013). É também entendido como um problema na qualidade da energia elétrica caracterizado pelas normas, que regulamentam o setor, como um fenômeno de regime permanente (NUNES SANTOS, 2018).

Os tópicos a seguir visam expor as causas e os efeitos do desequilíbrio de tensão, os diferentes meios de se determinar o indicador fator de desequilíbrio que quantifica este fenômeno, as normas nacionais e internacionais referentes ao assunto, além dos trabalhos relacionados às atribuições de responsabilidade entre consumidores e concessionárias.

2.2 Fator De Desequilíbrio

O fator de desequilíbrio é um indicador utilizado para quantificar o desequilíbrio de tensão presente em determinado sistema elétrico. O valor deste indicador pode ser calculado de acordo com diferentes vertentes e normas, conforme se segue abaixo.

2.2.1 Método Das Componentes Simétricas

Este método utiliza como base o princípio exposto pelo Teorema de Fortescue, onde todo o sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas trifásicos equilibrados, sendo um de sequência positiva, um de sequência negativa e outro de sequência zero (ALMEIDA e FREITAS, 1995).

Basicamente, o sistema de sequência positiva é representado por três fasores de mesma magnitude, defasados de 120° e com a mesma sequência de fase que o sistema original. Já o sistema de sequência negativa apresenta sequência de fase inversa ao sistema original desequilibrado, mas também apresenta os três fasores de

mesma magnitude e defasados de 120°. Por sua vez, o sistema de sequência zero possui todos os fasores em fase e de mesma magnitude.

Estas componentes de sequência positiva, negativa e zero podem ser calculadas como mostrado na Equação 4.1.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Onde:

- $\dot{V}_a$, $\dot{V}_b$ e $\dot{V}_c$ – fasores das tensões de fase para o sistema real A, B e C, respectivamente;
- $\dot{V}_0$, $\dot{V}_1$ e $\dot{V}_2$ – fasores das tensões de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;
- a – operador igual a $1 \angle 120^\circ$.

A partir dos valores das componentes simétricas obtidos, é possível determinar o fator de desequilíbrio, conforme expressado na Equação 4.2.

$$FD\% = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Onde:

- V_1 e V_2 - módulo das tensões eficazes de sequência positiva e negativa, respectivamente.

Observa-se que é apenas considerado, para fins de determinação do indicador, as magnitudes das componentes de sequência positiva e negativa. Contudo, atualmente tem-se realizado estudos que visam determinar o fator de desequilíbrio como um fasor, de modo que o ângulo possa apresentar correlação com alguns fenômenos físicos na prática (FERREIRA FILHO, 2008).

2.2.2 Método CIGRÉ

Este método é calculado a partir dos valores das tensões fase-fase do sistema em análise. Isso se torna interessante em situações onde, por exemplo, os medidores utilizados para a aferição das tensões não conseguem identificar os ângulos de defasamento entre estas (DE OLIVEIRA, 2018).

Os valores das tensões de linha são utilizados para calcular uma grandeza adimensional, que por sua vez faz parte do cálculo do fator de desequilíbrio, como indicado nas Equações 4.3 e 4.4.

$$FD\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (4.3)$$

Onde β é determinado por:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (4.4)$$

Onde:

- V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são os valores das tensões de linha medidas.

Nesta metodologia de cálculo do fator de desequilíbrio, evidentemente, sempre terá como resultado uma componente de sequência zero nula, pois são usados apenas os valores de tensão de linha nos cálculos. Ressalta-se que os resultados obtidos no método das componentes simétricas e no método CIGRÉ, considerando informações de linha, são iguais (LACERDA ARÃO, 2014).

2.2.3 Método ANSI/NEMA

Neste método, o fator de desequilíbrio é determinado a partir da razão entre o maior desvio da tensão média e do valor médio da tensão de linha, conforme identificado na Equação 4.5.

$$FD\% = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Onde:

- ΔV é o desvio máximo da tensão de linha média;
- V_m é o valor referente à média de todas as tensões de linha.

2.2.4 Método IEEE Clássico

É calculado de maneira semelhante ao método anterior, entretanto leva em consideração a maior diferença entre os valores das tensões medidas, conforme Equação 4.6.

$$FD\% = \frac{V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n}}{\left[\frac{(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})}{3} \right]} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Onde:

- $V_{m\acute{a}x}$ é o maior valor das tensões medidas;
- $V_{m\acute{i}n}$ é o menor valor das tensões medidas;
- V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são os valores das tensões de linha medidas.

2.2.5 Comparação Entre Os Métodos Apresentados

De modo a sumarizar, a Figura 1 mostra uma comparação feita entre os resultados obtidos no cálculo do fator de desequilíbrio utilizando os quatro métodos diferentes apresentados, para as mesmas situações.

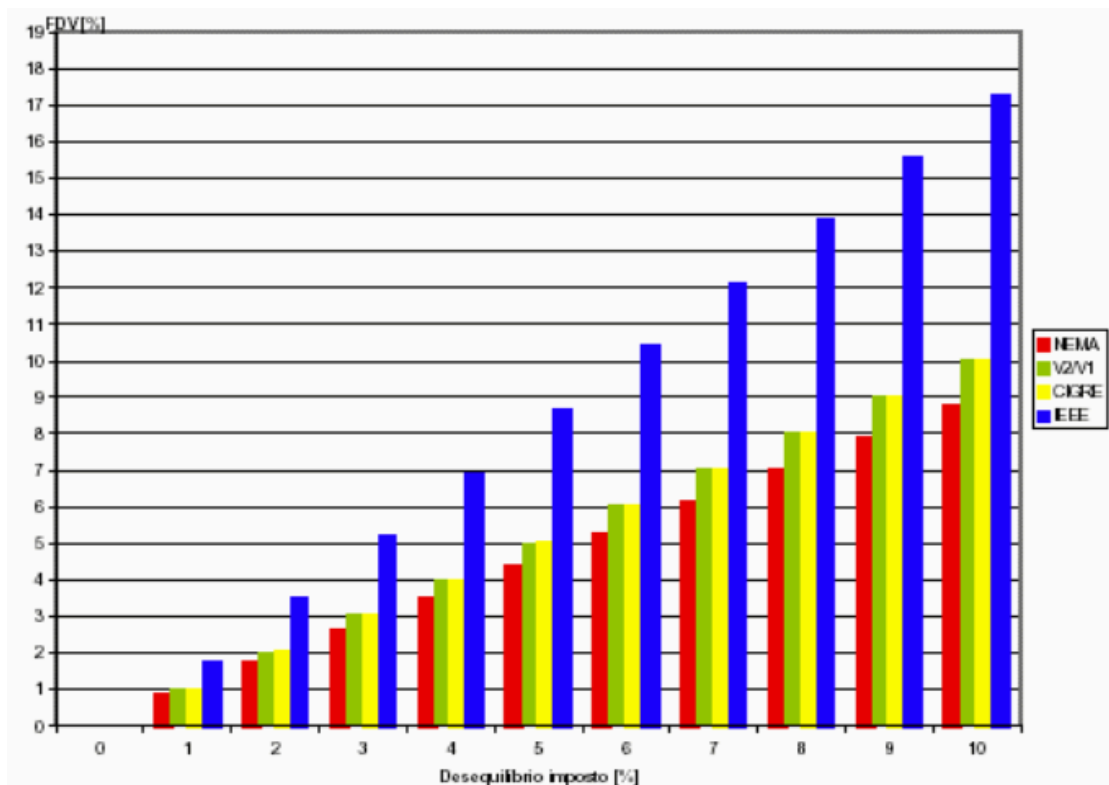


Figura 1 - Comparação entre os métodos de cálculo do fator de desequilíbrio (GOUVEIA TEODORO, 2005)

Vale salientar que, a definição aqui apresentada para o IEEE, trata-se de fato de uma norma publicada em 1993 (Standard 141) (DAVID RODRIGUEZ, MARTINEZ FUENTES e JARAMILLO MATTA, 2015) e que ficou vigente até 2009, quando foi

substituída pela norma Standard 1159 (IEEE STD. 1159, 2009), a qual usa o cálculo via razão das sequência e/ou equação CIGRE.

2.3 Causas Do Desequilíbrio De Tensão

Existem várias causas do desequilíbrio de tensão, sendo que estas podem estar atreladas tanto à problemas no suprimento de energia, ou devido a determinados tipos de cargas que são conectadas no sistema elétrico. Em suma, o desequilíbrio ocorre devido a assimetrias na geração, ou na transmissão ou na conexão das cargas nas fases do sistema.

As principais causas observadas atualmente são:

- Distribuição de cargas monofásicas ou bifásicas de modo diferente entre as fases;
- Cargas trifásicas desequilibradas;
- Conexão de cargas especiais como fornos a arco e máquinas de solda;
- Disposição das fases entre si, devido as características construtivas das linhas de transmissão. Este fato pode ser mitigado ao realizar a transposição das linhas;
- Geração distribuída, pois em inúmeros casos as conexões dos sistemas de geração são realizadas de modo monofásico ou bifásico;
- Transformadores com impedâncias assimétricas ou conectados em delta aberto;
- Abertura de fusíveis em bancos de capacitores;
- Sistemas ferroviários com tração elétrica, uma vez que causam bruscas variações nos momentos de aceleração e frenagem.

2.4 Efeitos Do Desequilíbrio De Tensão

De um modo geral, o desequilíbrio de tensão pode causar danos nos equipamentos elétricos, alterando o funcionamento e desempenho destes, além de, na maioria das vezes, diminuir o tempo de vida útil dos mesmos.

Em motores de indução os malefícios causados pelo desequilíbrio são bastante nítidos, sendo que eles possuem natureza térmica e mecânica. Uma vez que as impedâncias de sequência negativa destes motores apresentam valores muito

pequenos, ocorre então um desequilíbrio de correntes bastante elevado, causando um significativo sobreaquecimento. Além disto, estas correntes de sequência negativa farão surgir no motor um campo girante em sentido contrário àquele devido as correntes de sequência positiva, causando vibrações, ruídos e desgastes. Todos estes efeitos irão contribuir para uma significativa redução na vida útil dos motores de indução (PAULILO, 2013).

Outro exemplo são os conversores CC-CA, que também são dispositivos que frente a presença de desequilíbrios podem apresentar mau funcionamento. Ao serem conectados em uma rede balanceada, estes conversores passam a gerar, além das ordens harmônicas características, as chamadas componentes não-características, causando ainda mais distorções na rede elétrica (DE OLIVEIRA, 2018).

2.5 Normas

Existem pelo mundo alguns comitês e órgãos reguladores os quais propõem índices de conformidade do fator de desequilíbrio. Todos eles visam atender a crescente preocupação sobre a qualidade no fornecimento de energia sobretudo com relação aos níveis de desequilíbrio e suas consequências na operação do sistema e no funcionamento das cargas.

Em termos nacionais, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina, através do Módulo 8 do PRODIST, que o fator de desequilíbrio tenha valor máximo de 3% para valores de tensão inferiores a 1 kV, e de 2% para redes de distribuição com tensões entre 1 kV e 230 kV (ANEEL, 2017). Já o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), através do Submódulo 2.8 – Procedimentos de Rede, sugere que, para a rede básica, os limites globais e individuais tenham valores máximos de 1,5% e 2,0% (ONS, 2016).

Para o comitê europeu *International Electrotechnical Commission* (IEC), a partir da recomendação IEC 1000-2-2, os níveis máximos do fator de desequilíbrio devem ser abaixo de 2%, podendo serem determinados através do método das componentes simétricas ou pelo método CIGRÉ (MAGALHÃES FEITOSA, 2009).

De modo semelhante, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) propõe no documento *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, que o fator de desequilíbrio seja menor que 2%, sendo sugerido que seja inferior a 1% (IEEE STD. 1159, 2009).

Outro órgão internacional, o *American National Standards Institute* (ANSI), sugere que o fator de desequilíbrio seja determinado através do método NEMA e que tenha valor máximo recomendado de 3%, em condições a vazio (ANSI C84.1-2011, 2011).

É importante ressaltar que em nenhum dos documentos ou órgãos supracitados, são estabelecidos procedimentos que determinem os níveis de responsabilidade pertinentes às concessionárias de energia e aos consumidores finais, devido ao desequilíbrio apresentado no sistema elétrico (MAGALHÃES FEITOSA, 2009).

2.6 Divisão de responsabilidade

De forma a elucidar como se apresenta a questão da divisão de responsabilidades quando há o desequilíbrio de tensão, aqui são citados alguns métodos que buscam realizar esta análise, contudo não entrando no mérito da eficácia de tais métodos.

O método da IEC (IEC/TR 61000-3-13, 2008) propõe identificar o nível de emissão de desequilíbrio caso seja possível medi-lo no sistema antes e depois da conexão de determinada instalação (carga), sendo este um fator que limita a aplicabilidade do método. Desta forma, se determina o nível de emissão do desequilíbrio através da diferença entre os fasores de desequilíbrio, calculados pelo método das componentes simétricas, após e antes da conexão da carga, conforme mostrado na Equação 4.7.

$$|FD\%_{carga}| = |FD\%_{pós} - FD\%_{pré}| \quad (4.7)$$

Onde:

- $FD\%_{carga}$ é o fasor do desequilíbrio referente a carga conectada;
- $FD\%_{pós}$ é o fasor do desequilíbrio referente ao instante após a conexão da carga;
- $FD\%_{pré}$ é o fasor do desequilíbrio referente ao instante antes da conexão da carga.

O método do fluxo de potência propõe executar os fluxos de potência de sequência positiva, negativa e zero, em geral, empregando o método de Newton-Raphson ou o método de Gauss-Seidel, visando associar a tensão de sequência

negativa ao desequilíbrio de tensão. A análise é então feita a partir do fluxo de potência ativa de sequência negativa no ponto de acoplamento da carga, de modo que se tal grandeza for negativa, afirma-se que a carga fornece tal potência para o sistema. Desta forma, permite-se identificar a origem dominante do desequilíbrio (LACERDA ARÃO, 2014).

Um outro método utiliza o conceito de corrente conforme e não conforme apresentado em (SRINIVASAN e JUTRAS, 1998), porém neste trabalho não se entrará no mérito de como são determinadas tais correntes. De modo geral, assume-se que a corrente demandada pela carga é composta pela corrente conforme, responsável por toda a potência de sequência positiva, e pela corrente não conforme, dada pela diferença entre a corrente total e a corrente conforme. Inerente a definição, apenas a fonte pode causar alteração na componente de sequência positiva, logo a corrente não conforme possui apenas as componentes de sequência negativa e zero. Assim, se a carga altera a forma de onda das tensões, ela drenará corrente conforme e não conforme, porém se a carga estiver equilibrada ela drenará apenas corrente conforme.

3 COMPENSADOR DE DESEQUILÍBRIOS

Conforme já mencionado, este trabalho representa um estudo feito sobre a aplicação do compensador dinâmico de desequilíbrio apresentado em (DE OLIVEIRA, 2018). Assim, os itens a seguir visam explicar de modo sucinto o funcionamento do dispositivo aplicado na referida dissertação, a sua metodologia de desenvolvimento e os modos de sua implementação.

3.1 Filosofia Do Compensador

Via de regra, os compensadores de desequilíbrio, sejam estáticos ou dinâmicos, visam corrigir o desequilíbrio causado por cargas desbalanceadas, independentemente se são monofásicas, bifásicas ou trifásicas. Tais dispositivos são conectados no barramento da carga e são concebidos visando que a fonte supridora alimente um conjunto equilibrado, ou seja, em termos práticos, a configuração conjunta do compensador e da carga desequilibrada, será vista pela fonte como uma carga balanceada.

Isso é possível pois o compensador é dimensionado de modo a gerar correntes de sequência negativa de mesmo módulo que aquelas geradas pela carga desequilibrada, porém em oposição de fase, ou seja, defasadas em 180° . Sendo o compensador passivo composto por indutores e capacitores, é possível fazer com que tais dispositivos, além de atuarem sobre o desequilíbrio da carga, sejam capazes de alterar o fator de potência visto pela fonte, sendo tal funcionalidade definida como parâmetro de projeto.

Assim, como se pode observar, o compensador busca corrigir o desequilíbrio causado pela carga e não aquele causado pela rede supridora, fazendo-se necessário então o motivo de estudo deste trabalho.

3.2 Especificação Dos Parâmetros Do Compensador

Neste tópico será tratado o compensador como sendo estático, uma vez que sua parametrização é princípio fundamental do compensador dinâmico.

Inicialmente assume-se que a rede supridora é equilibrada, ou seja, as tensões de linhas podem ser descritas conforme mostrado na Equação 5.1.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \cdot V \angle 0^\circ \\ \sqrt{3} \cdot V \angle -120^\circ \\ \sqrt{3} \cdot V \angle 120^\circ \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Esta fonte descrita, alimenta então as cargas desequilibradas, que podem ser representadas por suas admitâncias equivalentes, como indicado na Figura 2.

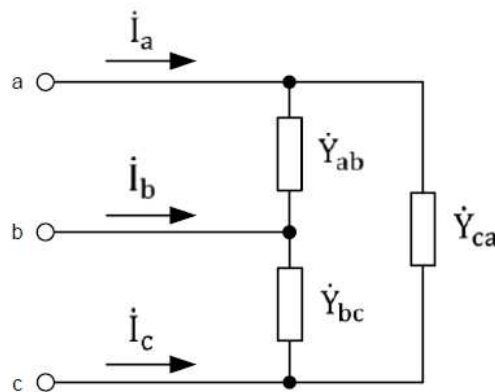


Figura 2 - Representação da carga desequilibrada (DE OLIVEIRA, 2018)

O conjunto de correntes trifásicas representadas na Figura 2 são desbalanceadas, devido às características da carga. Entretanto, almejando que tais correntes tornem equilibradas, insere-se, junto à carga, o compensador, que também

pode ser representado por admitâncias. Visto que o compensador não é dimensionado para haver consumo de potência ativa, o mesmo pode ser representado apenas por susceptâncias, desprezando as perdas resistivas nos elementos passivos, como ilustrado na Figura 3.

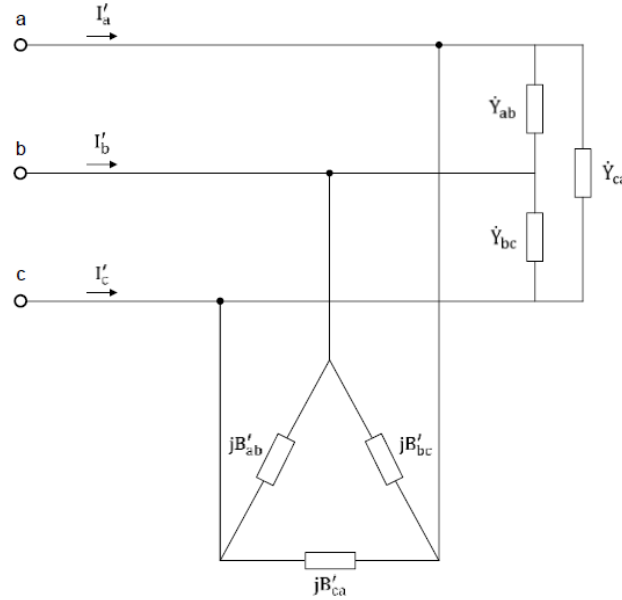


Figura 3 - Representação do conjunto carga e compensador dinâmico (DE OLIVEIRA, 2018)

Assim sendo, como já dito, espera-se que as correntes que alimentam o conjunto carga e compensador, sejam equilibradas, de modo que as mesmas possam ser descritas conforme as Equações 5.2, 5.3 e 5.4.

$$\dot{I}'_a = (\dot{Y}_{ab} + jB'_{ab})\dot{V}_{ab} - (\dot{Y}_{ca} + jB'_{ca})\dot{V}_{ca} \quad (5.2)$$

$$\dot{I}'_b = (\dot{Y}_{bc} + jB'_{bc})\dot{V}_{bc} - (\dot{Y}_{ab} + jB'_{ab})\dot{V}_{ab} \quad (5.3)$$

$$\dot{I}'_c = (\dot{Y}_{ca} + jB'_{ca})\dot{V}_{ca} - (\dot{Y}_{bc} + jB'_{bc})\dot{V}_{bc} \quad (5.4)$$

Onde:

- B'_{ab} , B'_{bc} e B'_{ca} – susceptâncias do compensador;
- $\dot{Y}_{ab}$, $\dot{Y}_{bc}$ e $\dot{Y}_{ca}$ – admitâncias equivalentes da carga.

Descrevendo agora as correntes em termos das condutâncias e susceptâncias da carga, e substituindo os valores das tensões de linha, resulta-se nas Equações 5.5, 5.6 e 5.7.

$$\dot{I}'_a = [G_{ab} + j(B'_{ab} + B_{ab})]\sqrt{3}V\angle 0^\circ - [G_{ca} + j(B'_{ca} + B_{ca})]\sqrt{3}V\angle 120^\circ \quad (5.5)$$

$$\dot{I}'_b = [G_{bc} + j(B'_{bc} + B_{bc})]\sqrt{3}V\angle -120^\circ - [G_{ab} + j(B'_{ab} + B_{ab})]\sqrt{3}V\angle 0^\circ \quad (5.6)$$

$$\dot{I}'_c = [G_{ca} + j(B'_{ca} + B_{ca})]\sqrt{3}V\angle 120^\circ - [G_{bc} + j(B'_{bc} + B_{bc})]\sqrt{3}V\angle -120^\circ \quad (5.7)$$

Fazendo a consideração que a carga esteja conectada em delta, é possível determinar a potência ativa antes e depois da compensação, como mostra as Equações 5.8 e 5.9.

$$\text{Potência Ativa (sem compensação)} = (\sqrt{3}V)^2 [G_{ab} + G_{bc} + G_{ca}] \quad (5.8)$$

$$\text{Potência Ativa (com compensação)} = (\sqrt{3}V)^2 [G_{eq}] \quad (5.9)$$

Onde:

- G_{eq} – condutância equivalente da associação carga e compensador.

Nota-se que ambas expressões devem resultar no mesmo valor, uma vez que, como já ressaltado, o compensador não contribui ou consome potência ativa. Além disso, as condutâncias entre as fases podem ser representadas por um valor equivalente após a compensação, uma vez que se assume que o sistema como um todo (rede, compensador e carga) é equilibrado.

A partir da equação da potência ativa, é possível determinar o módulo das correntes de linha, agora equilibradas, de acordo com a Equação 5.11.

$$3VI \cos \phi = (\sqrt{3}V)^2 [G_{eq}] \quad (5.10)$$

$$I = \frac{V \cdot G_{eq}}{\cos \phi} \quad \text{ou} \quad I = V \cdot G_{eq} \sqrt{1 + (\tan \phi)^2} \quad (5.11)$$

Onde:

- ϕ – ângulo do fator de potência desejado após a inserção do compensador;
- V – módulo da tensão fase-neutro;
- I – módulo da corrente de linha.

Assim, substituindo a Equação 5.11 nas expressões 5.5, 5.6 e 5.7 as quais descrevem as correntes de linha do sistema, e fazendo algumas manipulações matemáticas é possível determinar os parâmetros desejados para a construção do compensador.

$$B'_{ab} = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3}} [-\sqrt{3} - \tan \phi] + \frac{2}{\sqrt{3}} G_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} G_{bc} - B_{ab} \quad (5.12)$$

$$B'_{bc} = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3}} [-\sqrt{3} - \tan \phi] + \frac{2}{\sqrt{3}} G_{ab} + \frac{1}{\sqrt{3}} G_{bc} - B_{bc} \quad (5.13)$$

$$B'_{ca} = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3}} [-\sqrt{3} - \tan \phi] + \frac{2}{\sqrt{3}} G_{ab} + \frac{1}{\sqrt{3}} G_{ca} - B_{ca} \quad (5.14)$$

As expressões acima também podem ser reescritas de modo a relacionar as potências reativas com os parâmetros de potência ativa e reativa da carga, conforme

as Equações 5.15, 5.16 e 5.17. Ressalta-se que valores positivos correspondem a implementação de capacitores e, obviamente, os valores negativos são atrelados aos reatores.

$$Q'_{ab} = \left(-\frac{1}{3}\tan\phi\right)P_{ab} + \left(\frac{-\sqrt{3}-\tan\phi}{3}\right)P_{bc} + \left(\frac{\sqrt{3}-\tan\phi}{3}\right)P_{ca} - Q_{ab} \quad (5.15)$$

$$Q'_{bc} = \left(\frac{\sqrt{3}-\tan\phi}{3}\right)P_{ab} + \left(-\frac{1}{3}\tan\phi\right)P_{bc} + \left(\frac{-\sqrt{3}-\tan\phi}{3}\right)P_{ca} - Q_{bc} \quad (5.16)$$

$$Q'_{ca} = \left(\frac{-\sqrt{3}-\tan\phi}{3}\right)P_{ab} + \left(\frac{\sqrt{3}-\tan\phi}{3}\right)P_{bc} + \left(-\frac{1}{3}\tan\phi\right)P_{ca} - Q_{ca} \quad (5.17)$$

Onde:

- Q'_{ab} , Q'_{bc} e Q'_{ca} – potências reativas entre fases referentes ao compensador;
- P_{ab} , P_{bc} e P_{ca} – potências ativas entre fases referentes à carga;
- Q_{ab} , Q_{bc} e Q_{ca} – potências reativas entre fases referentes à carga.

3.3 Compensação Dinâmica

O Item anterior descreve todo o processo de como dimensionar o compensador a partir de grandezas que podem ser obtidas através da carga desequilibrada. Entretanto, ao seguir tal metodologia, estar-se-á projetando um compensador que atue em conjunto com uma carga que, apesar de ser desequilibrada, é estática e invariável no tempo.

Na maioria das ocasiões práticas, as unidades consumidoras conectadas ao sistema apresentam dinâmicas variadas ao longo de tempo, portanto implica-se que a atuação do compensador acompanhe as variações apresentadas. Devido a esta necessidade, desenvolveu-se em (DE OLIVEIRA, 2018) uma estratégia para que a compensação dinâmica seja realizada, a qual será aqui exposta.

A princípio, a compensação dinâmica pode ser realizada utilizando dispositivos mecânicos, como disjuntores, ou chaves eletrônicas, onde ambos exercerão a mesma funcionalidade, que é estabelecer níveis de inserção dos elementos passivos do compensador na rede. Contudo, por razões operacionais, como elevado tempo de resposta, maior necessidade de manutenção devido principalmente a desgastes físicos e oferecimento de uma estratégia para variações discretas, os dispositivos mecânicos são preteridos em relação as chaves eletrônicas neste tipo de operação.

Visando contornar as limitações, uma das tecnologias usualmente empregadas como chaves eletrônicas são os chamados tiristores. Estes dispositivos são utilizados em aplicações como reatores controlados por tiristores (RCT) e capacitores chaveados por tiristores (CCT) (ANTENOR POMILIO e MAURER DECKMANN, 2009), as quais apresentam funcionalidades adequadas à implementação do compensador dinâmico.

O uso destas tecnologias empregadas no compensador de desequilíbrio dinâmico deve ser feito de maneira coordenada, de modo que:

- O reator será visto pelo sistema supridor de energia como uma susceptância variável. Isso será possível devido ao controle do instante de chaveamento do tiristor, permitindo que o reator seja, fisicamente, um dispositivo de grandeza fixa;
- O capacitor possuirá valor fixo, entretanto o mesmo será apenas chaveado e não controlado como no caso dos reatores, apresentando-se de modo conectado ou desconectado no sistema.

A Figura 4 mostra o arranjo físico do compensador dinâmico. Conforme equacionamento no Item 5.2, se faz necessário a implementação por fase tanto de capacitores como de reatores.

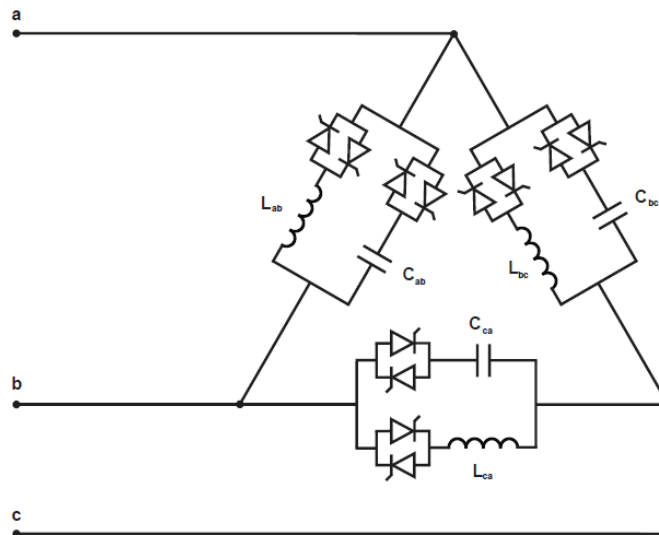


Figura 4 - Elementos que compõem o compensador dinâmico (DE OLIVEIRA, 2018)

O chaveamento dos capacitores deverá ser feito sempre com o ângulo de disparo igual a 90° , a fim de se permitir que o mesmo não ocasione transitórios relevantes no momento de sua inserção. Desta forma, como já ressaltado, os

capacitores terão apenas dois modos de operação, estando conectados ou não no sistema. Já o ângulo de disparo dos reatores será controlado, devendo este estar entre 90° e 180° . A mudança no ângulo de disparo permite alterar o valor do reator visto pela rede, de modo que em 90° o reator estará operando com potência nominal e em 180° como se estivesse desconectado.

O fato de se variar o ângulo de disparo no controle do reator implicará no surgimento de correntes não-senoidais. Estas correntes apresentam componentes harmônicas que podem ser nocivas aos sistemas elétricos e seus componentes. Contudo, devido à proposta deste trabalho, não será abordada a questão das causas, efeitos e práticas de mitigação destas correntes harmônicas.

Para o adequado funcionamento do compensador, é necessário saber quais os valores máximos de potência reativa que serão exigidos do dispositivo, de modo que este seja capaz de atuar adequadamente. Sendo assim, uma das primeiras etapas a serem realizadas, ao se desejar implementar tal compensador dinâmico, é executar uma série de medições das potências ativas e reativas consumidas pela carga desequilibrada em questão. Estas medições possibilitarão determinar, através das expressões 5.15, 5.16 e 5.17, quais serão as potências nominais dos conjuntos reativos (reatores e capacitores).

Em situações onde não houver a necessidade de conexão dos valores nominais dos reatores e capacitores, o sistema de controle do dispositivo compensador atuará de acordo com as variações da carga desequilibrada, fazendo com que ocorra a inserção correta dos elementos passivos.

3.4 Sistema de Controle

O sistema de controle implementado em (DE OLIVEIRA, 2018) pode ser entendido a partir do fluxograma contido na Figura 5. Nota-se que o princípio do controle é aplicado separadamente em cada fase.

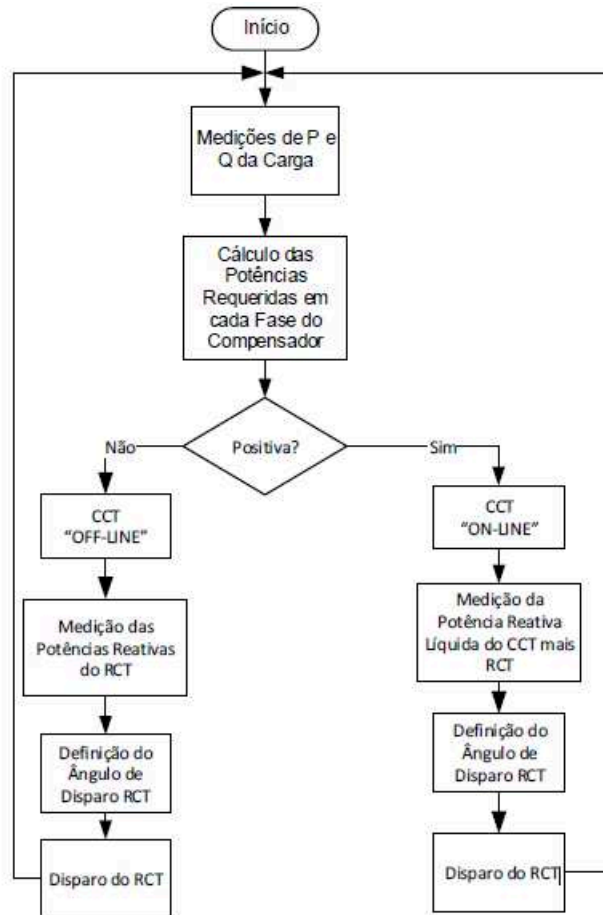


Figura 5 - Fluxograma: lógica de controle (DE OLIVEIRA, 2018)

O controle aplicado é do tipo proporcional-integral (PI), sendo que este basicamente atua na comparação da potência reativa medida com aquela calculada, alterando o ângulo de disparo das chaves, até que o erro se aproxime de zero. Somado ao controlador PI, é inserido um mecanismo de saturação, uma vez que é necessário limitar os valores do ângulo de disparo das chaves dos reatores entre 90° e 180° , como já explicado.

Como pode ser observado na Figura 5, o conjunto CCT apenas é conectado quando o cálculo das potências reativas resulta em um valor positivo. Com isso, o valor necessário a ser atingido pelo compensador, quando a potência requerida é positiva, é obtido através da associação dos conjuntos RCTs e CCTs.

Além do controlador PI e dos mecanismos de saturação, também são implementados junto ao sistema de disparo das chaves o mecanismo chamado *Phase-Locked Loop* (PLL). Este recurso permite realizar o sincronismo do momento de disparo das chaves eletrônicas, de acordo com ângulo das tensões em cada fase (DE OLIVEIRA, 2018).

Todos os desenvolvimentos do sistema de controle implementado na dissertação (DE OLIVEIRA, 2018), descritos neste tópico, foram desenvolvidos utilizando os recursos presentes na plataforma SIMULINK, ferramenta do *software* MATLAB.

4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO COMPENSADOR

4.1 Caracterização Do Sistema Elétrico Simulado

Neste trabalho utilizou-se para estudos o sistema elétrico desenvolvido na dissertação (DE OLIVEIRA, 2018) de modo que, a partir deste, foram aplicadas as modificações cabíveis a fim de observar o comportamento da atuação do compensador dinâmico, quando este é suprido por uma rede elétrica previamente desequilibrada.

O sistema elétrico em questão é formado por cargas equilibradas e desequilibradas as quais apresentam variações no decorrer do tempo, implicando no uso do compensador dinâmico. Tal sistema hipotético apresenta-se com uma topologia radial, o qual supre o conjunto de cargas e o compensador citado, como pode ser observado na Figura 6.

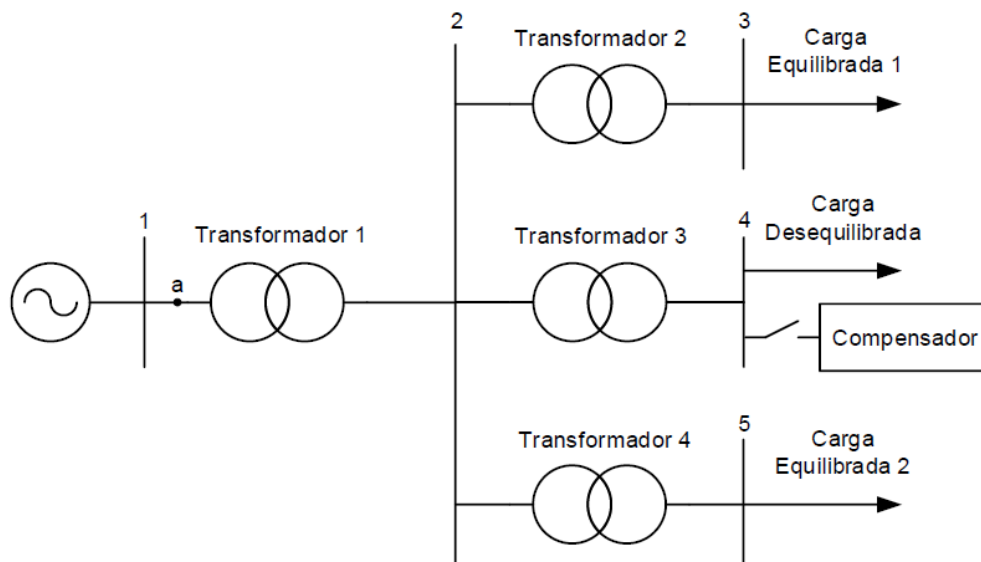


Figura 6 - Diagrama unifilar do sistema elétrico estudado (DE OLIVEIRA, 2018)

As especificações dos elementos de potência que constituem o sistema representado na Figura 6 são descritos na Tabela 1. De modo a facilitar o

entendimento, nesta tabela estão representados apenas os valores nominais do sistema supridor. A inserção do desequilíbrio na fonte será mostrada individualmente nos estudos de casos, apresentados adiante. Ressalta-se também que os valores em percentuais das resistências e reatâncias são referentes às bases dos valores nominais dos próprios dispositivos.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos do elementos do sistema estudado (DE OLIVEIRA, 2018)

Elementos do sistema	Parâmetros
Fonte	Tensão nominal: 69 kV
	Potência de curto-circuito: 100 MVA
Transformador 1	Relação de tensão: 69/13,8 kV
	Potência nominal: 15 MVA
	Resistência: 1%
	Reatância: 6%
	Ligação: Delta/Estrela Aterrado
Transformador 2	Relação de tensão: 13,8/14,16 kV
	Potência nominal: 6 MVA
	Resistência: 1,4%
	Reatância: 8%
	Ligação: Delta/Estrela Aterrado
Transformador 3	Relação de tensão: 13,8/0,44 kV
	Potência nominal: 6 MVA
	Resistência: 1,4%
	Reatância: 8%
	Ligação: Delta/Estrela Aterrado
Transformador 4	Relação de tensão: 13,8/4,16 kV
	Potência nominal: 5 MVA
	Resistência: 1,4%
	Reatância: 8%
	Ligação: Delta/Estrela Aterrado

A simulação da carga desequilibrada foi feita a partir do chaveamento, concebido de modo totalmente aleatório, de diversas cargas dispostas entre as fases. Assim, diversos estágios de carregamento desequilibrado foram inseridos no sistema em questão. O detalhamento referente a estes estágios de carga pode ser visualizado na Tabela 2, onde são identificadas as potências distribuídas pelas fases, e na Tabela 3, a qual revela o tempo de duração dos estágios.

Tabela 2 - Características de potência demandada pela carga desequilibrada (DE OLIVEIRA, 2018)

Estágios	Fases	Potências	
		P (kW)	Q (kVAr)
1	AB	0,0	0,0
	BC	2090,0	600,0
	CA	0,0	0,0
2	AB	0,0	0,0
	BC	3135,0	1195,0
	CA	0,0	0,0
3	AB	1045,0	297,7
	BC	3125,0	1195,5
	CA	1045,0	297,7
4	AB	2090,0	600,0
	BC	0,0	0,0
	CA	1045,0	297,7

Tabela 3 - Tempo dos estágios de carga (DE OLIVEIRA, 2018)

Estágios de Carga	Tempo (segundos)
1	0,0
2	0,6
3	1,0
4	1,3

As cargas equilibradas, conectadas nas barras 3 e 5, como mostrado na Figura 6, possuem as características indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características elétricas das cargas equilibradas (DE OLIVEIRA, 2018)

Cargas	Parâmetros
Carga Equilibrada 1	Tensão Nominal: 4,16 kV
	Potência Ativa: 4,881 MW
	Potência Reativa: 3 MVar
Carga Equilibrada 2	Tensão Nominal: 4,16 kV
	Potência Ativa: 4,09 MW
	Potência Reativa: 1,5 MVar

Por fim, a partir de todas as características dos componentes do sistema, descritos até este momento, foi possível determinar os parâmetros nominais dos reatores e dos bancos de capacitores utilizados na compensação. Para tal, foi feita uma análise, como descrita no Item 5.2, de modo a avaliar as condições mais críticas de compensação exigidas pela carga desequilibrada (DE OLIVEIRA, 2018). Tais valores são expostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Grandezas dos elementos passivos do compensador (DE OLIVEIRA, 2018)

Descrição	Potência Reativa (MVar)
Reator	6
Banco de capacitores	6

4.2 Representação Do Sistema Implementado No MATLAB/SIMULINK

Como já citado, os estudos realizados neste trabalho foram concebidos a partir das simulações computacionais utilizando a plataforma SIMULINK disponível no *software* MATLAB. Basicamente foram usadas as ferramentas de simulação próprias para sistemas de energia, acessíveis através da biblioteca conhecida como *Simscape Power Systems*.

De acordo com a metodologia mencionada no Item 3 deste trabalho, foi modelado o sistema elétrico de duas formas distintas. A primeira se refere às simulações onde o fator de desequilíbrio da fonte é constante durante todo o tempo de simulação, e a segunda forma equivale às simulações onde o fator de desequilíbrio da rede é alterado em uma mesma simulação. As Figuras 7 e 8 mostram como são representados tais sistemas no MATLAB.

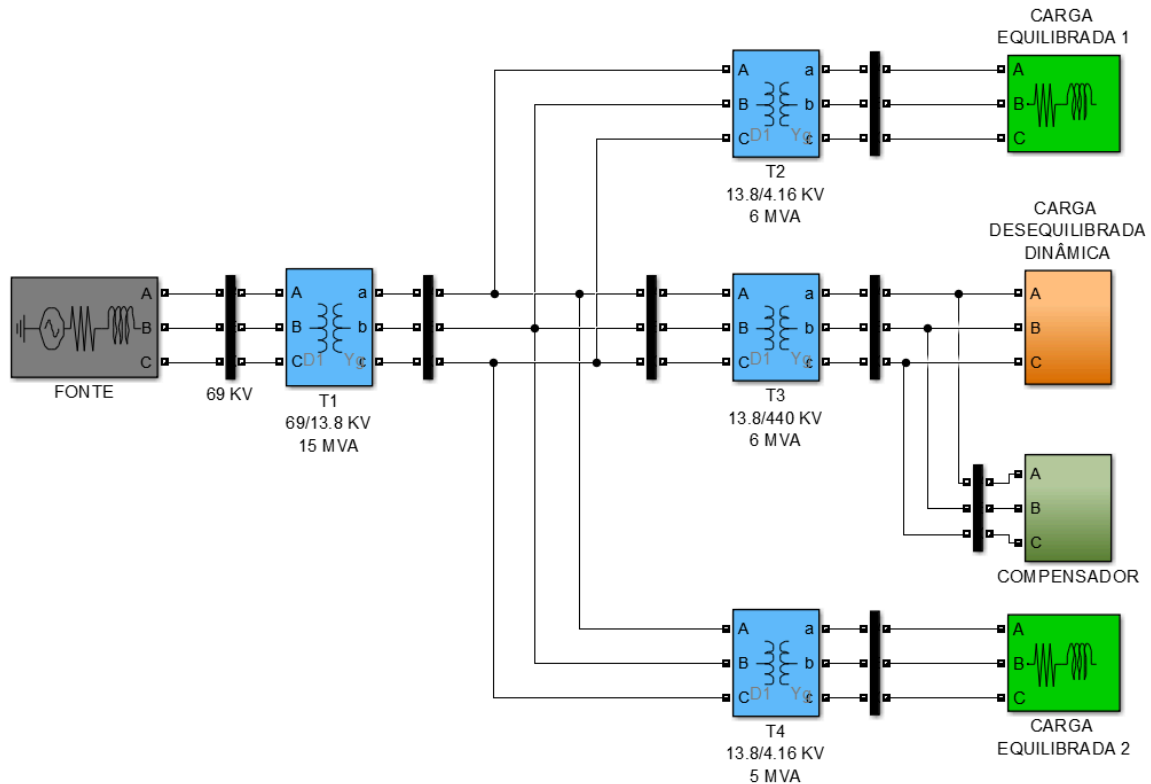


Figura 7 - Sistema elétrico representado no MATLAB, sem alterar a fonte de alimentação (DE OLIVEIRA, 2018)

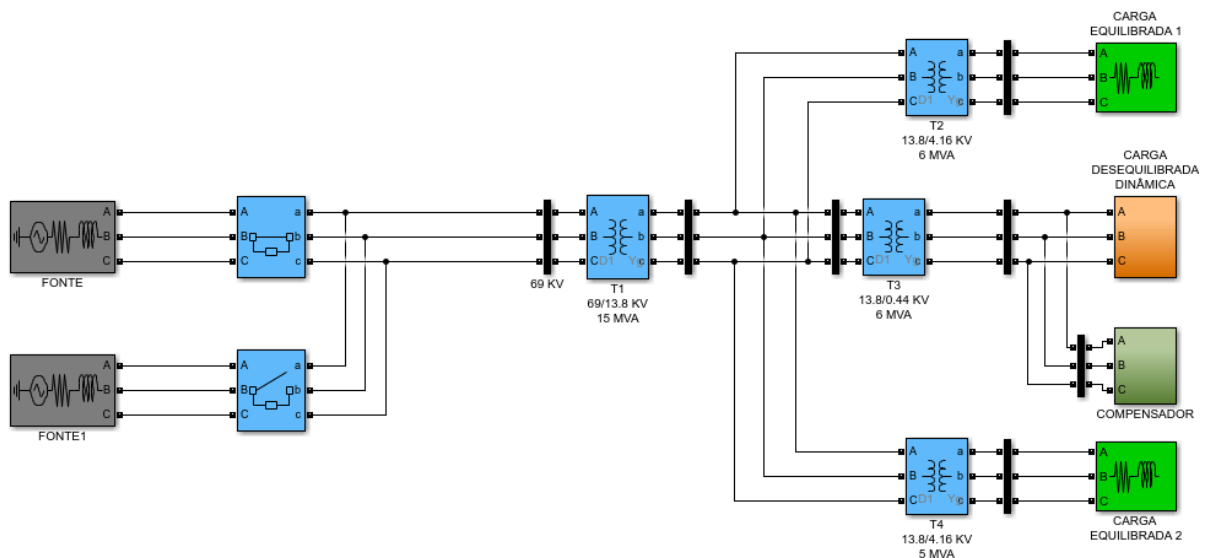


Figura 8 - Sistema elétrico representado no MATLAB: estratégia para variação do fator de desequilíbrio do sistema.

De modo a tornar factível a implementação da mudança do fator de desequilíbrio do sistema supridor em uma mesma simulação, foi utilizado o recurso de chaveamento, semelhante ao modelo feito para a carga desequilibrada, como observado na Figura 8. Em suma, o fator de desequilíbrio é alterado quando se alterna

a fonte supridora do sistema através do chaveamento simultâneo das fontes, algo possível em termos de simulação computacional. É válido ressaltar que as características nominais dos sistemas supridores são as mesmas, onde apenas é modificado o desequilíbrio de tensão.

A representação das cargas desequilibradas, no *software* MATLAB, concebidas através dos chaveamentos, é mostrada na Figura 9.

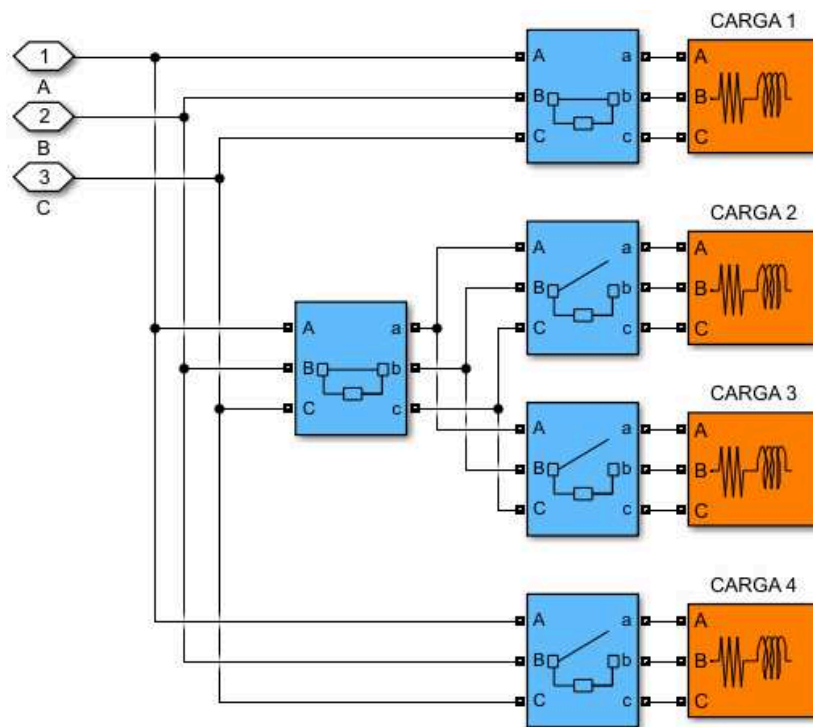


Figura 9 - Representação no MATLAB da carga desequilibrada

Devido a dinâmica de operação mostrada na Tabela 3, os estudos de caso foram realizados utilizando o tempo de simulação equivalente a 1,6 segundos, para as análises feitas a partir do sistema representado na Figura 7, e equivalente a 1,8 segundos, para as simulações realizadas utilizando o sistema mostrado na Figura 8.

4.3 Simulações Computacionais

Os estudos de caso foram realizados simulando diferentes comportamentos da fonte supridora, a partir de três formas de análise:

1. Variando, em situações individuais, o fator de desequilíbrio (FD) da fonte em 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% apenas alterando a magnitude das tensões, mantendo os fasores defasados em 120° .

2. Variando, em situações individuais, o FD da fonte em 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% apenas alterando o defasamento angular das tensões, mantendo as magnitudes iguais em 69 kV.
3. Variando, em uma mesma simulação, o fator de desequilíbrio da fonte de 1,0% para 2,0%, ora alterando apenas o defasamento angular e ora alterando apenas as magnitudes.

Estes valores simulados para o fator de desequilíbrio foram limitados em 2,0% devido a limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017).

A Tabela 6 mostra uma comparação entre os parâmetros atribuídos ao sistema supridor de energia, para as simulações onde ora se mantém apenas as magnitudes das tensões em seus valores nominais, e ora se condiciona apenas os defasamentos angulares entre as fases em seus valores nominais.

Tabela 6 - Condições impostas para o sistema supridor

Estudo de caso	Sistema supridor						FD (%)
	Tensões de Fase (kV)			Ângulo de Fase (graus)			
	Va	Vb	Vc	θ_a	θ_b	θ_c	
1	69,0000	68,4963	69,6900	0,0000	-120,0000	120,0000	0,5%
2	69,0000	67,3716	69,6900	0,0000	-120,0000	120,0000	1,00%
3	69,0000	66,3297	69,6900	0,0000	-120,0000	120,0000	1,50%
4	69,0000	65,3085	69,6900	0,0000	-120,0000	120,0000	2,00%
5	69,0000	69,0000	69,0000	-1,0000	-120,0000	119,4999	0,5%
6	69,0000	69,0000	69,0000	-1,0000	-120,0000	118,0053	1,00%
7	69,0000	69,0000	69,0000	-1,0000	-120,0000	117,0541	1,50%
8	69,0000	69,0000	69,0000	-1,0000	-120,0000	116,1492	2,00%

Ressalta-se que os valores mostrados na Tabela 6 foram determinados visando obter os níveis de desequilíbrio de tensão identificados na última coluna. Estes valores e aqueles calculados durante as simulações computacionais, como identificados nos Estudos De Caso adiante, foram obtidos utilizando o método das componentes simétricas, conforme modelo de cálculo descrito no item 4.1.1 deste trabalho.

De modo semelhante, a fim de simular a situação onde o nível de desequilíbrio de tensão da fonte de energia se altera dentro de um mesmo período de simulação,

conforme sistema identificado na Figura 8, foram aplicados os parâmetros mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros da alimentação do sistema para simulação da alteração do FD

Estudo de caso	Antes do chaveamento		Depois do chaveamento	
	Tensões de fase	Ângulo de fase	Tensões de fase	Ângulo de fase
9	Va = 69,0000 kV	$\theta_a = 0,0000^\circ$	Va = 69,0000 kV	$\theta_a = 0,0000^\circ$
	Vb = 67,3716 kV	$\theta_b = -120,0000^\circ$	Vb = 65,3085 kV	$\theta_b = -120,0000^\circ$
	Vc = 69,6900 kV	$\theta_c = 120,0000^\circ$	Vc = 69,6900 kV	$\theta_c = 120,0000^\circ$
10	Va = 69,0000 kV	$\theta_a = 1,0000^\circ$	Va = 69,0000 kV	$\theta_a = 1,0000^\circ$
	Vb = 69,0000 kV	$\theta_b = -120,0000^\circ$	Vb = 69,0000 kV	$\theta_b = -120,0000^\circ$
	Vc = 69,0000 kV	$\theta_c = 118,0053^\circ$	Vc = 69,0000 kV	$\theta_c = 116,1492^\circ$

Após descrito o funcionamento do sistema, bem como todos os parâmetros referentes aos elementos que o compõe, os tópicos abaixo mostram os resultados das simulações para cada estudo de caso identificado nas Tabelas 6 e 7.

Todos os resultados das simulações realizadas foram concebidos a partir de análises realizadas sempre no barramento da carga desequilibrada (Barra 4 do sistema mostrado na Figura 6). De modo a facilitar o entendimento, os traçados gráficos foram separados em cores distintas, de modo que:

- a cor azul indica o comportamento quando ainda não há a conexão da carga e do compensador;
- a cor preta indica o comportamento com a presença da carga, porém sem conectar o compensador no barramento;
- a cor vermelha indica o comportamento após a conexão da carga e do compensador.

Ressalta-se novamente que, conforme mostrado na Tabela 3, os estágios de carga são alterados em 0,6, 1 e 1,3 segundos.

4.3.1 Estudo De Caso 1

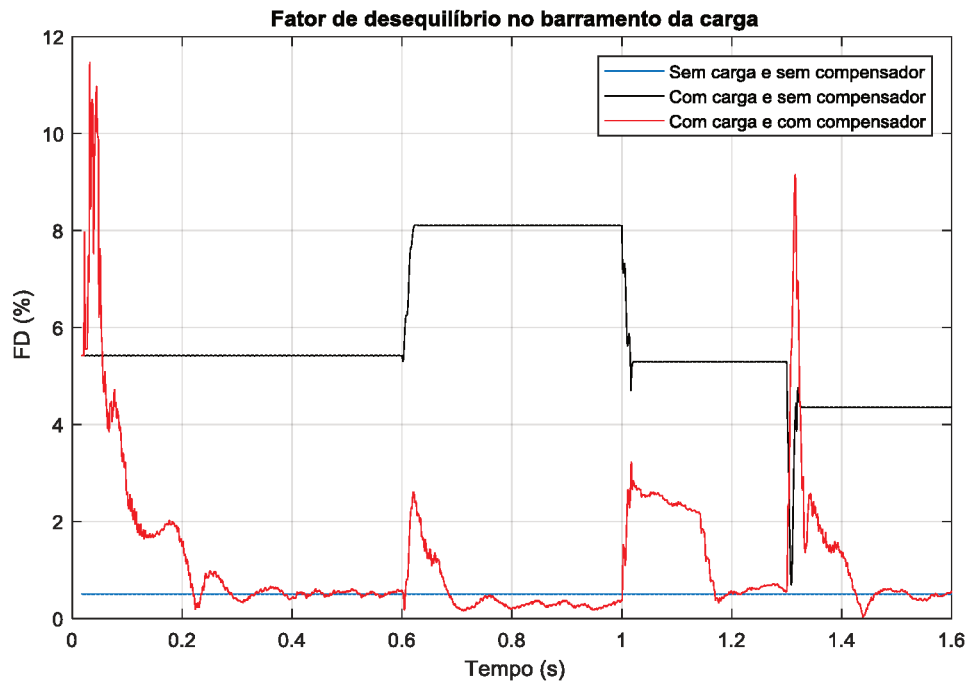


Figura 10 - Simulação para $FD = 0,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma

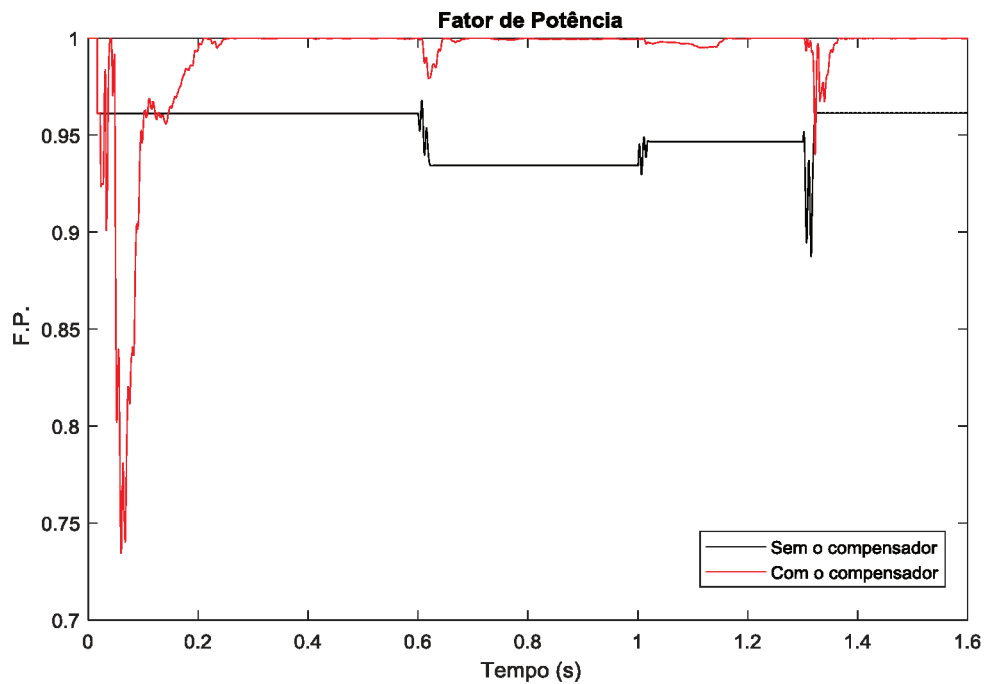


Figura 11 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 0,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma

4.3.2 Estudo De Caso 2

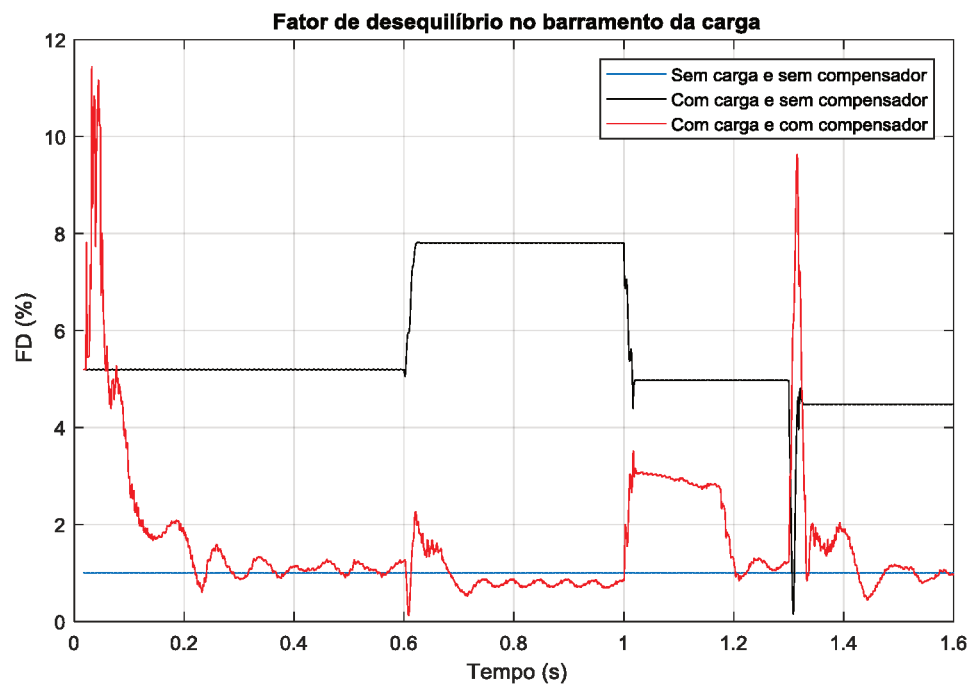


Figura 12 - Simulação para $FD = 1,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma

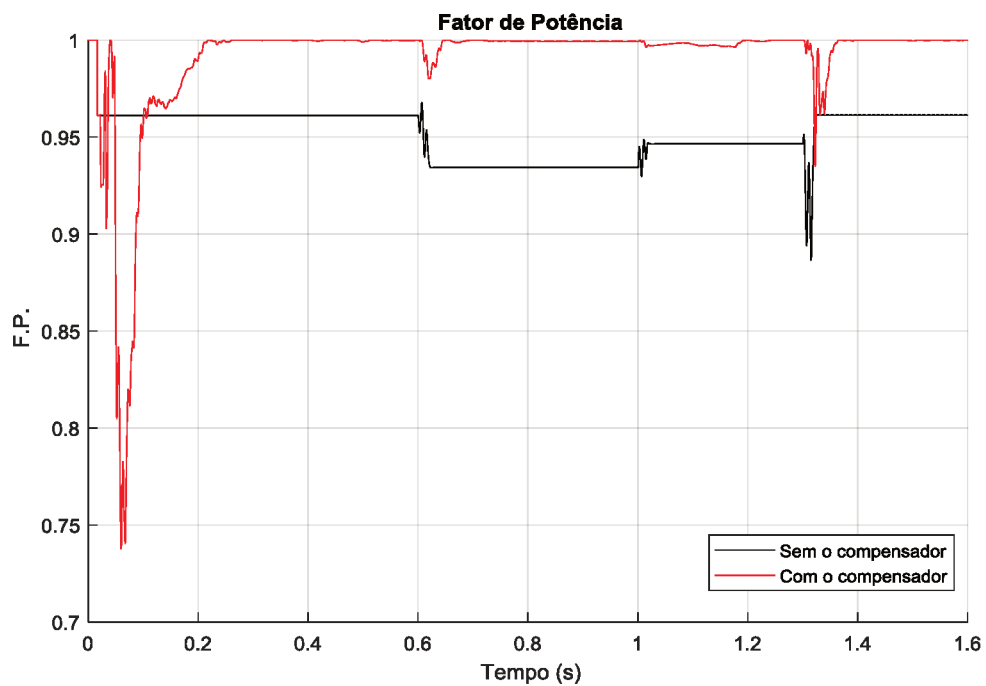


Figura 13 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 1,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma

4.3.3 Estudo De Caso 3

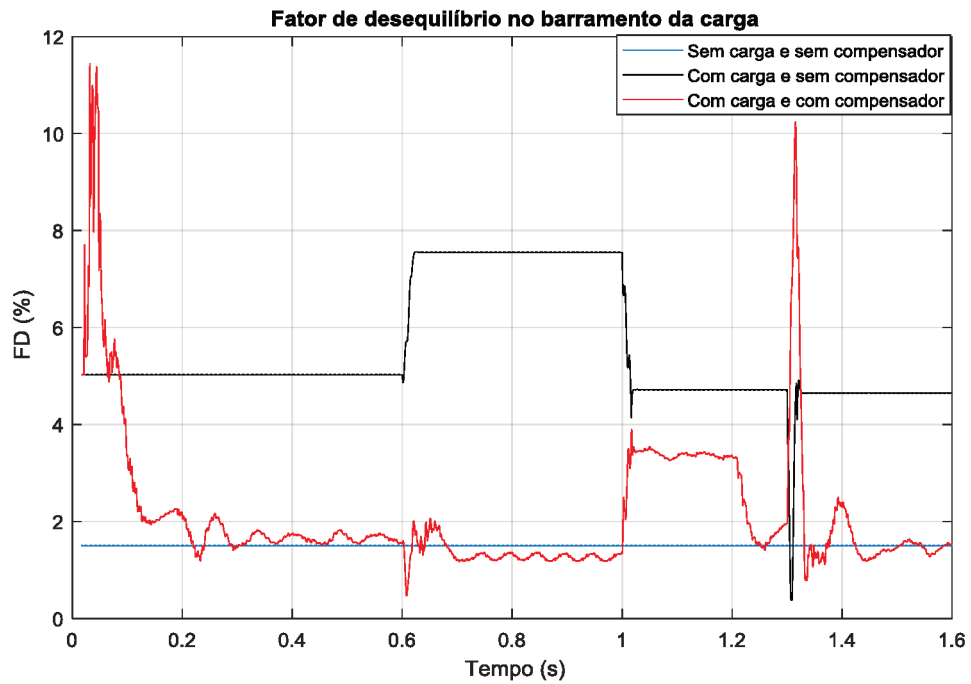


Figura 14 - Simulação para $FD = 1,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma

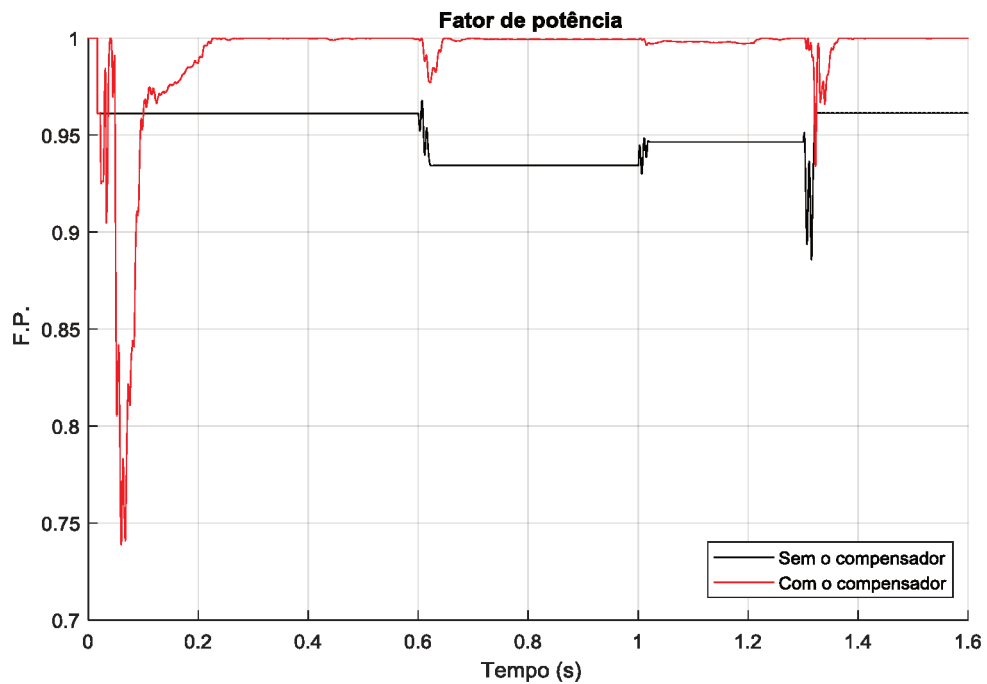


Figura 15 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 1,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma

4.3.4 Estudo De Caso 4

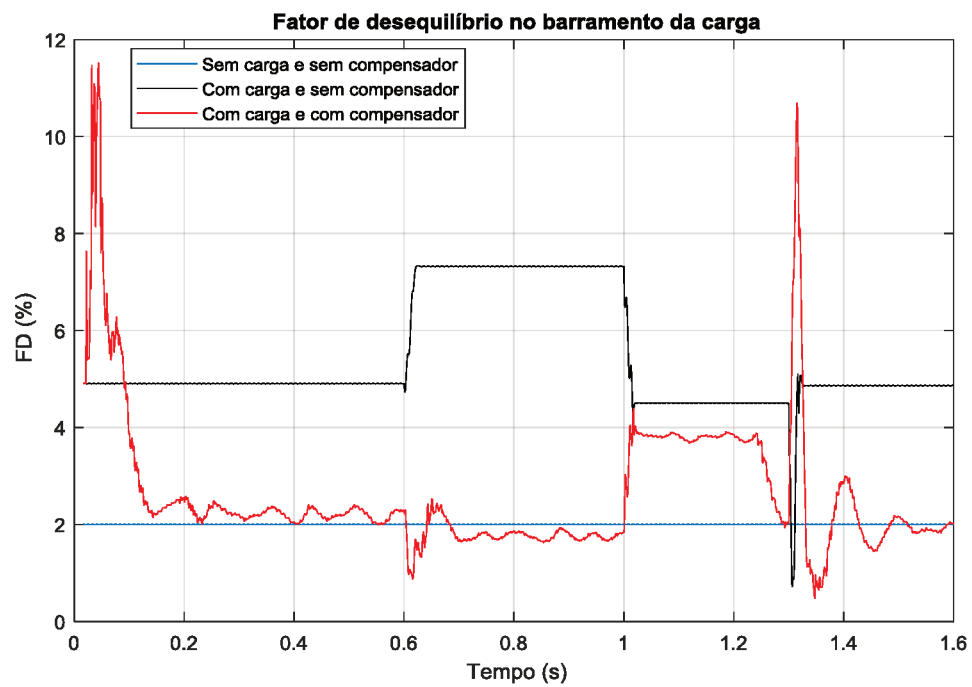


Figura 16 - Simulação para $FD = 2,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma

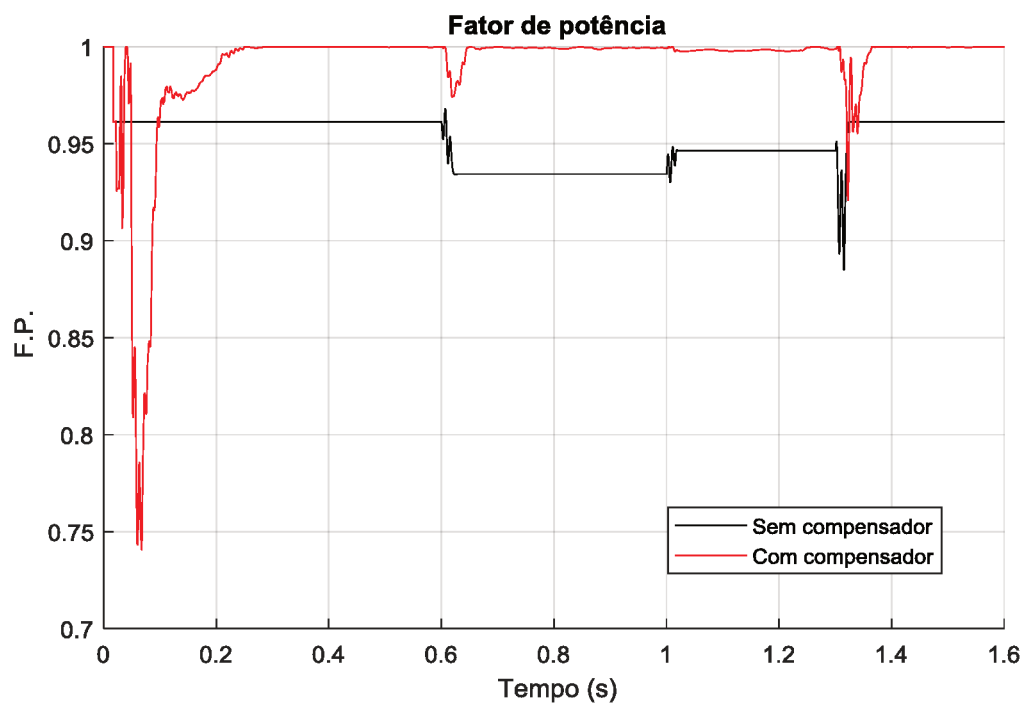


Figura 17 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 2,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas das magnitudes das tensões da mesma

4.3.5 Estudo De Caso 5

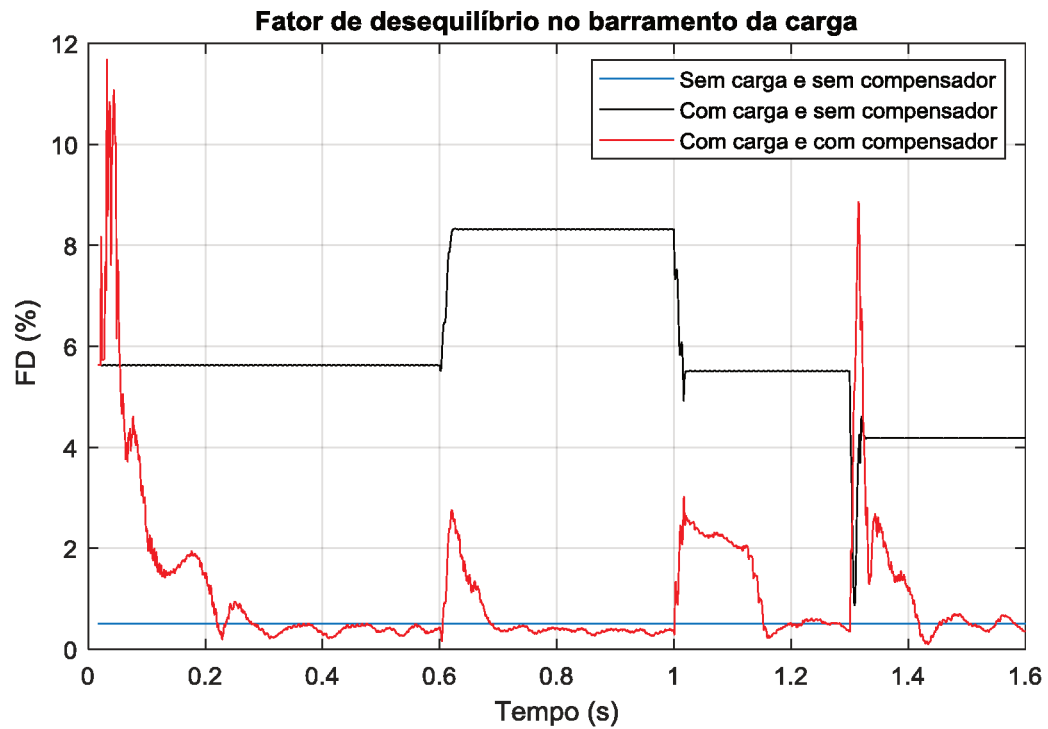


Figura 18 - Simulação para $FD = 0,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma

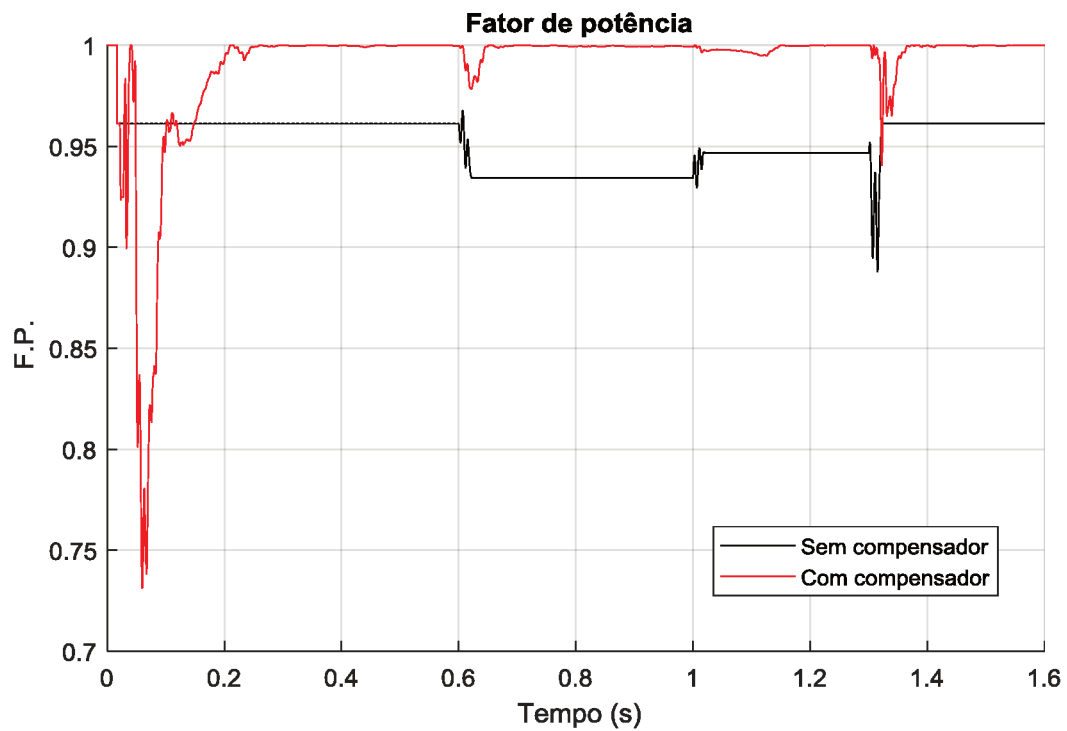


Figura 19 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 0,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma

4.3.6 Estudo De Caso 6

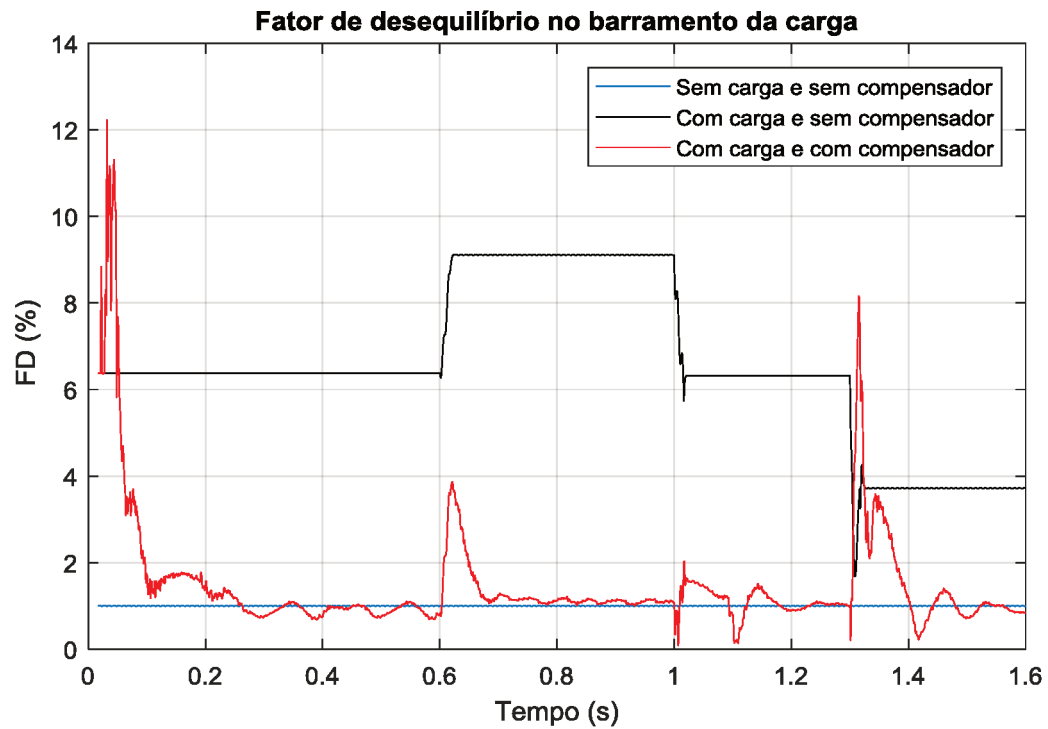


Figura 20 - Simulação para $FD = 1,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma

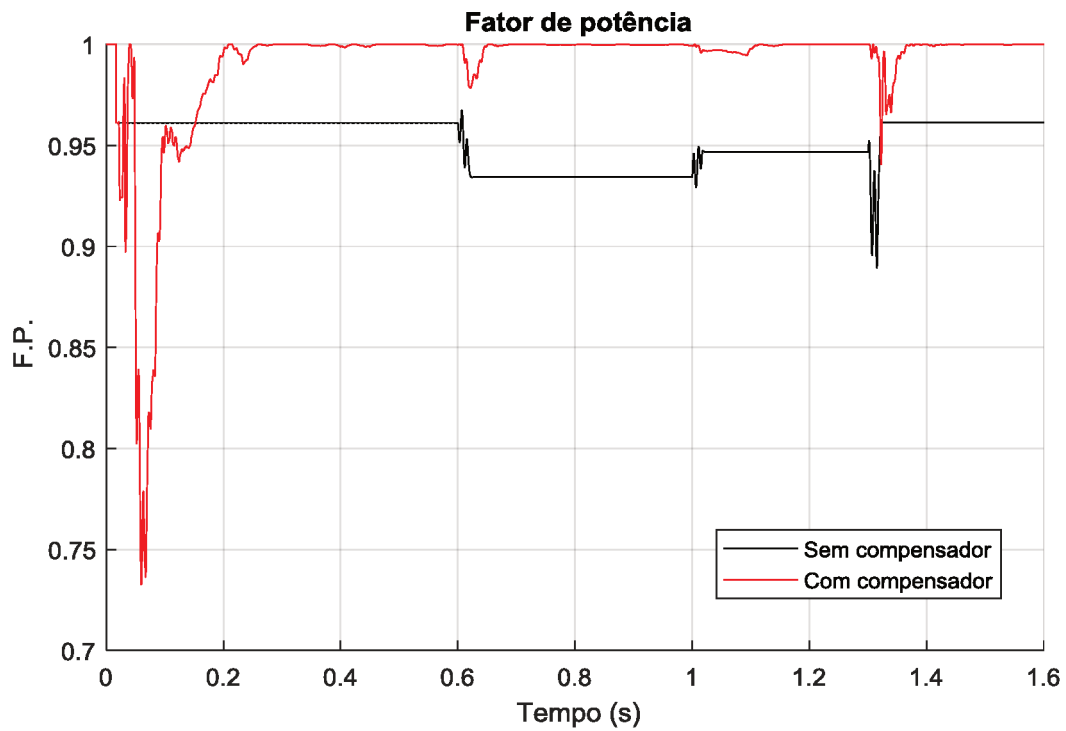


Figura 21 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 1,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma

4.3.7 Estudo De Caso 7

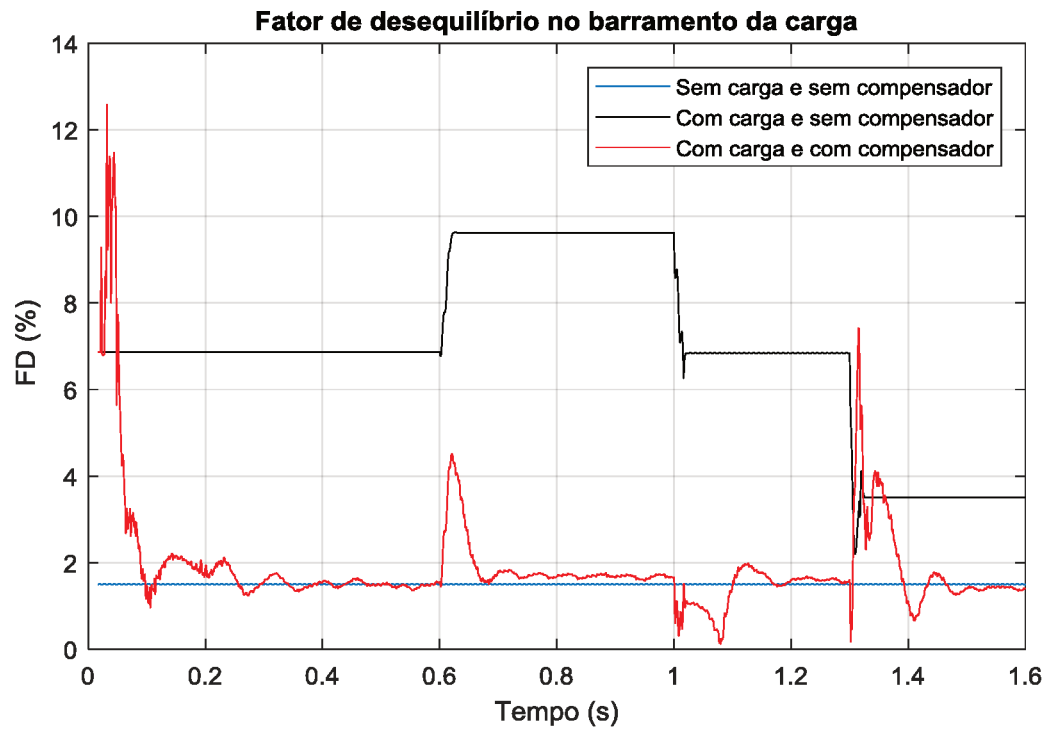


Figura 22 - Simulação para $FD = 1,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma

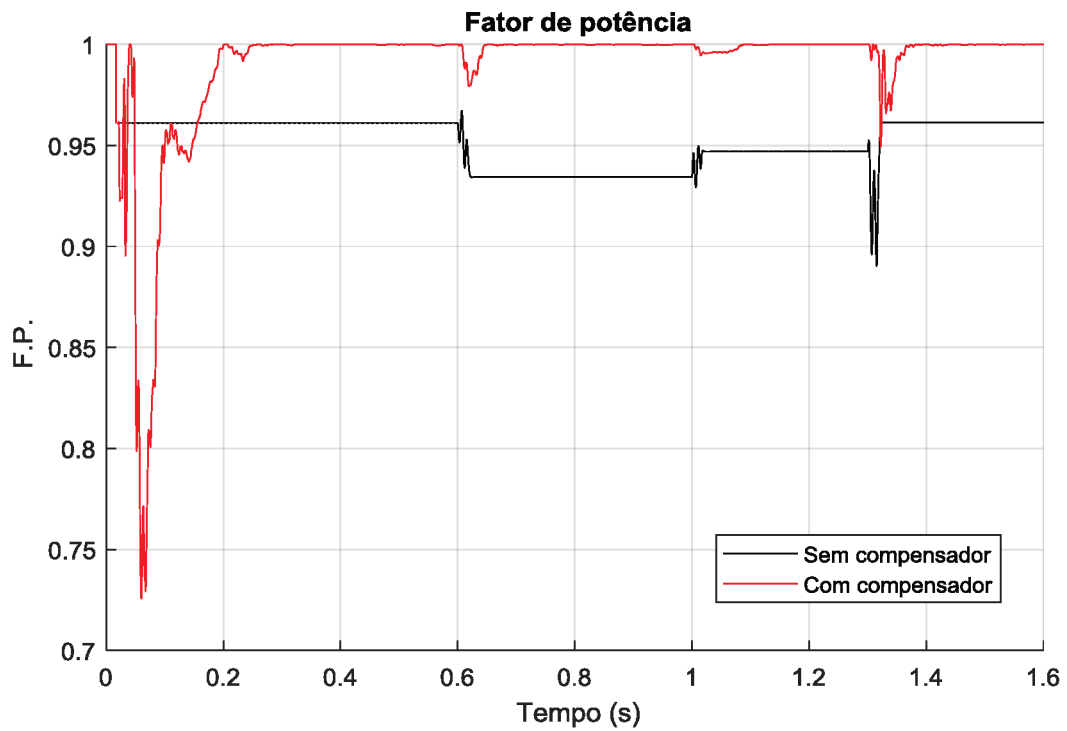


Figura 23 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 1,5\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma

4.3.8 Estudo De Caso 8

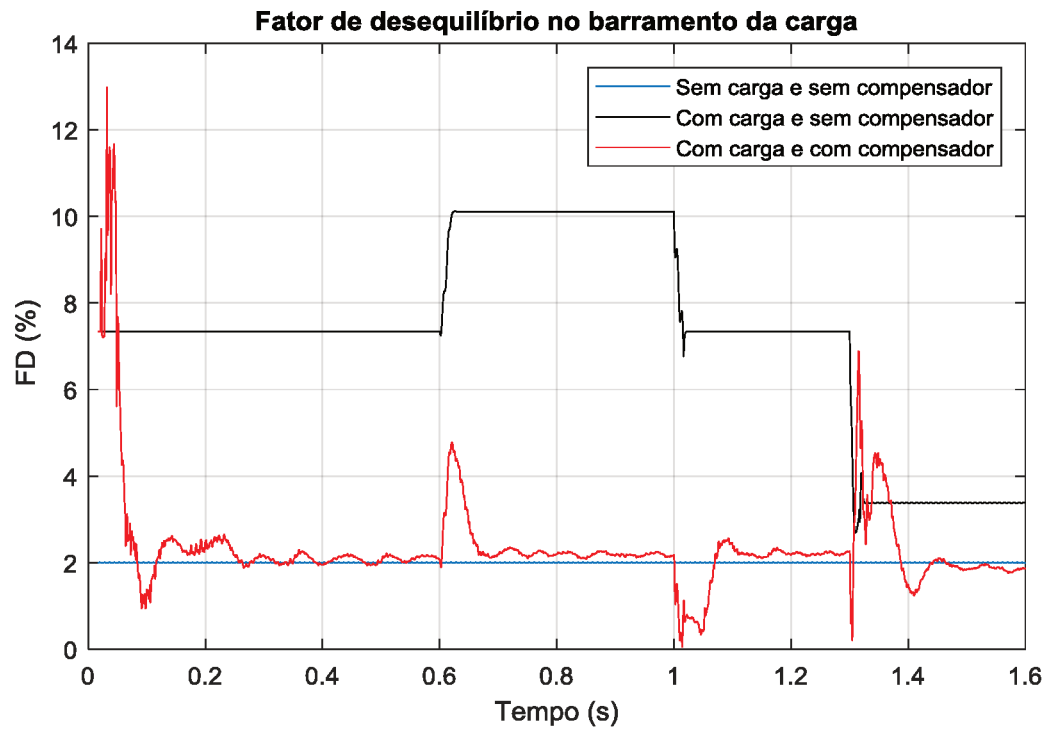


Figura 24 - Simulação para $FD = 2,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma

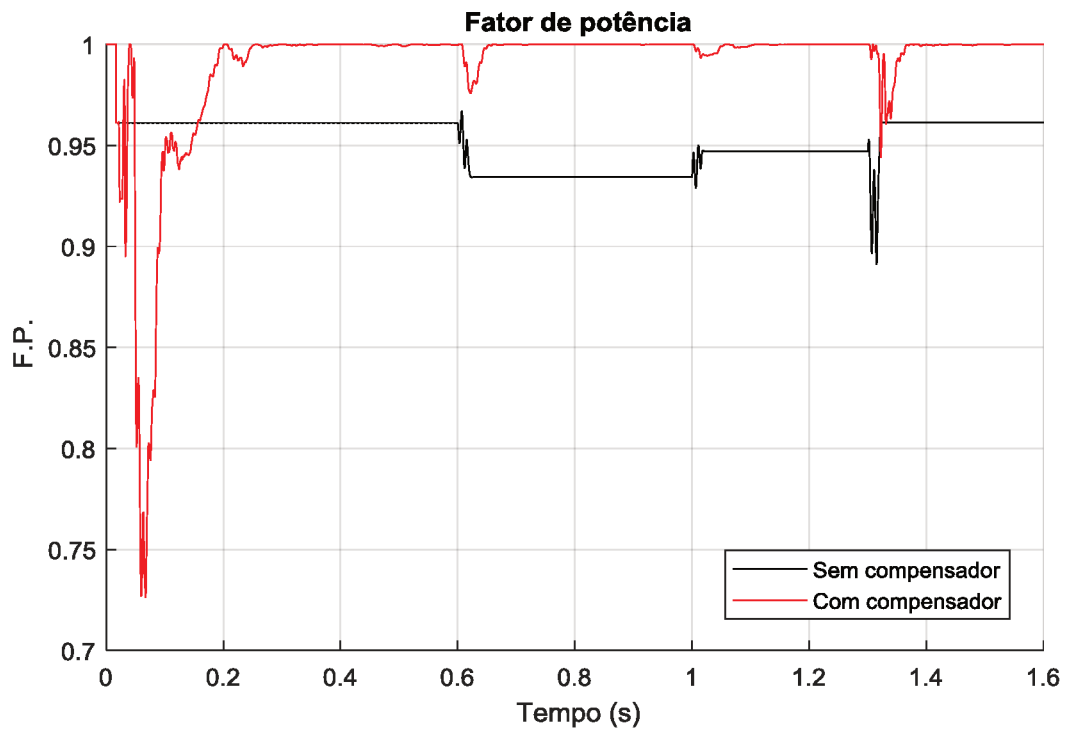


Figura 25 - Fator de potência no barramento da carga, com $FD = 2,0\%$ na fonte supridora, causado pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões da mesma

4.3.9 Estudo De Caso 9

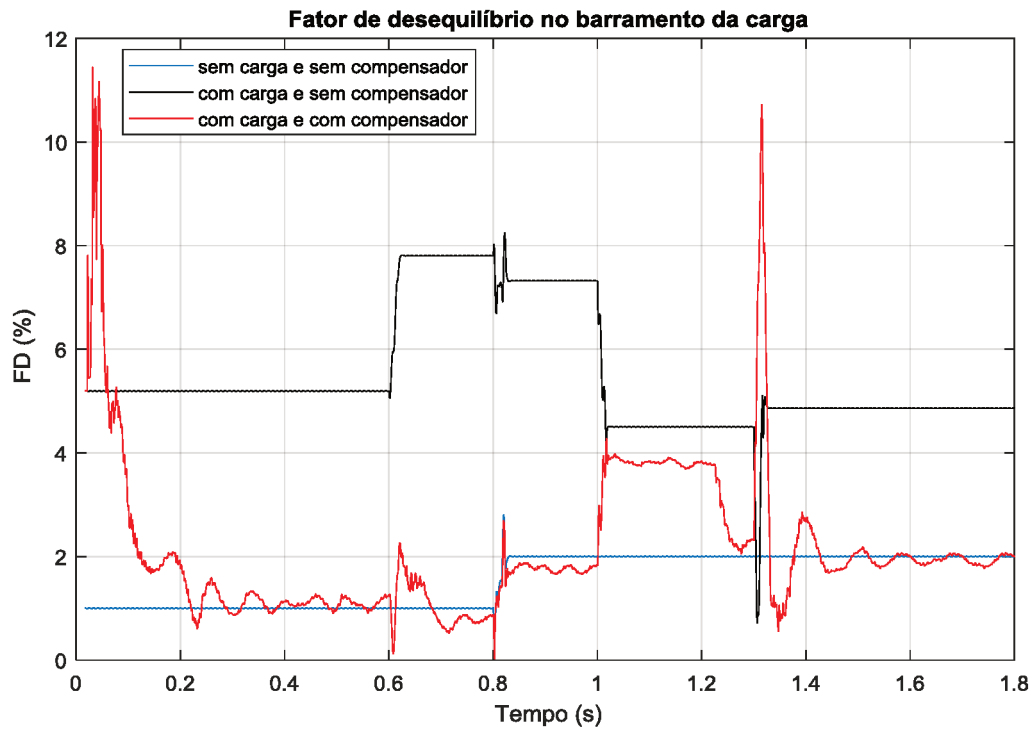


Figura 26 - Níveis de desequilíbrios resultantes da alteração do FD da fonte de 1% para 2%, com tais desequilíbrios causados pela alteração apenas das magnitudes das tensões do sistema supridor

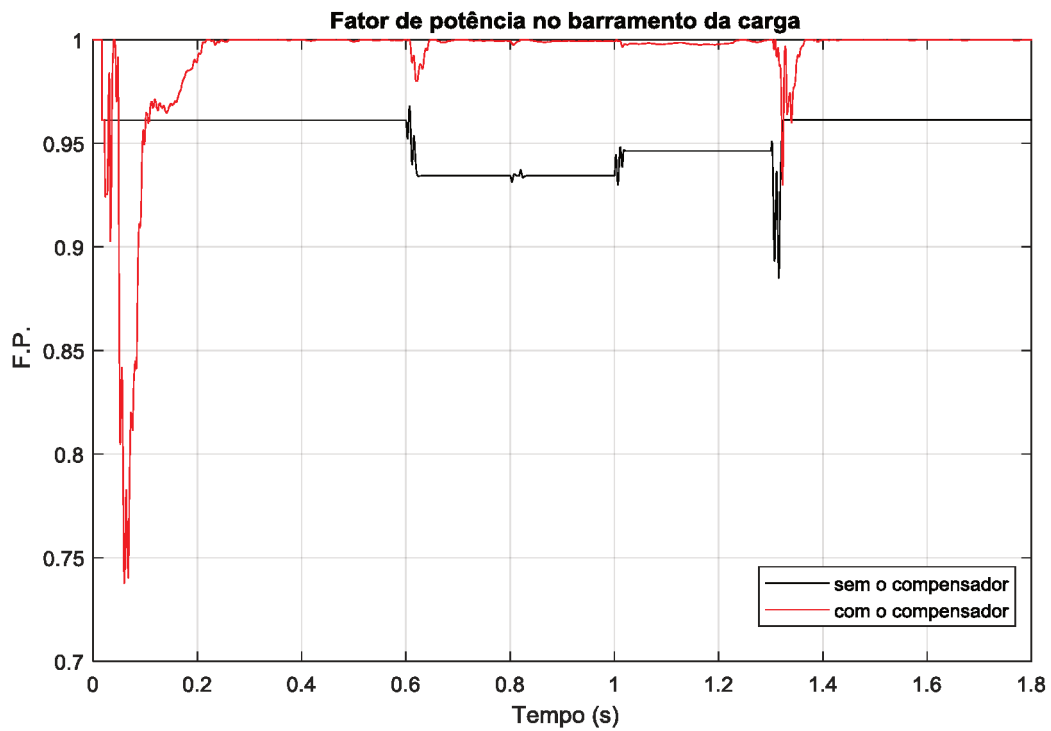


Figura 27 - Fator de potência resultante da alteração do FD da fonte de 1% para 2%, com tais desequilíbrios causados pela alteração apenas das magnitudes das tensões do sistema supridor

4.3.10 Estudo De Caso 10

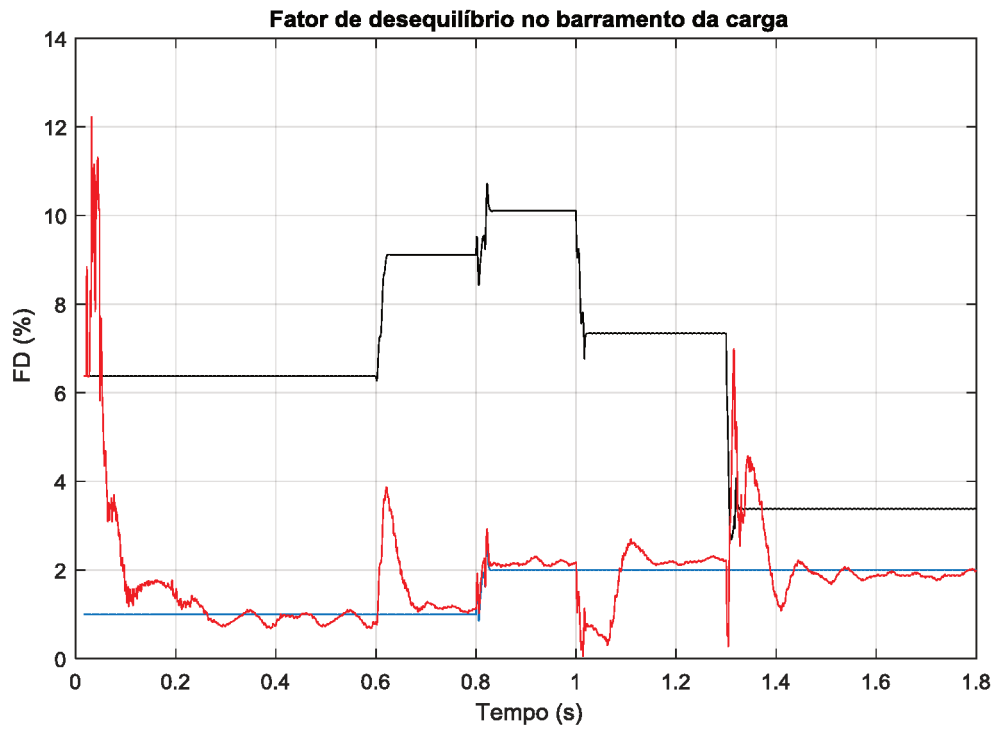


Figura 28 - Níveis de desequilíbrios resultantes da alteração do FD da fonte de 1% para 2%, com tais desequilíbrios causados pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões do sistema supridor

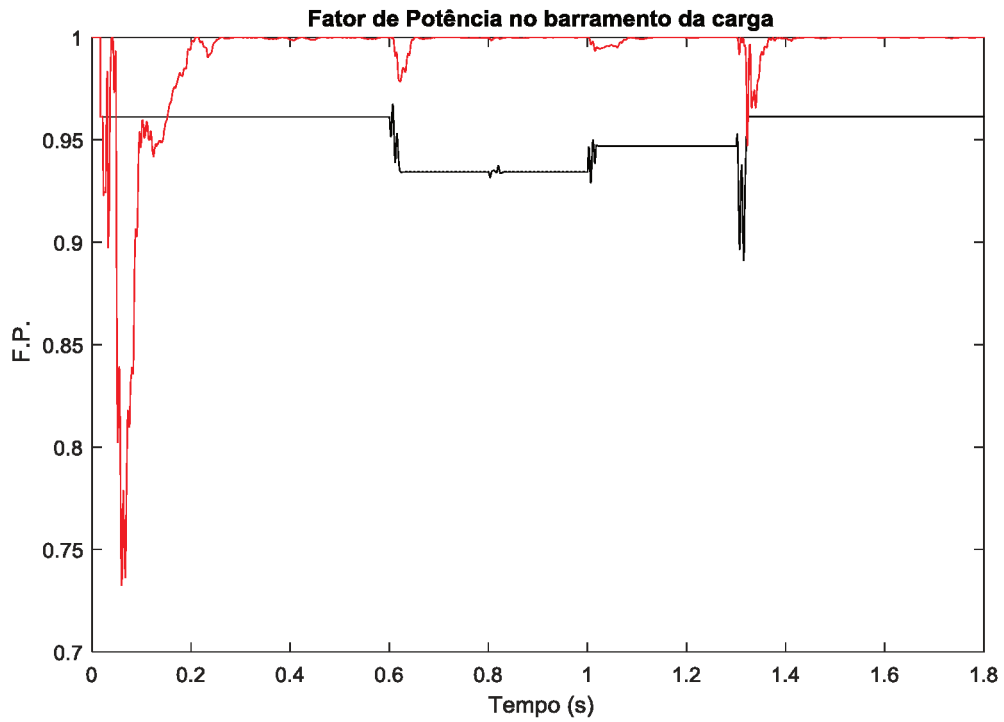


Figura 29 - Níveis de desequilíbrios resultantes da alteração do FD da fonte de 1% para 2%, com tais desequilíbrios causados pela alteração apenas dos ângulos de fase das tensões do sistema supridor

4.4 Análise De Resultados

Para analisar os resultados, obtidos nas simulações realizadas e expostas nos estudos de caso, é válido que se atente novamente ao item 5.2, onde é identificado como é feito o processo de especificação dos parâmetros do compensador. Observa-se que a concepção do dispositivo em questão é feita a partir dos valores das potências medidos na carga. Com isso, algo que, antes da realização das simulações, era passível de se esperar, seria que o compensador atuasse corrigindo o desequilíbrio causado pela carga. Entretanto, não se poderia prever, através do estudo até então realizado em (DE OLIVEIRA, 2018), qual seria a resposta do dispositivo, quando o conjunto carga e compensador fosse suprido por uma fonte previamente desequilibrada.

Ao se analisar as figuras expostas nos estudos de caso, é possível observar algo em comum em todas as simulações: o compensador, exceto em situações transitórias, atua no sistema basicamente corrigindo o efeito causado pela carga. Isso ocorre de modo que o valor do desequilíbrio de tensão na barra analisada passa a oscilar, em regime permanente, em torno do valor que possuía antes do momento da conexão da carga desequilibrada no sistema.

Desta forma, por exemplo, caso fosse realizada uma análise sobre tais perspectivas de arranjo de sistema (rede supridora desbalanceada, carga desequilibrada e compensador dinâmico), em regime permanente ou tendendo a um tempo longo, seria possível determinar o impacto apenas da carga desequilibrada após a sua conexão. Esta situação, permitiria em termos práticos atribuir adequadamente a divisão de responsabilidade entre a concessionária e o consumidor, sobre as causas do desequilíbrio verificado. Com isso, discussões sobre como penalizar de modo seguro os causadores do desequilíbrio de tensão, seriam facilitadas.

Analisando ainda, de modo geral, as simulações apresentadas, o comportamento do fator de potência após a conexão do compensador ao sistema também chama atenção. Como foi especificado durante o processo de dimensionamento do compensador que o fator de potência resultante fosse unitário, é possível observar que, exceto em situações transitórias e mesmo com um sistema supridor previamente desequilibrado, a correção do fator de potência foi bem

executada. Isto confirma a premissa de que tal dispositivo é projetado para atuar sobre a carga em questão, e não sobre problemas da rede.

Observando agora de modo mais específico os estudos de caso 5, 6, 7 e 8, pode-se notar que os transitórios apresentados nas simulações, as quais mostram a variação do fator de desequilíbrio, são mais suaves quando comparados com as simulações dos estudos de caso 1, 2, 3 e 4. Contudo, ao se comparar as simulações referentes ao fator de potência, entre estes mesmos conjuntos de estudos de caso, não se nota diferenças significativas nos transitórios apresentados.

De modo semelhante, ao observar os estudos 9 e 10, é possível notar que mesmo ao alterar repentinamente o fator de desequilíbrio da fonte de energia do sistema, o compensador consegue atuar corrigindo os efeitos causados pela conexão da carga desequilibrada. Além disso, nota-se que os transitórios apresentados na Figura 28 são mais suaves que aqueles mostrados na Figura 26.

Em decorrência destas análises, é possível identificar que os resultados das simulações realizadas nos Estudos de Caso 1, 2, 3, 4 e 9 (onde a causa do desequilíbrio apenas se dá devido aos valores das magnitudes das tensões), não difere em termos práticos, exceto em ocasiões transitórias, dos outros Estudos de Caso (5, 6, 7, 8 e 10), onde o desequilíbrio se dá devido aos valores dos ângulos de fase das tensões.

Por fim, é possível identificar que os transitórios apresentados em todos os estudos de caso apresentam, em alguns momentos, oscilações bruscas. Esta situação ocorre quando há a mudança no comportamento da carga desequilibrada, uma vez que tal ocorrência resulta na necessidade da mudança dos parâmetros do compensador.

4.5 Desafios E Estudos Futuros

Este trabalho, como se pode perceber, traz uma nova contribuição nos âmbitos referentes às atribuições de responsabilidades, quando há a ocorrência de desequilíbrios de tensão. Isso se dá, uma vez que, a partir do uso do modelo do compensador apresentado, é possível determinar em termos concretos a contribuição de determinada instalação no desequilíbrio de tensão global.

Contudo, apesar do dispositivo apresentar uma alternativa emergente bastante interessante na resolução dos problemas de atribuição de responsabilidade, algumas

restrições práticas referentes ao processo de dimensionamento do dispositivo causam certas limitações em situações diversas.

Uma destas limitações se dá no fato de que é necessário se ter um bom conhecimento da carga desequilibrada a qual se deseja compensar, o que, na prática, nem sempre é possível. Este dado é necessário para o estabelecimento de uma faixa de trabalho para compensação reativa do equipamento mitigador.

Outro problema está na necessidade de que tanto a carga quanto o compensador estejam conectados em delta. Além disso, se faz necessário, para o funcionamento adequado do compensador, que as medições de potência demandada pela carga sejam realizadas entre as fases. Estes fatos, trazem importantes limitações práticas, uma vez que, em várias situações, não se tem acesso físico aos terminais das cargas.

Somado a estas questões, o método de funcionamento dos RCTs e CCTs trazem complicações operacionais ao sistema elétrico. Devido à presença de chaves eletrônicas, ocorre de modo inerente o surgimento de correntes harmônicas. Com isso, em certas ocasiões pode se fazer necessário a aplicação de filtros, juntamente com a instalação do compensador, podendo aumentar significativamente o custo de implementação do dispositivo. Este custo, por sua vez, devido tão somente ao fato de se fazer uso destas tecnologias de chaves eletrônicas de potência, pode apresentar, de modo inerente, valores elevados.

Além destes fatores, observa-se que, como mostrado na análise de resultados das simulações, os transitórios apresentados podem representar valores elevados e, em determinadas ocasiões, demoram a atenuar. Esta situação possivelmente poderá ser mitigada com a implementação de técnicas de controle melhor aplicáveis e mais modernas, quando comparado com o modelo utilizado em (DE OLIVEIRA, 2018). Ressalta-se que esta não é uma crítica ao método utilizado, mas sim uma possibilidade de melhoria, uma vez que o modelo implementado apresenta resultado satisfatório, mesmo não tendo sido o enfoque deste trabalho e da dissertação (DE OLIVEIRA, 2018).

Assim, considerando todas estas circunstâncias, tais limitações podem dificultar a implementação deste compensador dinâmico, seja de modo a mitigar os problemas causados pelas cargas desequilibradas ou simplesmente visando facilitar o procedimento de atribuição de responsabilidades entre consumidores e concessionárias. Desta forma, estudos futuros se fazem necessários, a fim de se

buscar solucionar tais problemas, visando reduzir ao máximo estas limitações apresentadas.

Juntamente a isto, uma vertente de pesquisa que pode ser considerada está atrelada ao fato que após a compensação de desequilíbrio da carga, resta apenas o desequilíbrio da própria rede. Isto poderia, a partir de pesquisas adicionais, contribuir com a elaboração de uma metodologia própria de atribuição de responsabilidades por desequilíbrios de tensão em sistemas reais.

5 CONCLUSÃO

A premissa para a realização deste trabalho foi realizar um estudo sobre o comportamento de um sistema elétrico, onde a fonte supridora é desbalanceada e há a presença de um conjunto compensador dinâmico e carga desequilibrada. Como observado no decorrer deste trabalho, os resultados apresentados nos estudos de caso fazem com que seja possível vislumbrar uma outra aplicação para o compensador dinâmico em questão, além da tão somente mitigação dos efeitos de uma carga desequilibrada.

É evidente que o ideal principal em se instalar um compensador dinâmico seja para que este dispositivo atue corrigindo os problemas causados por cargas desequilibradas conectadas ao sistema elétrico. Contudo, diante dos resultados apresentados neste trabalho, nota-se que além de cumprir de modo satisfatório este objetivo, o compensador dinâmico em questão pode também ser aplicado em situações onde o sistema supridor é desbalanceado por natureza. Nesta circunstância de aplicação, o compensador dinâmico consegue corrigir o efeito causado pela carga a qual fora dimensionado para atuar, ao mesmo tempo que possibilita realizar uma análise facilitada de atribuições de responsabilidade entre o consumidor e a concessionária de energia.

Além disso, como pode ser observado no decorrer deste trabalho, nem mesmo os métodos existentes para dividir responsabilidades entre consumidores e concessionárias, são claros. Desta forma, os resultados obtidos neste trabalho possibilitam propor que o modelo de compensador dinâmico estudado, possa contribuir bastante para uma área de estudos ainda não tão explorada.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, W. G.; FREITAS, F. D. **Circuitos Polifásicos**. Brasília: FINATEC, 1995.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. **Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**, 2017.
- ANSI C84.1-2011. **American National Standard - For Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hertz)**, 2011.
- ANTENOR POMILIO, J.; MAURER DECKMANN, S. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. UNICAMP. Campinas. 2009.
- DAVID RODRIGUEZ, A.; MARTINEZ FUENTES, ; JARAMILLO MATTA,. **Comparative analysis between voltage unbalance definitions**. Faculty of Engineering Universidad Distrital Bogotá, Colombia. Bogotá. 2015.
- DE OLIVEIRA, L. T. **Uma proposta para compensação dinâmica de cargas desequilibradas**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFU. Uberlândia, p. 76. 2018.
- FERREIRA FILHO, A. D. L. **Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo de Tensão**. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica) - UNB. Brasília, p. 112. 2008.
- GOUVEIA TEODORO, R. **Metodologia para Compensação de Desequilíbrio em Redes Elétricas**. Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) - UNESP - Ilha Solteira. Ilha Solteira, p. 85. 2005.
- IEC/TR 61000-3-13. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-13: Limits. **Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems**, 2008.
- IEEE STD. 1159. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, 2009.
- LACERDA ARÃO, L. F. **Avaliação Comparativa Entre Métodos Para Atribuição de Responsabilidades Devido ao Desequilíbrio de Tensão**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) - UNB. Brasília, p. 111. 2014.
- MAGALHÃES FEITOSA, E. **Estacionariedade e Peridiocidade do Fator de Desequilíbrio de Tensão em Sistemas de Potência**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) - UNB. Brasília, p. 85. 2009.
- NIZUMA SIMABUKULO, L. A. et al. Energia, Industrialização e Modernidade - História Social. **Fundação Energia e Saneamento**, p. 34.
- NUNES SANTOS, I. **Qualidade da Energia Elétrica - QEE**. Uberlândia: [s.n.], 2018.

OLIVEIRA, L. T.; FILIAGI GREGORY, R. C.; DE OLIVEIRA, J. C. A eficácia dos compensadores de desequilíbrios passivos frente às solicitações dinâmicas de cargas. **XV CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, Uberlândia, 2017.

ONS. Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica. **Submódulo 2.8**, 2016.

PAULILO, G. Desequilíbrios de tensão. In: PAULILO, G. **Qualidade de Energia**. [S.l.]: [s.n.], 2013. Cap. 3, p. 42-48.

SILVA NEVES, M. **Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica: Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFJF. Juíz de Fora, p. 72. 2008.

SRINIVASAN, K.; JUTRAS, R. Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 1, p. 212-217, Janeiro 1998.