

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ADEMIR PAZDZICKI DA SILVA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS ININTERRUPTOS DE ENERGIA ELÉTRICA COM
VOLANTES DE INÉRCIA (UPS) PARA QUALIDADE DE ENERGIA ATUANDO
COMO FILTROS PARA FALTAS DE CURTA DURAÇÃO E COMPENSAÇÃO
DE REATIVOS**

**São Leopoldo
2018**

ADEMIR PAZDZICKI DA SILVA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS ININTERRUPTOS DE ENERGIA ELÉTRICA COM
VOLANTES DE INÉRCIA (UPS) PARA QUALIDADE DE ENERGIA ATUANDO
COMO FILTROS PARA FALTAS DE CURTA DURAÇÃO E COMPENSAÇÃO
DE REATIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica, pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira

São Leopoldo

2018

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas oportunidades que obtive até aqui, incluindo desenvolver e concluir este trabalho, por ter pessoas especiais ao meu lado e nos guardar saúde e proteção.

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, a meus irmãos Solange, Sonia, Marines e Idanir que sempre me incentivaram e em especial aos meus pais, Odemar e Julieta, pela dedicação e empenho que sempre dispensaram para que eu e meus irmãos pudéssemos desenvolver nosso caráter e ter acesso à formação educacional.

Ao meu sogro Bernhard e minha sogra Geci pela compreensão, incentivo e carinho que tiveram comigo.

Ao meu orientador Paulo Ricardo da Silva Pereira, por orientar-me durante a elaboração deste trabalho e juntamente aos demais professores que se dedicaram a transmitir conhecimento sendo tão importantes na minha vida acadêmica.

Aos colegas, que foram muitos em muitas fases do curso, pela oportunidade de dividirmos o mesmo sonho e dedicação, vivendo as mesmas experiências com decepções e alegrias, tivemos uns aos outros para apoiar, acreditar e, acima de tudo, admirar.

Aos meus amigos, pelos momentos de alegrias e aflições partilhadas. Com vocês, as pausas entre um trabalho e os estudos constantes, consegui ter momentos descontraídos que foram fundamentais para manter o foco e melhorar tudo o que tenho produzido na vida.

Em especial, dedico este trabalho aos maiores amores da minha vida, minha esposa Bruna Kraus pelo apoio absoluto, por me incentivar, compreender, ajudar e encorajar nos momentos difíceis e a minha filha Manuela, que deu um sentido especial a minha existência e me tem proporcionado grandes momentos de alegria e que embora não tenha conhecimento disto, ilumina de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos.

“Planejar é fazer hoje para sermos
melhores amanhã, pois o futuro pertence
àqueles que tomam decisões difíceis hoje”.

(Business Week)

RESUMO

O presente trabalho descreve a aplicação de uma fonte de energia ininterrupta com volante de inércia conectado à rede elétrica para filtrar harmônicas, absorver faltas de curta duração e fazer a compensação de reativos. Fontes Ininterruptas de Energia com Volantes de Inércia, conhecido como *Rotary Flywheel Uninterruptible Power Supply* (UPS) são constituídos basicamente por um volante de inércia que converte energia elétrica em energia mecânica, armazenando energia cinética, por uma máquina síncrona funcionando como gerador, este vai converter energia mecânica em energia elétrica e um acoplamento de indução que transfere a energia do volante para o gerador. Sistemas UPS possuem duas formas de operação que caracterizam seu funcionamento. A primeira delas é o regime de serviço. Neste regime o sistema opera conectado à rede elétrica mantendo a energia do volante, filtrando harmônicos e compensando reativos. A segunda forma de operação é o regime de emergência no qual o sistema alimenta a carga durante as faltas de curta duração. Estes sistemas são aplicados em sistemas críticos que não podem sofrer interrupções e que demandem qualidade da energia elétrica. No desenvolvimento deste trabalho foram abordadas as características construtivas da UPS no capítulo dois e a representação do sistema em um ambiente de simulação para análise do comportamento dinâmico e análises das medições reais do sistema no capítulo três. Os resultados obtidos nas análises revelaram que o sistema cumpre a função de filtro, impedindo que os distúrbios afetem a carga crítica e que durante as interrupções de energia de curta duração é capaz de alimentar a carga durante curtos intervalos de tempo mantendo a continuidade e a qualidade da energia elétrica.

Palavras-chave: Energia ininterrupta. Qualidade de energia elétrica. Falta de curta duração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distúrbios Associados à QEE.....	20
Figura 2 - Comparação entre as diferentes falhas de engenharia.....	30
Figura 3 - Velocidade de giro do rotor externo e do rotor interno	32
Figura 4 - Funções de um sistema UPS	33
Figura 5 - Ciclo de operação do sistema UPS	34
Figura 6 - Bloqueador Eletromagnético - Choke	37
Figura 7 - Instalação do bloqueador eletromagnético em um sistema elétrico ...	38
Figura 8 - Indutâncias dos enrolamentos das bobinas.....	38
Figura 9 - Circuitos sequenciais desacoplados.....	40
Figura 10 - Unidade UPS ROTABLOC	41
Figura 11 - Composição do sistema UPS	41
Figura 12 - Diagrama Unifilar do sistema elétrico	43
Figura 13 - Componentes de um gerador síncrono.....	44
Figura 14 - Circuitos equivalentes de máquina síncrona: (a) sentido de referência do tipo motor e (b) sentido de referência do tipo gerador	45
Figura 15 - O circuito equivalente completo de um gerador síncrono trifásico ...	47
Figura 16 - O diagrama fasorial de um gerador síncrono com fator de potência (a) unitário (b) adiantada e (c) atrasado	48
Figura 17 - Diagrama fasorial para operação com potência constante e tensão de terminal constante	49
Figura 18 - Característica de conjugado versus ângulo.	50
Figura 19 - O efeito do aumento da corrente de campo do gerador sobre o diagrama fasorial da máquina	52
Figura 20 - Diagrama de Carga de Máquinas Síncronas (Curva de Capacidade)	53
Figura 21 - O circuito equivalente completo de um motor síncrono trifásico	54
Figura 22 - (a) Um motor síncrono operando com um fator de potência atrasado. (b) O efeito do aumento da corrente de campo.....	55

Figura 23 - Curvas V do motor síncrono.....	56
Figura 24 - Acumulador de energia da UPS	57
Figura 25 - Modelo completo do compensador síncrono	62
Figura 26 - Representação da rede da concessionária.....	63
Figura 27 - Representação do CHOKE	64
Figura 28 - Representação da máquina síncrona	64
Figura 29 - Representação da carga do sistema	65
Figura 30 - Fonte de harmônica de ordem 3.....	67
Figura 31 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 1	68
Figura 32 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 1	68
Figura 33 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 1	68
Figura 34 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 1	69
Figura 35 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 1	69
Figura 36 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 1	69
Figura 37 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 1.....	70
Figura 38 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 1	70
Figura 39 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 2	70
Figura 40 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 2	71
Figura 41 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 2	71
Figura 42 - Comportamento da tensão na carga para o ensaio 2	71
Figura 43 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 2	72
Figura 44 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 2.....	72
Figura 45 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 2.....	72
Figura 46 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 2	73
Figura 47 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 3.....	73
Figura 48 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 3	74
Figura 49 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 3	74

Figura 50 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 3	74
Figura 51 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 3	75
Figura 52 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 3	75
Figura 53 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 3.....	75
Figura 54 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 3	76
Figura 55 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 4	76
Figura 56 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 4	77
Figura 57 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 4	77
Figura 58 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 4	77
Figura 59 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 4	78
Figura 60 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 4	78
Figura 61 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 4.....	78
Figura 62 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 4	79
Figura 63 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 5	79
Figura 64 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 5	80
Figura 65 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 5	80
Figura 66 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 5	80
Figura 67 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 5	81
Figura 68 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 5.....	81
Figura 69 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 5.....	81
Figura 70 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 5	82
Figura 71 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 6	82
Figura 72 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 6	83
Figura 73 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 6	83
Figura 74 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 6	83
Figura 75 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 6	84
Figura 76 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 6	84

Figura 77 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 6.....	84
Figura 78 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 6	85
Figura 79 - Distorção Harmônica Total de Tensão na Rede pelo PRODIST	85
Figura 80 - Distorção Harmônica Total de Tensão na Carga	86
Figura 81 - Distorção Harmônica Total de Tensão da Rede extrapolado	86
Figura 82 - Limite de Distorção Harmônica Total de Tensão na Carga	86
Figura 83 - Forma de onda da tensão da rede	87
Figura 84 - Forma de onda da tensão sob a carga	87
Figura 85 - Interrupção de tensão da rede para o ensaio 8	87
Figura 86 - Comportamento da corrente de campo no ensaio 8	88
Figura 87 - Comportamento da tensão sob a carga no ensaio 8.....	88
Figura 88 - Comportamento da carga para o ensaio 8.....	88
Figura 89 - Comportamento da frequência da UPS no ensaio 8	89
Figura 90 - Afundamento de tensão da rede para o ensaio 9	89
Figura 91 - Comportamento da corrente de campo no ensaio 9	90
Figura 92 - Comportamento da tensão sob a carga no ensaio 9.....	90
Figura 93 - Comportamento da carga no ensaio 9.....	90
Figura 94 - Comportamento da frequência da UPS no ensaio 9	91
Figura 95 - Interrupção de tensão da rede para o ensaio 10	91
Figura 96 - Comportamento da corrente de campo no ensaio 10	92
Figura 97 - Comportamento da tensão sob a carga no ensaio 10.....	92
Figura 98 - Comportamento da carga no ensaio 10.....	92
Figura 99 - Comportamento da frequência da UPS no ensaio 10	93
Figura 100 - Afundamento de tensão da rede para o ensaio 11	93
Figura 101 - Comportamento da corrente de campo no ensaio 11.....	94
Figura 102 - Comportamento da tensão sob a carga no ensaio 11	94
Figura 103 - Comportamento da carga no ensaio 11	94

Figura 104 - Comportamento da frequência da UPS no ensaio 11	95
Figura 105 - Comportamento da tensão da rede na entrada do sistema UPS....	98
Figura 106 - Comportamento da tensão sob a carga na saída do sistema UPS.....	99
Figura 107 - Comportamento da carga – Entrada UPS.....	100
Figura 108 - Comportamento da carga – Saída UPS.....	100
Figura 109 - Distorção harmônica de tensão na entrada do sistema UPS	101
Figura 110 - Distorção harmônica de tensão na saída do sistema UPS.....	101
Figura 111 - Distorção harmônica de corrente na entrada do sistema UPS.....	102
Figura 112 - Distorção harmônica de corrente na saída do sistema UPS	103
Figura 113 - Tensão na entrada da UPS durante transição das chaves DM/DG	104
Figura 114 - Interrupção da energia durante transição das chaves.....	105
Figura 115 - Comportamento da tensão sob carga durante transição das chaves.....	105
Figura 116 - Tensão sob a carga sem interrupção	106
Figura 117 - Leitura de rotação do sistema UPS	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variação de tensão para conexão superior a 1 kV e inferior a 69 kV	21
Quadro 2 - Perfil do fornecimento de energia elétrica conforme EN 50160	24
Quadro 3 - Categorias e características dos Fenômenos de QEE	26
Quadro 4 - Causas e efeitos decorrentes dos Fenômenos de QEE	28
Quadro 5 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração	29
Quadro 6 - Comportamento do gerador para variações de fator de potência	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites dos indicadores de continuidade	29
Tabela 2 - Limites das DHT (em % da tensão fundamental)	35
Tabela 3 - Fatores de forma do volante (adaptado do inglês)	60
Tabela 4 - Ensaio para análise do comportamento da tensão do sistema	66
Tabela 5 - Ensaio para análise do comportamento da variação de carga	66
Tabela 6 - Ensaio para análise do sistema com variações de curta duração ...	67
Tabela 7 - Resumo dos resultados dos ensaios de 1 a 3.....	96
Tabela 8 - Resumo dos resultados dos ensaios de 4 a 6.....	96
Tabela 9 - Resultados do ensaio 7	97
Tabela 10 - Resumo dos resultados do ensaios de 8 a 11	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Corrente Alternada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DHT	Distorção de harmônica total
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MT	Média Tensão
NBR	Normas Brasileiras da ABNT
PRODIST	Procedimentos de Rede da Distribuição - ANEEL
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Nacional Interligado
UPS	Uninterruptible Power Supply
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
VTLD	Variação de Tensão de Longa Duração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 QUALIDADE DA ENERGIA.....	18
2.1.1 Distúrbios que Afetam a Qualidade da Energia Elétrica	19
2.1.2 Indicadores de Qualidade do Fornecimento da Energia Elétrica	21
2.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO ININTERRUPTA ROTATIVA - UPS	30
2.2.1 Bloqueador Eletromagnético para Sequência Zero – CHOKE	34
2.3 COMPOSIÇÃO DO SISTEMA UPS	40
2.3.1 Máquina Síncrona	43
2.3.1.1 Máquina Síncrona Operando como Gerador.....	43
2.3.1.2 Máquina Síncrona Operando como Motor	53
2.3.2 Acumulador de Energia	56
3 MODELAGEM E ESTUDO DE CASO	62
3.1 MODELO DO SISTEMA.....	62
3.1.1 Componentes do Modelo	63
3.2 CENÁRIOS DE ANÁLISE.....	65
3.3 ANÁLISE DOS ENSAIOS DO MODELO.....	67
3.3.1 Comportamento Durante Variações de Tensão da Rede	67
3.3.2 Comportamento Durante Variações da Carga Crítica	76
3.3.3 Comportamento do Bloqueador de Sequência Zero	85
3.3.4 Comportamento Durante Falhas de Curta Duração	87
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	95
3.5 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES NO SISTEMA REAL.....	97

3.5.1 Análise das Medições	98
3.5.2 Análise das Medições do Teste com Carga	103
4 CONCLUSÃO	108
REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

A exigência crescente de uma fonte de alimentação confiável e flexível enfatizou a necessidade de manter uma boa qualidade de energia. A Qualidade de Energia Elétrica (QEE) entregue aos consumidores é medida através de alguns indicadores básicos, que são: qualidade de atendimento, qualidade do serviço e qualidade do produto. Os aspectos técnicos da QEE começam com a identificação de perturbações que causam sua degradação. As perturbações estão associadas principalmente às cargas elétricas não lineares, cargas elétricas mal comportadas, e o aumento da sensibilidade de equipamentos e dispositivos.

O PRODIST Módulo 8 (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica – Qualidade da Energia Elétrica) da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica estabelece os critérios de amostragem, os valores de referência e os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor. Os aspectos analisados da QEE em regime permanente ou transitório são: a) tensão em regime permanente; b) fator de potência; c) harmônicos; d) desequilíbrio de tensão; e) flutuação de tensão; f) variações de tensão de curta duração; g) variação de frequência. Dentre os distúrbios possíveis o que traz maior prejuízo são as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) principalmente para os consumidores que possuem processos ou equipamentos sensíveis a estes fenômenos. (ANEEL, 2018b).

Equipamentos e processos sensíveis a distúrbios elétricos estão cada vez mais presentes nos consumidores. Os Elevadores Regenerativos são um exemplo deste tipo de equipamento e, além disso, utilizam energia potencial mecânica do seu sistema para produzir energia elétrica. Este sistema opera em paralelo com a rede de forma bidirecional, consumindo e injetando energia na rede. Por estar conectado à rede depende que esta esteja dentro dos níveis de sensibilidade para que não ocorram falhas.

Como exemplo desta situação, pode-se citar o prédio corporativo de 18 andares, objeto deste estudo, localizado em São Paulo, ocupado por grandes empresas nacionais e internacionais. Este prédio possui seis elevadores regenerativos, modelo 5500, do fabricante Atlas Schindler, os quais possuem a capacidade de carregar 20 pessoas a velocidade de 3m/s e cada unidade é

capaz de regenerar 40kW a partir da energia mecânica do seu sistema. Estes equipamentos são sensíveis à perturbações da rede elétrica.

Durante seu funcionamento, principalmente quando os mesmos estão fornecendo potência ativa, se ocorrer algum distúrbio na rede elétrica, os elevadores param de funcionar repentinamente, entrando em estado de falha. Constantes falhas foram verificadas nos elevadores e com a realização de análises da energia fornecida pela concessionária, foram constatadas interrupções de curta duração que causavam estas falhas.

Para evitar que o sistema regenerativo dos elevadores apresente falhas decorrentes de distúrbios da rede, foi adotada nesta instalação a utilização de UPS – *Rotary Flywheel Uninterruptible Power Supply* como filtro.

Assim, este trabalho vai apresentar um estudo de caso, composto pela modelagem do sistema UPS e simulações sobre a aplicação do mesmo em um sistema elétrico visando eliminar os efeitos das falhas da rede sobre a carga crítica garantindo continuidade e qualidade e demonstrar os benefícios da integração deste sistema para a instalação elétrica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é apresentar através de simulações, os efeitos em termos de QEE da utilização de UPS no atendimento a cargas sensíveis em um sistema elétrico. Também serão apresentadas as análises das medições realizadas em campo para demonstrar a eficácia do sistema.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) conhecer o funcionamento da UPS;
- b) modelar a UPS rotativa;
- c) simular o funcionamento da planta em análise em diferentes cenários;
- d) analisar medições elétricas reais registradas com instrumento específico (analisador de QEE);
- e) demonstrar de acordo com as normas vigentes os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 QUALIDADE DA ENERGIA

A tensão e a confiabilidade no fornecimento de energia são dentre outros fatores elementos que caracterizam a QEE. Trata-se de dois aspectos que são considerados no fornecimento de energia e são indicadores que caracterizam a QEE e depende tanto da concessionária (geração, transmissão e distribuição), quanto do consumidor. (SOUZA, 2003).

No sistema de transmissão e de distribuição são necessárias intervenções para manter o nível de tensão dentro de limites operacionais aceitáveis, pois estes sistemas estão susceptíveis a eventuais perturbações de tensão, que mesmo dentro de limites pré-estabelecidos, por exemplo, os níveis de tensão determinados pelo PRODIST Módulo 8, podem causar operações inadvertidas de equipamentos elétricos que não suportam tais variações. (ANEEL, 2018).

Ainda conforme ANEEL (2018), pode-se citar os principais fenômenos de qualidade em regime permanente e transitório:

- a) tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) flutuação de tensão;
- f) variação de frequência;
- g) variações de Tensão de Curta Duração – VTCD.

Tratando-se de QEE, a potência reativa influencia significativamente o sistema elétrico e, por exemplo, a prova disso, está no tamanho dos equipamentos que são dimensionados, prevendo fluxo desta potência que provoca um aumento na magnitude das perdas, resultando em afundamentos de tensão. A potência reativa não é um parâmetro de QEE visto que os efeitos causados pela variação desta grandeza são percebidos na tensão e esta sim é um parâmetro de qualidade importante. (CAMPELO, 2008).

São vários os distúrbios que interferem na qualidade da energia elétrica afetando diretamente a tensão.

2.1.1 Distúrbios que Afetam a Qualidade da Energia Elétrica

Vários distúrbios afetam a qualidade da energia elétrica de diversas formas diferentes. Para identificar e mensurar estes distúrbios faz-se através de medições de QEE. (SOUZA, 2003).

Ainda conforme Souza (2003, p. 2):

[...] existem diferentes fenômenos ou distúrbios que afetam a qualidade da tensão, tais como: harmônicos, inter-harmônicos, flutuação de tensão (causa cintilação luminosa denominada, em inglês, flicker), desbalanceamento e transitório. Outro aspecto, a confiabilidade, está relacionado com distúrbios de longa duração, tais como: afundamento e elevação de tensão, desvio na frequência, interrupção transitória e desligamento.

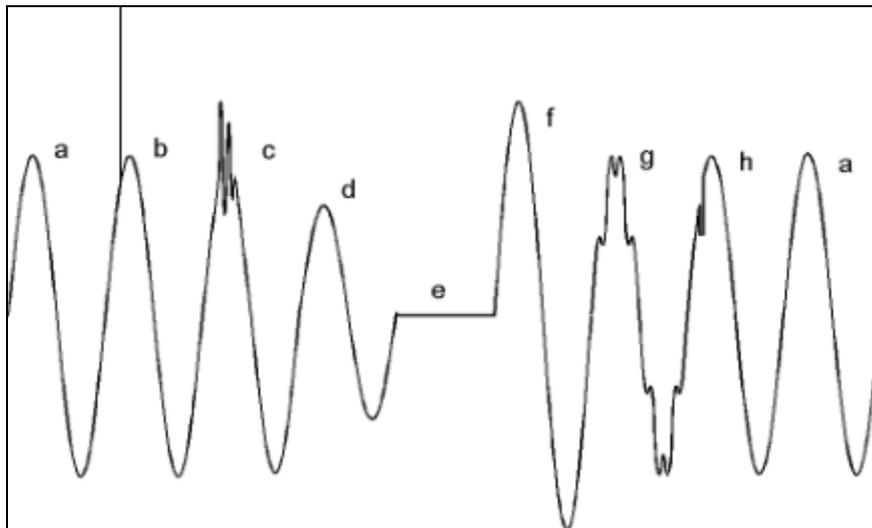
A seguir as definições dos distúrbios que afetam a energia elétrica:

- a) *elevação de tensão (“swell”)*: ou surto de tensão, demonstrado na figura 1, letra b, é o aumento da tensão eficaz, superior a 1,1 pu, com duração inferior a três minutos. Se essa elevação de tensão durar mais tempo terá uma sobretensão conforme figura 1, letra f;
- b) *transitório de tensão*: ou transitório oscilatório, demonstrado na figura 1, letra c, é uma variação instantânea, sustentada ou não, da forma de onda da tensão;
- c) *afundamento de tensão (“dip” ou “sag”)*: demonstrado na figura 1, letra d, é a redução da tensão eficaz, superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u, com duração inferior a três minutos. Se esse afundamento de tensão durar mais tempo será uma subtensão;
- d) *interrupção transitória*: ou interrupção momentânea, demonstrado na figura 1, letra e, é a redução da tensão ou corrente eficaz para valores inferiores a 0,1 pu, com duração de até 1 minuto. Se a interrupção durar mais tempo será um desligamento;
- e) *harmônicos*: demonstrado na figura 1, letra g, tratam-se distorções na forma de onda da tensão ou da corrente, presente em alguns ciclos ou até mesmo em regime permanente. Estas distorções são

provocadas por cargas não lineares. Cortes de tensão, demonstrado na figura 1, letra h, é uma deformação da forma de onda que ocorre em um período inferior a 1 ciclo.

Na figura 1, são apresentados os gráficos das formas de onda da energia elétrica dos comportamentos que representam os principais distúrbios. (BRONZEADO et al., 1997).

Figura 1 - Distúrbios Associados à QEE



Fonte: Bronzeado et al. (1997).

Atualmente os distúrbios da rede elétrica têm provocado desligamentos de equipamentos e processos utilizados em diversos setores. Tais equipamentos demonstram-se mais sensíveis e vulneráveis a má qualidade da energia elétrica. Condições impróprias da energia que no passado não afetavam os consumidores atualmente resultam em desligamentos dos equipamentos. No Brasil, a otimização de processos industriais com a automatização torna mais essencial que a energia elétrica seja fornecida com qualidade para evitar prejuízos com desligamentos indesejáveis. (CAMPELO, 2008). Existem muitas indústrias que utilizam alta tecnologia em processos industriais. Estes requerem alta qualidade e alta confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. As indústrias como semicondutores, computadores e unidades de fabricação de equipamentos são muito sensíveis às variações na fonte de alimentação. (BECHTEL INTERNATIONAL, 1998).

Conforme ANEEL (2018), os limites de variações que estão adequados à norma, mostrados no quadro 1, para regime permanente, estão divididos em três faixas. Para cada faixa, observa-se os limites de máximo e mínimo que o sistema de distribuição pode fornecer.

Quadro 1 - Variação de tensão para conexão superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	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: ANEEL (2018b).

Existem várias razões importantes para monitorar a QEE e a principal razão é particularmente a econômica se as cargas críticas do processo estiverem sendo afetadas negativamente. (DORR; GRUZS; STANISLAWSKI, 1996). Os efeitos nas operações do equipamento e do processo podem incluir falha de operação, danos, interrupção do processo e outras anomalias desse tipo. Tais interrupções são dispendiosas, uma vez que uma operação baseada no lucro é interrompida inesperadamente e deve ser restaurada para continuar a produção. Além disso, os danos ao equipamento e o reparo subsequente custam dinheiro e tempo visto que o produto danificado é reciclado ou descartado, sendo que ambos são problemas econômicos. (MUHAMAD; MARIUN; RADZI, 2007).

Para a indústria, interrupções de energia podem custar centenas de milhares de dólares por distúrbio único. As consequências precisas podem ser difíceis de categorizar, pois as falhas do sistema afetarão os clientes em graus variados. O custo de inatividade e operação incorreta do equipamento está se tornando cada vez mais importante. (HUNTER, 2001).

2.1.2 Indicadores de Qualidade do Fornecimento da Energia Elétrica

Melo (2008) menciona que os indicadores de qualidade do fornecimento da energia elétrica no Brasil são definidos mediante indicadores de interrupção denominados continuidade, ou de flutuação de energia denominados conformidade.

Segundo Paniago (2006), a disponibilidade da energia elétrica ao consumidor é caracterizada por dois parâmetros – duração e frequência das interrupções.

A ausência do fornecimento de energia elétrica restringe severamente às possibilidades de progresso socioeconômico das populações não atendidas, não possibilitando os benefícios que somente a energia elétrica pode oferecer. Da mesma forma, um fornecimento intermitente e com prolongadas interrupções não permite que os consumidores se beneficiem plenamente do uso da eletricidade, imputando danos aos mesmos e a sociedade como um todo. Por esta razão, a continuidade do fornecimento é o aspecto mais importante da qualidade da energia elétrica e o que recebe maior atenção dos reguladores.

No Brasil, a regulação da continuidade tem dois momentos históricos: a Portaria DNAEE no 46/1978, responsável por inaugurar a regulação da continuidade no Sistema Elétrico Brasileiro, SEB, ao introduzir metas para os indicadores DEC e FEC, e a Resolução ANEEL no 24/2000, responsável pela adequação da regulação da continuidade ao novo contexto institucional do SEB. (PESSANHA; SOUZA; LAURENCEL, 2007).

O DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) refere-se ao intervalo de tempo que, em média, cada consumidor ficou privado do fornecimento de energia elétrica, no período de apuração. Por sua vez, o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) exprime o número de interrupções que em média cada consumidor sofreu no período de apuração.

A ANEEL (2018) estabelece que a concessionária deva ter um programa periódico trimestral de medições, no qual é selecionada uma amostra de unidades consumidoras para apuração dos indicadores de conformidade de tensão.

A continuidade do fornecimento de energia elétrica é regulada com base nos dois indicadores coletivos apresentados a seguir:

$$DEC = \sum_{i=1}^n \frac{Ca(i).t(i)}{Cs} \quad (1)$$

$$FEC = \sum_{i=1}^n \frac{Ca(i)}{Cs} \quad (2)$$

Onde:

n = é o total de interrupções observadas durante o período de apuração.

$Ca(i)$ = é o número de unidades consumidoras atingidas na interrupção i .

$t(i)$ = é a duração (em horas) da interrupção i .

Cs = é o total de unidades consumidoras na área avaliada.

De acordo com Pessanha, Souza e Laurencel (2007, p. 55):

No cálculo destes indicadores é levado em consideração apenas as interrupções com durações superiores a 3 minuto. O período de apuração dos indicadores pode ser mensal, trimestral ou anual e eles podem ser computados para diferentes agregados de consumidores, desde alimentadores, conjuntos de unidades consumidoras, até regiões maiores como regionais de distribuição, municípios ou toda a área de concessão.

Ainda conforme ANEEL (2018), os indicadores individuais de continuidade estão definidos no Módulo 8 do PRODIST, neste estão definidos o DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão), expresso em horas. É o intervalo de tempo em que no período de análise, cada unidade consumidora ou ponto de conexão registrou alguma interrupção da distribuição de energia elétrica. O FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão), expresso em número de interrupções. O FIC é o número de interrupções que ocorreu na distribuição de energia elétrica e que um determinado consumidor sofreu no período de análise. Estes indicadores de interrupção individual do fornecimento de energia elétrica são regulados com base nos dois indicadores apresentados a seguir:

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (3)$$

$$FIC = n \quad (4)$$

Onde:

n = é o total de interrupções observadas durante o período de apuração.

$t(i)$ = é a duração (em horas) da interrupção i .

Estes índices são válidos para variações de tensão de longa duração (VTLD). A maioria dos países que diferenciam as interrupções longas das interrupções curtas está em conformidade com a norma europeia EN 50160 (2004). Conforme esta norma na maioria dos países, uma interrupção é dita como "interrupção longa" se durar mais de 3 minutos e dita como uma "interrupção curta" se ela durar 3 minutos ou menos.

Em alguns países, é feita uma distinção adicional entre interrupções curtas e interrupções transientes, ou transitórias, em que as interrupções transientes são interrupções de até alguns segundos. (CEER, 2008). A necessidade em diferir as interrupções curtas e transientes foi devido à diferença do impacto que essas interrupções causam para os clientes. As interrupções curtas ou transientes não são monitoradas habitualmente.

Fazer a comparação dos dados dos indicadores nacionais com os dados obtidos na Europa é difícil. Essa dificuldade ocorre por que existem diferentes tipos de indicadores ou diferentes métodos de ponderação utilizados e embora todos os países tenham o controle das interrupções longas, menos da metade dos países monitoram as interrupções curtas. (NOBRE, 2017). A duração de aproximadamente 70% das interrupções curtas pode ser inferior a um segundo conforme é mostrado no quadro 2. Em alguns documentos, as interrupções curtas são consideradas como tendo durações que não excedem um minuto. (EN 50160, 2004).

Quadro 2 - Perfil do fornecimento de energia elétrica conforme EN 50160

Parâmetros	Características de tensão de alimentação de acordo com EN 50160
Interrupções curtas de tensão de alimentação	LV, MV: (até 3 minutos) poucas dezenas - algumas centenas / ano Duração 70% deles <1 s
Interrupções longas de tensão de alimentação	LV, MV: (mais de 3 minutos) <10 - 50 / ano

Fonte: Adaptado pelo autor de EN 50160 (2004).

Normalmente as interrupções longas são aquelas programadas pelas distribuidoras de energia elétrica e as interrupções curtas são decorrentes de falhas nos sistemas de distribuição. Quando as concessionárias de energia realizam desligamentos programados, os clientes são informados para que não

sejam prejudicados por interrupções inadvertidas que provoquem prejuízos em suas linhas de processos. Porém, as faltas de curta duração ou momentâneas ocorrem sem aviso prévio e por isso, podem ser mais prejudiciais para os consumidores. (ACENDEBRASIL, 2014).

Segundo a norma IEEE 1159-1, o quadro 3 apresenta as diferentes categorias dos fenômenos de QEE. Tratando-se das falhas de longa e curta duração o quadro 4 mostra suas causas e efeitos típicos. (GONÇALVES, 2008).

Quadro 3 - Categorias e características dos Fenômenos de QEE

(continua)

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Magnitude de Tensão Típica
1.0 Transitório			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanosegundos	Acima de 5ns	<50ns	
1.1.2 Microsegundos	Acima de 1µs	50 ns - 1ms	
1.1.3 Milisegundos	Acima de 0,1 ms	>1ms	
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 Média frequência	5 - 500 kHz	20 µs	0 - 8 pu
1.2.3 Alta frequência	0.5 - 5 Mhz	5 µs	0 - 4 pu
2 Variação de Tensão Curta Duração (VTCD)			
2.1 Instantânea			
2.1.1 Interrupção		0,5 - 30 ciclos	<0,1 pu
2.1.2 Afundamento de Tensão (Sag)		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
2.1.3 Elevação de Tensão (Swell)		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
2.2 Momentânea			
2.2.1 Interrupção		30 ciclos - 3s	<0,1 pu
2.2.2 Afundamento de Tensão (Sag)		30 ciclos - 3s	0,1 - 0,9 pu
2.2.3 Elevação de Tensão (Swell)		30 ciclos - 3s	1,1 - 1,4 pu
2.3 Temporária			
2.3.1 Interrupção		3s - 1mim	<0,1 pu
2.3.2 Afundamento de Tensão (Sag)		3s - 1mim	0,1 - 0,9 pu
2.3.3 Elevação de Tensão (Swell)		3s - 1mim	1,1 - 1,2 pu

Quadro 3 - Categorias e características dos Fenômenos de QEE

(conclusão)

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Magnitude de Tensão Típica
3.0 Variação de Tensão Longa Duração (VTLD)			
3.1 Interrupção Sustentada		> 1 min	0 pu
3.2 Subtensão		> 1 min	0,8 - 0,9 pu
3.3 Sobretensão		> 1 min	1,1 - 1,8 pu
4.0 Desequilíbrio de Tensão		Regime Permanente	0,5 - 2%
5.0 Distorção da Forma de Onda			
5.1 Desvio do Nível CC		Regime Permanente	0 - 0,1%
5.2 Distorção Harmônica	0 - 100° harmônico	Regime Permanente	0 - 20 %
5.3 Inter-harmônica	0 - 6 kHz	Regime Permanente	0 - 2%
5.4 Notches		Regime Permanente	
5.5 Ruído Elétrico	Broadband	Regime Permanente	0 - 1%
6.0 Flutuação de Tensão (Flicker)	< 25 kHz	Intermitente	0,1 - 7%
7.0 Variação de Frequência		< 10 s	

Fonte: Gonçalves (2008).

Quadro 4 - Causas e efeitos decorrentes dos Fenômenos de QEE

Categoria		Causas	Efeitos
VTCD	Interrupção de Tensão	Faltas no Sistema de Potência, falhas de equipamentos, mau funcionamento do sistema de controle.	Desligamento ou mau funcionamento de equipamentos eletrônicos, parada de processos industriais, perdas de dados, defeitos em soft-startes.
	Afundamento de Tensão	Entrada de grandes cargas, faltas no Sistema Potência.	Mau funcionamento de equipamentos.
	Elevação de Tensão	Desligamento de grandes cargas, curtos desequilibrados, energização de banco de capacitores, ferroressonância.	Degradação ou falha do isolamento de dispositivos e equipamentos, queima de dispositivos e equipamentos.
VTLD	Interrupção Sustentada	Faltas permanentes, falhas nos dispositivos de proteção.	Parada de processos industriais, perdas financeiras.
	Subtensão Sustentada	Sobrecargas em alimentadores, partida de motores, saída de banco de capacitores.	Falhas nos sistemas de operação, sobrecorrente, desligamento de equipamentos e dispositivos de proteção.
	Sobretensão Sustentada	Retirada de grandes cargas, energização de banco de capacitores.	Estufamento nos invólucros das unidades capacitivas, queima e redução da vida útil dos equipamentos, elevação de perdas, falhas em isolamentos.

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2008).

O módulo 8 do PRODIST classifica as variações de tensão de curta duração de acordo com o quadro 5.

Quadro 5 - Classificação das Variações de Tensão 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	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: ANEEL (2018b).

Através da tabela 1 observa-se as variações que são superiores a 3 minutos. Os dados são do ano 2016 no conjunto Morumbi que se refere ao ano em que foi realizada a análise da qualidade do fornecimento de energia elétrica do conjunto mencionado. (ANEEL, 2018).

Tabela 1 - Limites dos indicadores de continuidade

ELETROPAULO METROPOL. ELETRIC. DE SÃO PAULO S/A			DIC (em horas)			FIC (numero de interrupções)			DMIC (em horas)	DICRI (em horas)
Conjunto	DEC	FEC	ANUAL	TRIM.	MENSAL	ANUAL	TRIM.	MENSAL	MENSAL	INTERRUPÇÃO
MORUMBI	6	4	18,38	9,19	4,59	11,95	5,97	2,98	2,52	12,22

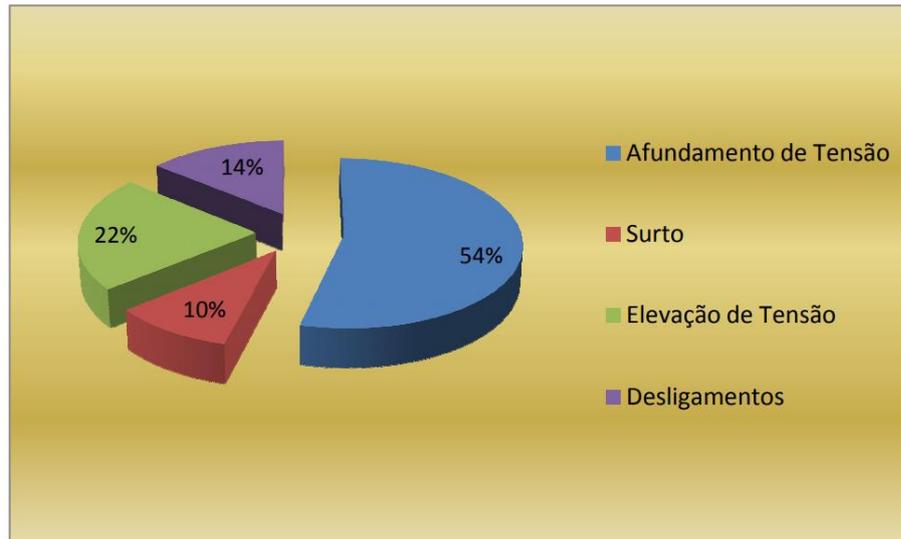
Fonte: ANEEL (2018).

No Brasil as variações inferiores a 3 minutos não são monitoradas. Logo, não é possível estabelecer um dado estatístico das variações de curta duração inferiores a 3 minutos. (NOBRE, 2017).

Maia (2011) menciona que dentre os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica, o afundamento de tensão, que é um dos fenômenos de VTCD, tem maior destaque sendo responsável por perdas econômicas em indústrias, dando exemplo disso, Maia (2011) menciona que uma empresa da

zona da Mata Mineira (MG), do ramo da indústria de trigo, tem prejuízos com fornecimento de energia que ultrapassam R\$840.000,00 (oitocentos e quarenta mil reais) por ano. Para ilustrar a representatividade de cada falha no fornecimento de energia elétrica a figura 2 demonstra cada uma delas.

Figura 2 - Comparação entre as diferentes falhas de engenharia



Fonte: Maia (2011).

2.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO ININTERRUPTA ROTATIVA - UPS

Uma fonte de energia elétrica ininterrupta, ou simplesmente UPS (*uninterruptable power supply*), é um sistema capaz de prover energia elétrica a uma determinada carga vital, de maneira contínua, com alta qualidade e confiabilidade. Este tipo de sistema tem como finalidade a proteção de cargas sensíveis, de maneira a evitar desligamentos por conta de falta de rede elétrica, oscilações de tensão (sobre e subtensão), assim como transientes de linhas e perturbações harmônicas. (BEKIAROV; EMADI, 2002).

Aplicações de sistemas UPS incluem hospitais, equipamentos de emergência, sistemas de computadores, processos industriais, telecomunicações, centros de armazenamento de dados, monitoramento do espaço aéreo e sistemas de gerenciamento on-line.

Conforme King e Knight (2003), os sistemas UPS podem ser classificados como fontes de energia secundária ou de emergência, pois quando a anormalidade do fornecimento de energia elétrica da rede pública afetam a

carga crítica, esses sistemas assumem essas cargas, por meio da energia armazenada. A utilização de energia de emergência é justificada por quatro razões:

- a) *segurança humana*: instalações que alimentam equipamentos hospitalares, sistemas de controladores de vôo, instalações de usinas nucleares;
- b) *segurança nacional*: sistemas de comunicação, instalações militares, controle do espaço aéreo;
- c) *perdas de dados*: situações em que a perda de informações ou dados possam ser irre recuperáveis, por exemplo, em experimentos realizados em centros de pesquisas;
- d) *perdas financeiras*: processos industriais, instalações bancárias.

De acordo com Bekiarov e Emadi (2002), um sistema UPS ideal deve possuir as seguintes características:

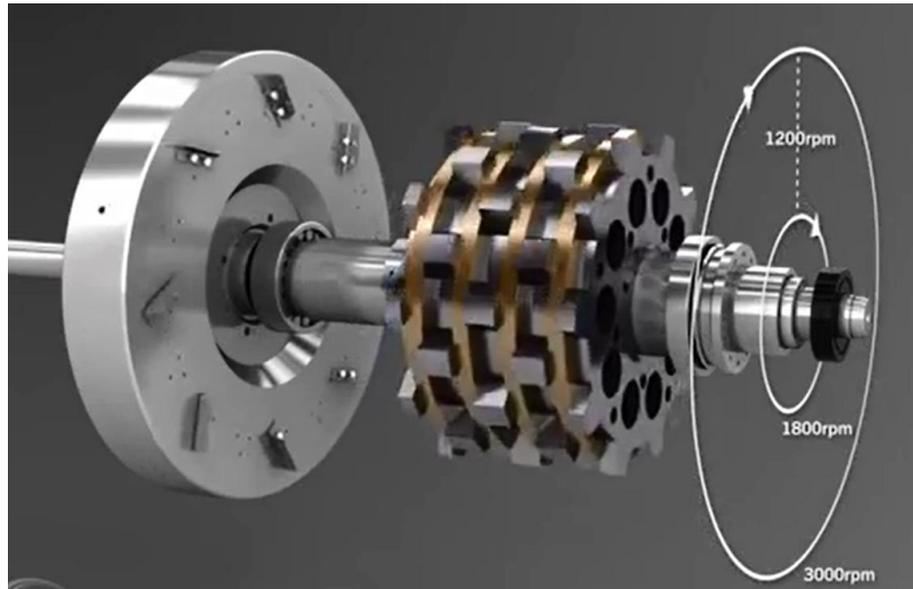
- a) tensão de saída com regulação senoidal, baixa distorção harmônica total (THD) independentemente de variações na tensão de entrada ou na carga, a qual pode ser linear ou não linear, balanceada ou desbalanceada;
- b) tempo de chaveamento zero na transferência entre os modos de operação normal e backup ou vice versa, operação on-line;
- c) corrente de entrada com baixo (THD) senoidal e fator de potência unitário;
- d) alta confiabilidade e eficiência (isso significa qualidade);
- e) baixa manutenção;
- f) by-pass como uma fonte redundante de potência em caso de falha interna no equipamento.

Os sistemas UPS possuem três tipos: híbridos (combinação das tecnologias dinâmica e estática), somente estáticos (UPS eletrônico) e somente dinâmicos (UPS rotativo). É comum a utilização do termo "No Break" para referenciar o sistema UPS. (GONÇALVES, 2008).

O sistema UPS rotativo, o qual é abordado neste estudo, ao invés de utilizar banco de baterias para *backup* de energia, utiliza um sistema de armazenamento de energia cinética o qual é conhecido como acumulador de

energia cinética, medido em Joule [J], e tem como princípio a utilização de dois rotores na parte interna de sua estrutura, os quais durante o funcionamento normal giram a velocidades diferentes. O rotor externo (massa de inércia), em condições normais, gira a uma velocidade muito superior a do rotor interno conforme figura 3.

Figura 3 - Velocidade de giro do rotor externo e do rotor interno



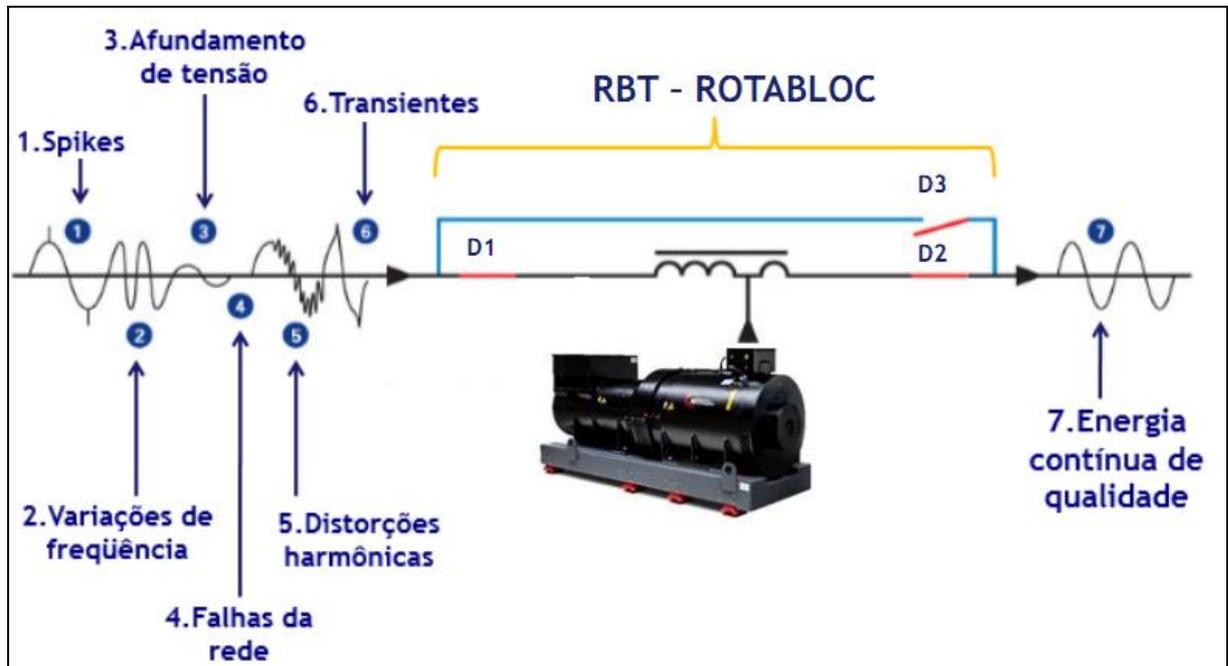
Fonte: IEM Power Systems (2016).

Na falta de energia ou variação momentânea da rede pública, o sistema de controle e proteção identifica a anormalidade e atua sobre o sistema UPS de tal forma que a energia entregue a carga crítica não seja afetada. A transferência de energia cinética do rotor externo para o rotor interno ocorre por meio de uma frenagem magnética entre as duas partes girantes através do acoplamento indutivo, de maneira a transferir a energia cinética acumulada no rotor externo, e manter a velocidade do rotor interno mantendo a frequência e a tensão nominal do sistema. (BEKIAROV; EMADI, 2002).

Uma das principais características de um sistema UPS é melhorar a qualidade da energia elétrica, fornecida pela rede pública, quando esta se encontra presente. Na figura 4 são apresentados os principais distúrbios que ocorrem na rede pública.

Observa-se que o sistema UPS além de fornecer energia de forma ininterrupta quando ocorrem interrupções no fornecimento de energia elétrica, também é capaz filtrar as irregularidades originárias da rede pública.

Figura 4 - Funções de um sistema UPS



Fonte: IEM Power Systems (2016).

Na figura 4, item 7, pode-se observar a representação de um fornecimento de energia elétrica com qualidade, com as seguintes características:

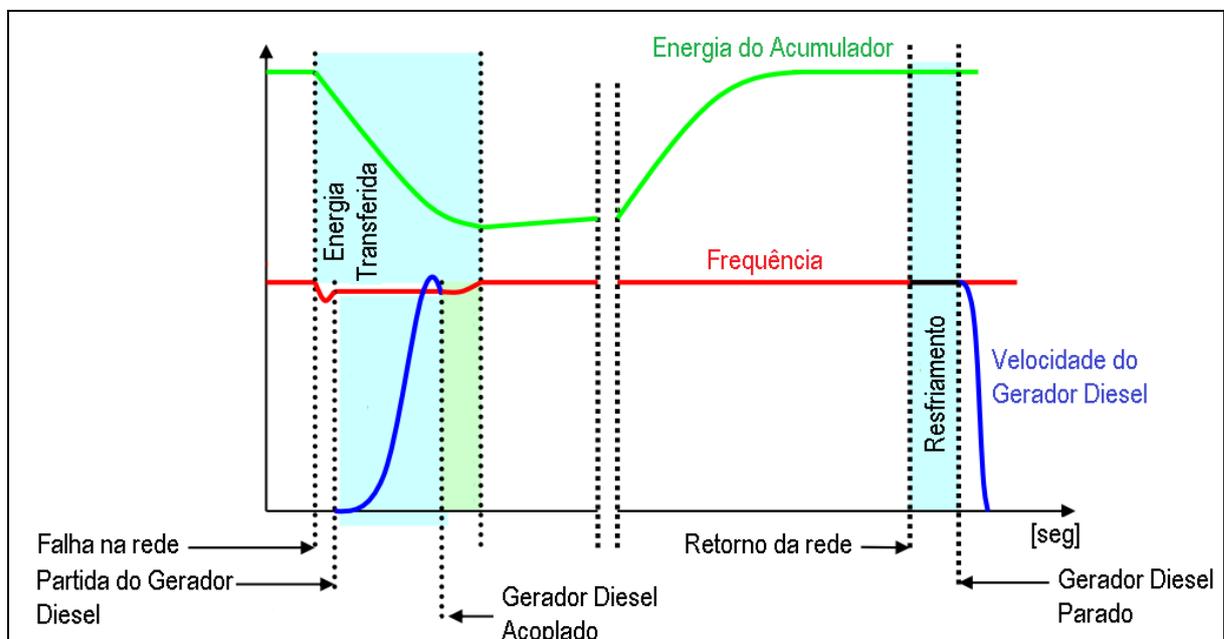
- tensão de saída constante para a carga crítica;
- correção do fator de potência no lado da rede pública;
- armazenamento de energia cinética para fornecimento de energia instantânea quando necessária;
- fonte de emergência, capaz de fornecer energia elétrica em caso de falta da rede pública de duração imprevisível;
- alta capacidade de absorver curto-circuito, de forma a limitar falhas no equipamento.

As funções do sistema UPS que foram descritas até aqui referem-se à combinação do sistema de armazenamento de energia no volante, denominado, em inglês, *flywheel*, com a uma máquina síncrona. Esta combinação é capaz de

atuar na injeção/absorção de potência ativa por curtos intervalos de tempo, na ordem de milissegundos podendo atingir algumas dezenas de segundos, permite assumir partidas motóricas e picos de corrente, que não são admitidas por soluções com inversores e baterias. Procurando assim, integrar confiabilidade e qualidade de tensão. (AKAGI, 2001).

Na figura 5 observa-se o ciclo de operação do sistema UPS juntamente com a operação do gerador diesel. Verifica-se que a frequência elétrica entregue à carga crítica é constante e que não ocorrem interrupções de energia. (IEM POWER SYSTEMS, 2016).

Figura 5 - Ciclo de operação do sistema UPS



Fonte: IEM Power Systems (2016).

A instalação do sistema UPS depende de outros equipamentos de grande importância para sua funcionalidade plena. Dentre eles, em destaque o “CHOKE”, que será estudado a seguir.

2.2.1 Bloqueador Eletromagnético para Sequência Zero – CHOKE

A distorção harmônica representa um problema grave que é cada vez mais frequente no sistema de energia elétrica. A fim de reduzir os efeitos de distorção harmônica nas cargas e na rede de distribuição, medidas devem ser

tomadas para evitar a propagação das distorções harmônicas. (DECKMANN; POMILIO, 2017).

As diferentes harmônicas dependem da sequência de fase que estas assumem com relação às ondas fundamentais do sistema trifásico. Desta forma, tem-se as harmônicas múltiplas de 3, quando estão em fase, se caracterizam como componentes de sequência zero. Este fato representa, dependendo do tipo de conexão, que poderá existir uma significativa corrente circulando pelo neutro quando a conexão for estrela (Y) ou pela malha quando a conexão for triângulo (Δ). (DECKMANN; POMILIO, 2017).

As cargas com características não lineares manifestam altos valores de corrente no condutor neutro. Em circunstâncias de cargas não ideais, essa situação é prejudicial para a operação do sistema. Essas correntes no neutro têm uma forte concentração em componentes de sequência zero (3° , 9° , 15° , etc.). Em alguns casos, essa condição estabelece o carregamento do neutro com correntes que podem ser superiores às correntes de linha do sistema. Em consequência a isso, alguns problemas são comumente causados, entre eles é possível mencionar o superaquecimento do condutor neutro, interferência nos sistemas de comunicação e o alto potencial do neutro. (OLIVEIRA et al., 2010).

As distorções harmônicas são deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Os limites de distorção harmônica total – DHT são apresentados na tabela 2 conforme PRODIST Módulo 8. (ANEEL, 2018).

Tabela 2 - Limites das DHT (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{P95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{I95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2018).

A distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 DTT_3 é calculada conforme equação 5.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

h = a ordem das harmônicas múltiplas de três ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, \dots$)

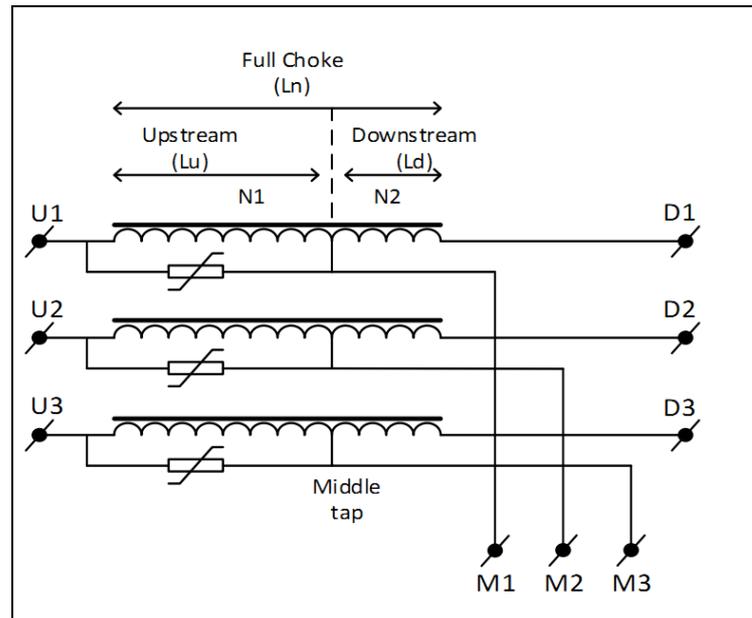
h_3 = a máxima ordem harmônica múltipla de três.

Os equipamentos eletromagnéticos foram consolidados como uma alternativa interessante para a filtragem de correntes harmônicas de sequência-zero em sistemas de distribuição de energia. Esses dispositivos são constituídos de arranjos eletromagnéticos e dispensam o uso de capacitores e outros componentes comumente usados em outros dispositivos, como os filtros de ressonância sintonizados. Por essa razão, esses dispositivos se tornam economicamente atraentes e fornecem uma solução mais robusta para esquemas de filtragem harmônica. (OLIVEIRA et al., 2010).

O bloqueador eletromagnético de sequência-zero é constituído por arranjos das bobinas eletromagnéticas que faz com que o dispositivo apresente alta impedância de sequência zero, figura 6. Assim, quando conectado em série com a rede, ele pode ser usado para bloquear correntes harmônicas de sequência-zero.

Ainda conforme Oliveira et al. (2010), o uso do bloqueador eletromagnético propõe uma solução alternativa quanto aos processos de filtragem. Este dispositivo é conectado em série entre a fonte e a carga não linear, fornecendo alta impedância aos componentes harmônicos de sequência-zero.

Figura 6 - Bloqueador Eletromagnético - Choke



Fonte: IEM Power Systems (2016).

A equação 6 apresenta a indutância total

$$L_n = L_u + L_d + 2M \quad (6)$$

Onde:

L_n = é a indutância total;

L_u = é a indutância de entrada;

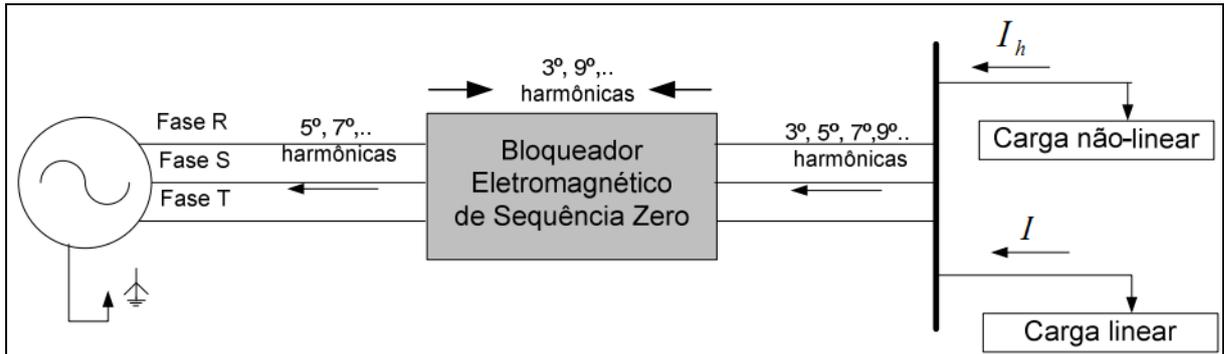
L_d = é a indutância da saída;

M = é a indutância mútua.

O processo de bloqueio realizado pelo dispositivo eletromagnético depende do acoplamento entre as bobinas. O bloqueador será conectado em série entre a fonte e a carga no sistema elétrico e, para garantia de um funcionamento adequado, o mesmo deverá realizar o bloqueio das componentes de sequência zero, sendo necessário o aumento da indutância para esta sequência e, em contra partida, deverá proporcionar um caminho livre para as demais sequências. (FREITAS, 2011).

O arranjo eletromagnético mostrado na figura 7 esclarece o mecanismo de bloqueio das harmônicas das componentes triplas.

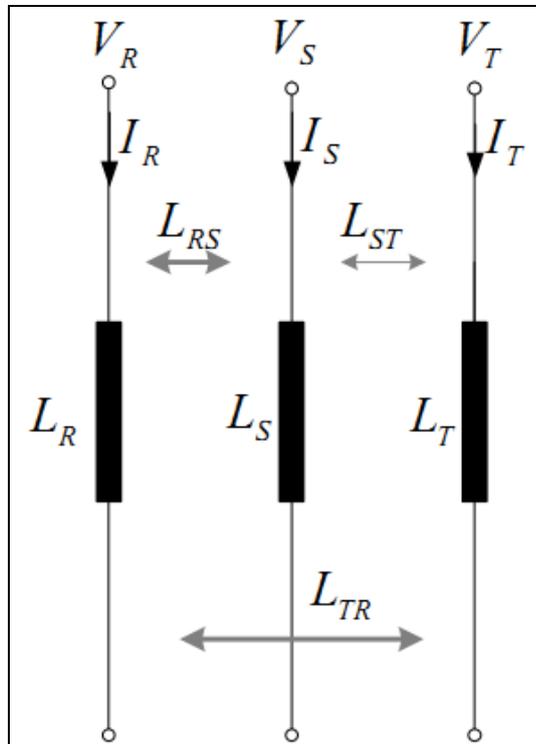
Figura 7 - Instalação do bloqueador eletromagnético em um sistema elétrico



Fonte: Freitas (2011).

Ainda conforme Freitas (2011), o modelo matemático do bloqueador eletromagnético é desenvolvido considerando as relações de tensão e corrente das bobinas mutuamente acopladas e alimentadas por um sistema trifásico. As reatâncias de enrolamento das bobinas variam de forma diretamente proporcional com o aumento ou diminuição da frequência da fonte. O comportamento das indutâncias é mostrado na figura 8.

Figura 8 - Indutâncias dos enrolamentos das bobinas.



Fonte: Freitas (2011).

Considerando a relação de acoplamento dos enrolamentos, pode-se escrever a equação de tensão em função da corrente e das indutâncias mútuas e próprias do enrolamento das bobinas. O efeito resistivo do cobre das bobinas é desconsiderado. A equação da tensão é mostrado na equação 7:

$$V_{RR' SS' TT'}^h = jh\omega \cdot L \cdot I_{RST}^h \quad (7)$$

Onde:

V = é a tensão de entrada;

L = é a indutância;

I = é a corrente elétrica.

A equação 7 é a forma compactada que considera a frequência fundamental ω e a ordem harmônica genérica h .

Reescrevendo a equação 7 para o modelo matemático das componentes simétricas, tem-se a equação 8:

$$V_{012} = jh\omega \cdot L_{012} \cdot I_{012} \quad (8)$$

Onde:

L_{012} = é a matriz de indutâncias sequenciais.

Estas equações matemáticas representam genericamente a relação entre as componentes sequenciais das tensões e correntes para o bloqueador eletromagnético idealizado.

O bloqueador eletromagnético é formado pelo acondicionamento de três enrolamentos arranjados em um mesmo núcleo magnético e tem como objetivo fazer com que não tenha dispersão no acoplamento entre as bobinas. Obtendo um coeficiente de acoplamento " λ " unitário, irá proporcionar o melhor desempenho da sua funcionalidade. (FREITAS, 2011).

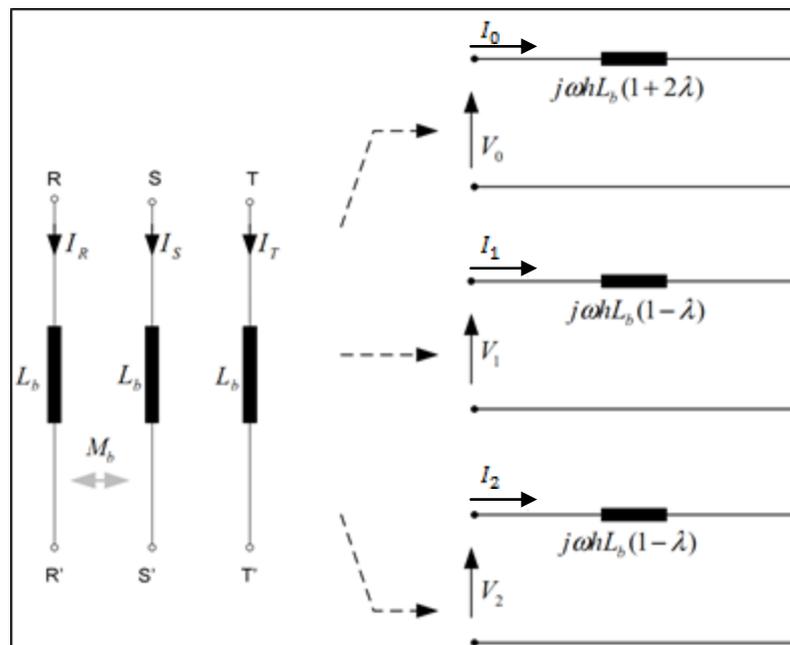
Com a similaridade dos enrolamentos (geométricos e construtivos) do núcleo magnético, considerando assim, igualdade entre as indutâncias próprias e das indutâncias mútuas entre bobinas das fases, adota-se as seguintes considerações:

$$L_S = L_R = L_T = L_b \quad (9)$$

$$L_{RS} = L_{SR} = L_{RT} = L_{TR} = L_{ST} = L_{TS} = M_b \quad (10)$$

Ainda de acordo com Freitas (2011), com um acoplamento ideal, “ $\lambda=1$ ” para a sequência zero, as indutâncias próprias e mútuas iriam se somar ocasionando uma indutância três vezes maior. O contrário acontece para as sequências positiva e negativa sendo que as indutâncias próprias e mútuas se anulam, formando um caminho livre para as mesmas.

Figura 9 - Circuitos sequenciais desacoplados



Fonte: Freitas (2011).

Observa-se através da figura 9, que a eficiência do bloqueador depende diretamente do fator de acoplamento que é idealmente de valor unitário. Do ponto de vista dos circuitos sequenciais equivalentes para um acoplamento ideal entre as bobinas este sistema revela a ação de bloqueio das componentes de sequência zero.

2.3 COMPOSIÇÃO DO SISTEMA UPS

A seguir serão apresentados os principais componentes técnicos que compõem um sistema UPS dinâmico, figuras 10 e 11. Basicamente estão divididos em:

- a) alternador síncrono (1);

- b) acumulador de energia (2);
- c) base (3);
- d) amortecedores de vibrações (4).

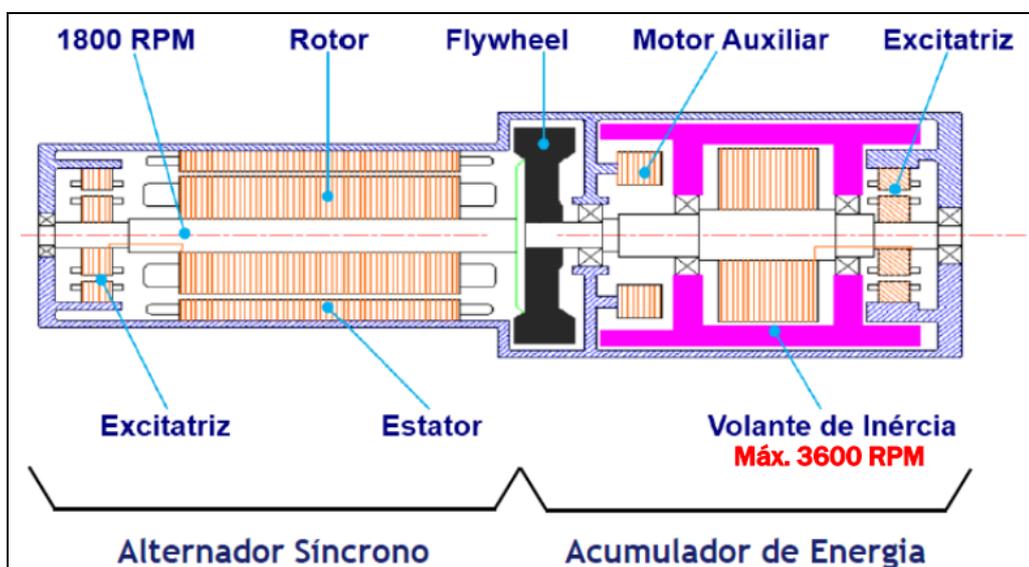
Figura 10 - Unidade UPS ROTABLOC



Fonte: IEM Power Systems (2016).

O sistema UPS, demonstrado na figura 11, divide o conjunto em alternador síncrono e o acumulador de energia. (IEM POWER SYSTEMS, 2018).

Figura 11 - Composição do sistema UPS



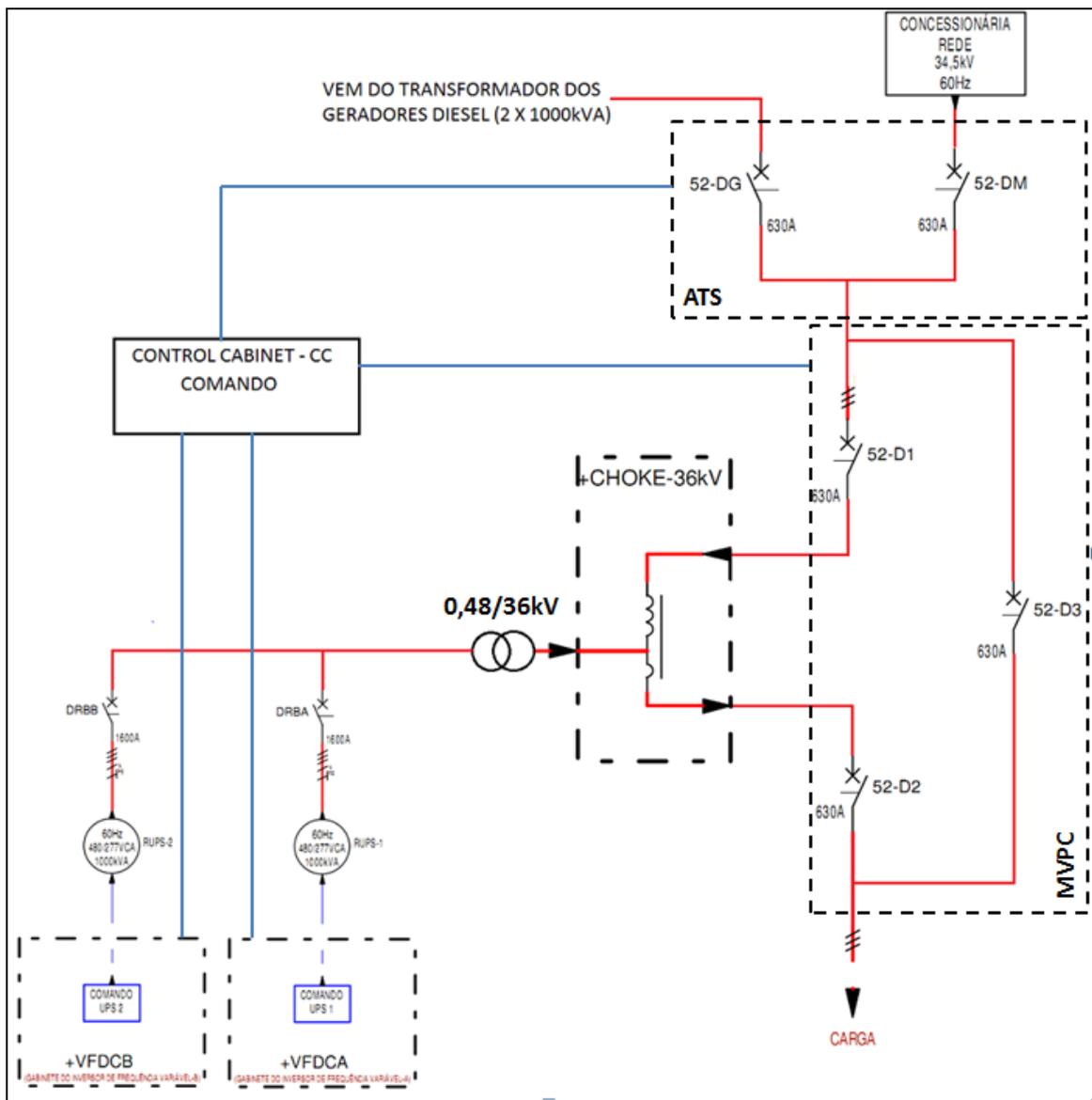
Fonte: IEM Power Systems (2016).

O alternador síncrono é uma máquina síncrona que opera como gerador e motor.

O acumulador de energia possui elementos que armazenam energia cinética e alteram o momento de inércia do conjunto fazendo com que seja possível absorver variações de carga durante faltas de curta duração. (FARAHANI, 2010).

Para representar o sistema elétrico no qual a UPS é aplicada e que se refere a esse estudo, é apresentado um diagrama unifilar na figura 12. Este diagrama unifilar é simplificado, desta forma, elementos que não fazem parte deste estudo foram ocultados.

Figura 12 - Diagrama Unifilar do sistema elétrico



Fonte: Adaptado pelo autor de STEMAC Grupos Geradores (2016).

2.3.1 Máquina Síncrona

2.3.1.1 Máquina Síncrona Operando como Gerador

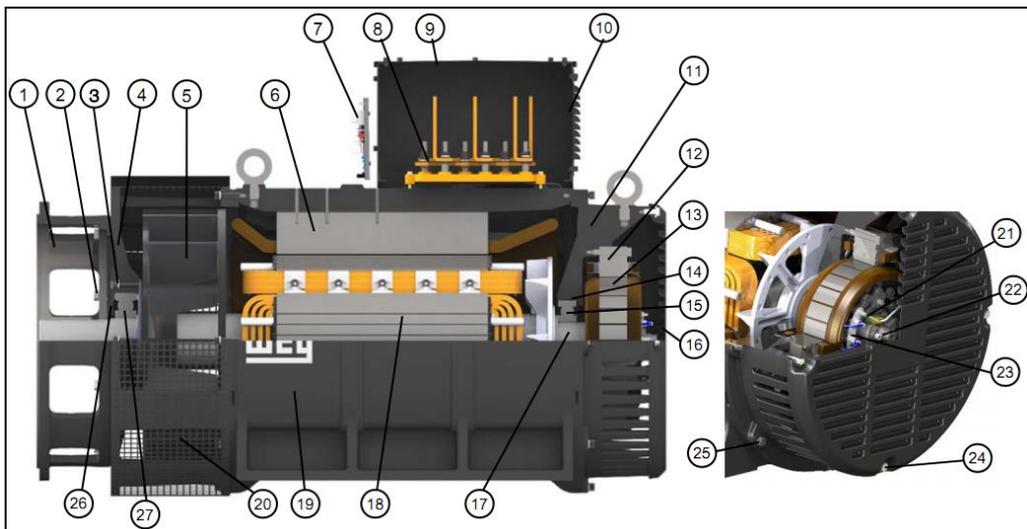
Em uma máquina síncrona que opera como gerador, um campo magnético é produzido no rotor. Os enrolamentos de campo desse rotor quando percorridos por uma corrente elétrica funcionam como um eletroímã. Este rotor é acionado por uma máquina motriz primária e assim, produz um campo magnético girante. Esse campo magnético girante induz nos enrolamentos do estator principal um conjunto de tensões trifásicas. São por definição, *síncronas*, por que

a frequência elétrica gerada está sincronizada com a velocidade de rotação mecânica do eixo do gerador. (CHAPMAN, 2013).

Geradores síncronos são máquinas responsáveis por converter a energia mecânica em energia elétrica. Na figura 13 podem ser vistos os principais componentes de uma máquina síncrona (WEG, 2018a):

- a) estator principal (6);
- b) estator da excitatriz (12);
- c) rotor da excitatriz (13);
- d) rotor principal (18);
- e) ponte de diodos (23).

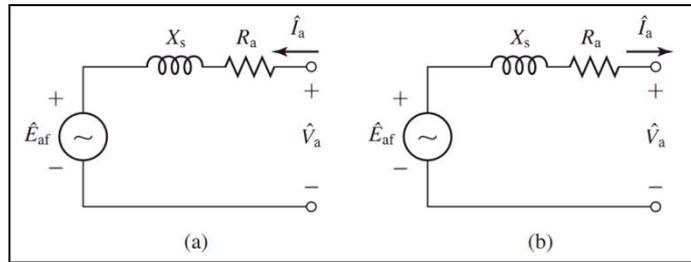
Figura 13 - Componentes de um gerador síncrono



Fonte: WEG (2018a).

Uma máquina síncrona é representada por um circuito equivalente simples a partir do qual conseguimos observar o seu funcionamento como motor ou gerador, conforme figura 14. (FITZGERALD; CHARLES, 2014).

Figura 14 - Circuitos equivalentes de máquina síncrona: (a) sentido de referência do tipo motor e (b) sentido de referência do tipo gerador



Fonte: Fitzgerald e Charles (2014).

Interessa-nos conhecer o funcionamento da máquina síncrona nos dois tipos, pois, o funcionamento do sistema UPS exige que a máquina síncrona funcione como motor e como gerador.

O comportamento da máquina síncrona é representado através dos comportamentos da tensão de armadura, tensão de terminal, corrente de armadura e corrente de campo.

A tensão de armadura E_{af} muda de acordo com a corrente de campo conforme equação 11.

$$E_{af} = \frac{\omega_s L_{af} I_f}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

Onde:

L_{af} = é a indutância mútua entre o campo e a armadura expressa pela equação 12,

$$L_{af} = \frac{\sqrt{2} E_{af}}{I_f \omega_s} \quad (12)$$

Onde:

ω_s = é a frequência elétrica [rad/s].

Ainda conforme Fitzgerald e Charles (2014), tem-se que para o circuito equivalente representado na figura 14.a, o sentido da corrente é positivo, sentido de referência do tipo motor, e, portanto, a equação 13 mostra que a tensão de terminal é dada por,

$$V_a = R_a I_a + jX_s I_a + E_{af} \quad (13)$$

e para o sentido de referência do tipo gerador, o sentido da corrente é negativo e a tensão de terminal é dada pela equação 14,

$$V_a = -R_a I_a - jX_s I_a + E_{af} \quad (14)$$

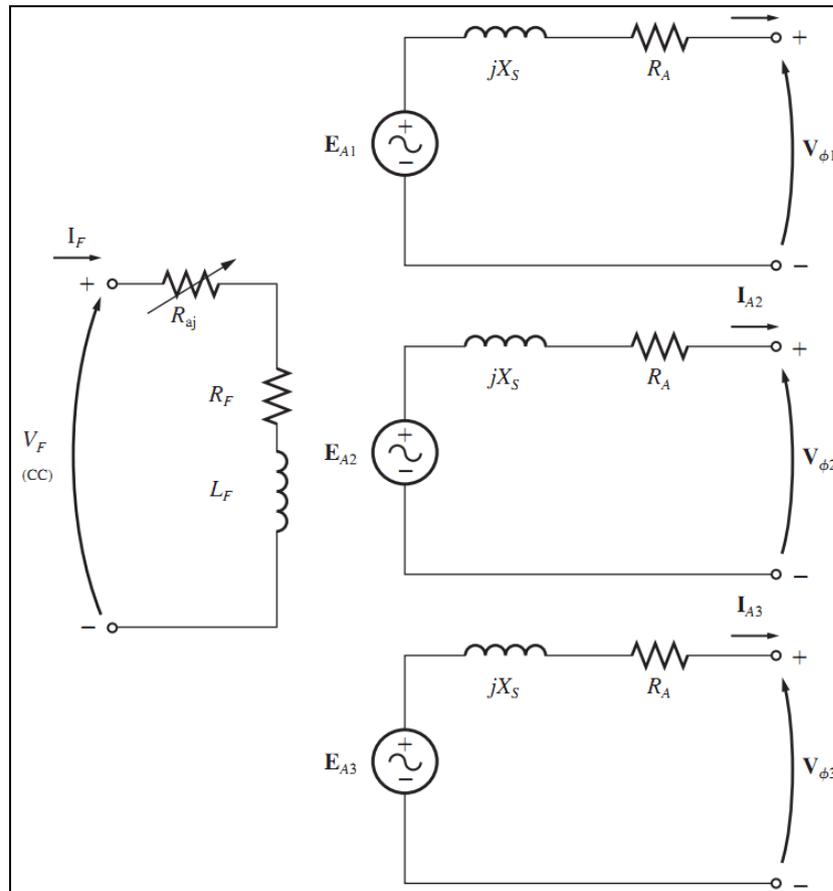
As duas representações são equivalentes e o sinal de I_a é determinado pela escolha do sentido de referência. Para um motor, a potência flui para dentro dele e para um gerador a potência flui para fora da máquina.

Conforme Fitzgerald e Charles (2014), com base nos efeitos dos polos salientes, a tensão de armadura E_{af} é a soma fasorial da tensão de terminal V_a mais a queda de tensão na armadura $I_a R_a$ e as quedas das reatâncias síncrona de eixo direto e quadratura $jI_d X_d + jI_q X_q$ conforme equação 15.

$$E_{af} = V_a + I_a R_a + jI_d X_d + jI_q X_q \quad (15)$$

O circuito equivalente completo de um gerador síncrono é mostrado na figura 15. Tem-se o circuito de campo do rotor modelado pela indutância e a resistência em série da bobina. O restante do circuito equivalente consiste nos modelos das fases. No sistema trifásico as fases estão distanciadas entre si de 120° em ângulo.

Figura 15 - O circuito equivalente completo de um gerador síncrono trifásico

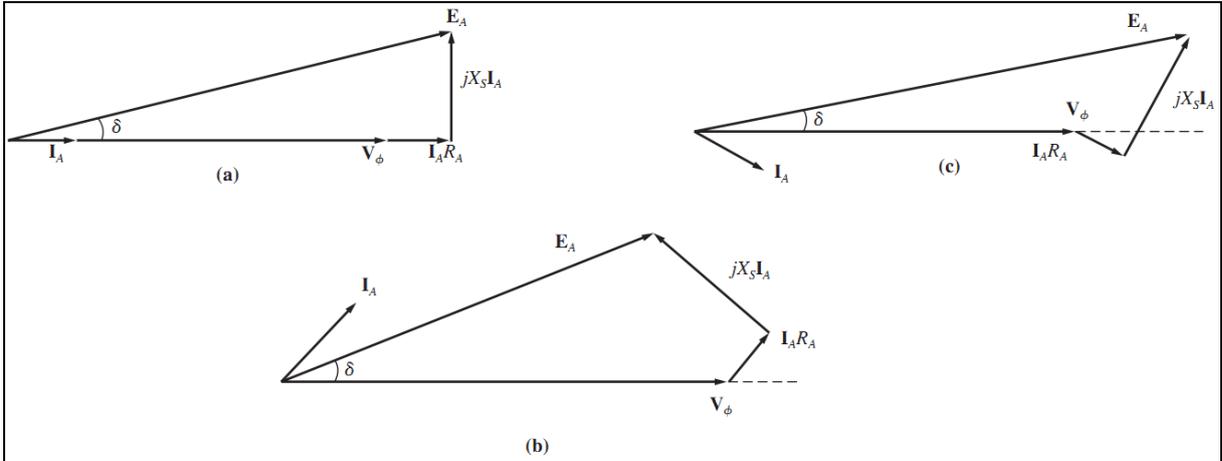


Fonte: Chapman (2013).

As ligações dessas três fases podem ser em Y ou Δ . Se ligadas em Y, a tensão de terminal é a mesma tensão de linha. Quando ligado em Δ , a tensão de terminal é a mesma tensão de fase.

Estas tensões são expressas em fasores e cada fase possui módulo e ângulo que são representados através de um diagrama fasorial que mostra a relação entre as grandezas conforme figura 16. (CHAPMAN, 2013).

Figura 16 - O diagrama fasorial de um gerador síncrono com fator de potência (a) unitário (b) adiantada e (c) atrasado



Fonte: Chapman (2013).

Conforme Fitzgerald e Charles (2014), quando uma máquina síncrona opera como gerador, esta é denominada máquina secundária. O conjugado aplicado ao seu eixo é proveniente da máquina primária que pode ser motor a combustão, hidroturbinas, eólicos, volante de inércia, entre outros, e este em operação normal e em regime permanente está em equilíbrio com o conjugado eletromecânico. A máquina primária que está acoplada ao gerador, faz com que o rotor principal do gerador entre em rotação bem como a sua FMM e o conjugado eletromecânico opõe-se a esta rotação.

Conforme Chapman (2013), qualquer que seja a fonte de potência mecânica, a prioridade é que sua velocidade seja constante independente da potência demandada. Caso ocorram variações na potência mecânica, a potência resultante convertida pelo gerador também sofrerá variações.

A potência elétrica ativa entregue por um gerador é mostrada na equação 16 em termos de linha,

$$P_{saída} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\varphi \quad (16)$$

ou de fase, conforme equação 17,

$$P_{saída} = 3V_\phi I_A \cos\varphi \quad (17)$$

A saída de potência reativa é mostrada na equação 18 em termos de linha

$$Q_{saída} = \sqrt{3}V_L I_L \text{sen}\varphi \quad (18)$$

ou de fase, conforme equação 19,

$$Q_{saída} = 3V_\phi I_A \text{sen}\varphi \quad (19)$$

Considerado agora que a reatância síncrona é muito maior que a resistência da armadura ($X_s \gg R_a$) desconsidera-se a resistência da armadura e assim, obter com base na figura 17 a dedução da equação 20,

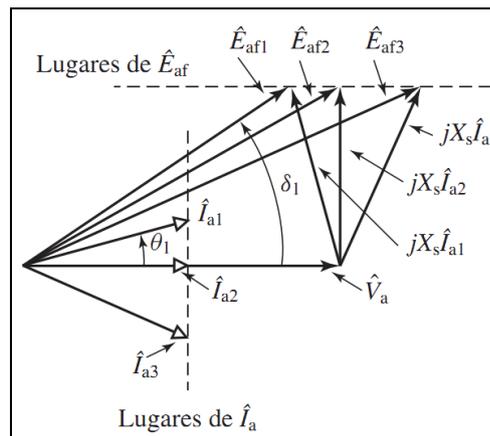
$$I_a \cos\varphi = \frac{E_a \text{sen}\delta}{X_s} \quad (20)$$

Substituindo na equação 17, tem-se a equação 21,

$$P_{conv} = \frac{3V_\phi E_a}{X_s} \text{sen}\delta \quad (21)$$

que mostra que a potência produzida por um gerador síncrono depende do ângulo δ entre a tensão de terminal V_a e a tensão de armadura E_a . (CHAPMAN, 2013).

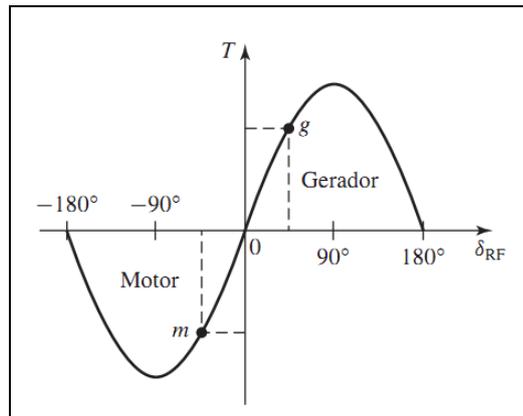
Figura 17 - Diagrama fasorial para operação com potência constante e tensão de terminal constante



Fonte: Fitzgerald e Charles (2014).

Conforme Fitzgerald e Charles (2014), as mudanças no conjugado eletromecânico fazem com que ocorram variações no ângulo de conjugado (δ_{RF}). Esta relação pode ser observada na figura 18.

Figura 18 - Característica de conjugado versus ângulo.



Fonte: Fitzgerald e Charles (2014).

Observa-se que para valores positivos de conjugado tem-se um gerador e que este limita o conjugado da máquina primária, pois o conjugado eletromecânico é máximo quando δ_{RF} é igual a 90° . Caso o conjugado da máquina primária ultrapasse este limite, o conjugado eletromecânico não poderá ser contrabalanceado fazendo com que o sincronismo não seja mantido e o rotor seja acelerado. A equação 21 nos mostra que a potência máxima produzida por um gerador ocorre quando $\delta = 90^\circ$. (FITZGERALD; CHARLES, 2014).

Geradores síncronos são especificados com base na potência aparente total desejada (kVA ou MVA) e tensão nominal. Funcionam com regulação automática de tensão. A potência aparente S é calculada como mostrado na equação 22,

$$S = V_a I_a = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (22)$$

Onde:

P é a potência ativa, dada em watts [W] e Q é a potência reativa dada em volt-ampere-reativo [var].

A potência aparente também é calculada com base nas especificações do gerador, conforme mostra a equação 23,

$$S = U_l \times I_l \times \sqrt{3} \quad (23)$$

Onde:

S = potência aparente (VA)

Ul = tensão de linha (V)

Il = corrente de linha (A)

O fator de potência é calculado conforme é mostrado na equação 24,

$$\cos\varphi = \frac{\sum P}{S} \quad (24)$$

De acordo com Fitzgerald e Charles (2014), a potência ativa é calculada conforme mostra a equação 25,

$$P = \text{Re}[\hat{V}_a \hat{I}_a^*] = V_a I_a \cos\varphi \quad (25)$$

Onde:

φ é o ângulo de \hat{I}_a em relação a \hat{V}_a .

O carregamento de potência reativa é definido com base em uma curva de capacidade. A potência reativa é limitada pelo aquecimento dos enrolamentos da armadura ou do campo. De forma análoga, conforme equação 26, tem-se que a potência reativa é,

$$Q = \text{Im}[\hat{V}_a \hat{I}_a^*] = \pm V_a I_a \sin\varphi \quad (26)$$

o valor negativo representa que o gerador está absorvendo potência reativa. Para valores positivos tem-se que o gerador está fornecendo potência reativa.

De acordo com o diagrama fasorial da figura 19, o comportamento do gerador está representado no quadro 6.

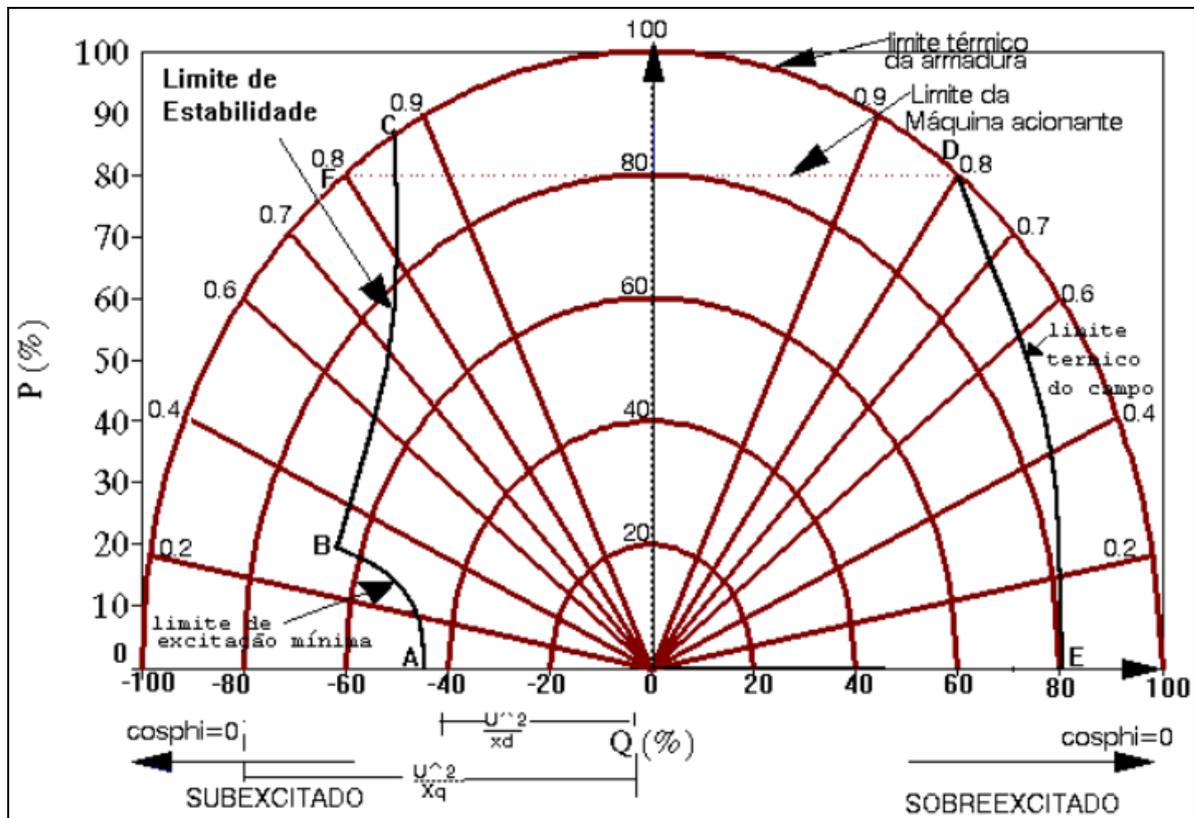
Quadro 6 - Comportamento do gerador para variações de fator de potência

Corrente da armadura	Ângulo φ	Fator de potência	Potência reativa	Tensão gerada	Sistema externo
\hat{I}_{a1}	φ_1	Adiantado	Negativa	$< \hat{E}_{af1}$	O gerador absorve potência reativa do sistema
\hat{I}_{a2}	φ_2	Unitário	-	$\hat{E}_{af2} > \hat{E}_{af1}$	A potência reativa do gerador vai depender da corrente de campo
\hat{I}_{a3}	φ_3	Atrasado	Positiva	$\hat{E}_{af3} > \hat{E}_{af2}$	O gerador fornece potência para o sistema

Fonte: Fitzgerald e Charles (2014).

gerador que mostra os limites de operação e as características de seu funcionamento.

Figura 20 - Diagrama de Carga de Máquinas Síncronas (Curva de Capabilidade)



Fonte: WEG (2018b).

Para que o gerador opere dentro dos limites térmicos e de acordo com a sua capacidade de operação para potência ativa e reativa, todos os pontos de operação deverão estar na região interna do diagrama de carga. (WEG, 2018b).

2.3.1.2 Máquina Síncrona Operando como Motor

Máquinas síncronas usualmente utilizadas para gerar energia elétrica possuem características construtivas e funcionais que permitem sua aplicação como compensadores síncronos quando conectados ao sistema externo compensando a potência reativa e regulando assim, a tensão neste sistema. (AKAGI, 2001).

Conforme Chapman (2013), do contrário a um gerador, o motor converte energia elétrica em energia mecânica. A análise de uma máquina síncrona que opera como motor é semelhante a de um gerador. Observa-se a semelhança

entre as figuras 15 e 21. Nota-se que a diferença está no sentido das correntes de armadura, logo, o sentido do fluxo de potência é invertido.

Para um motor, a tensão de terminal e a frequência do sistema são constante independente da potência entregue no eixo deste motor. A velocidade de rotação do motor é sincronizada com a rotação dos campos magnéticos que por sua vez está sincronizada com a frequência elétrica do sistema ao qual está conectado. A velocidade de rotação do motor é constante desde que não seja excedido o conjugado eletromecânico máximo. O cálculo da rotação é mostrado na equação 27.

$$n_m = 120 \frac{f_{se}}{P} \quad (27)$$

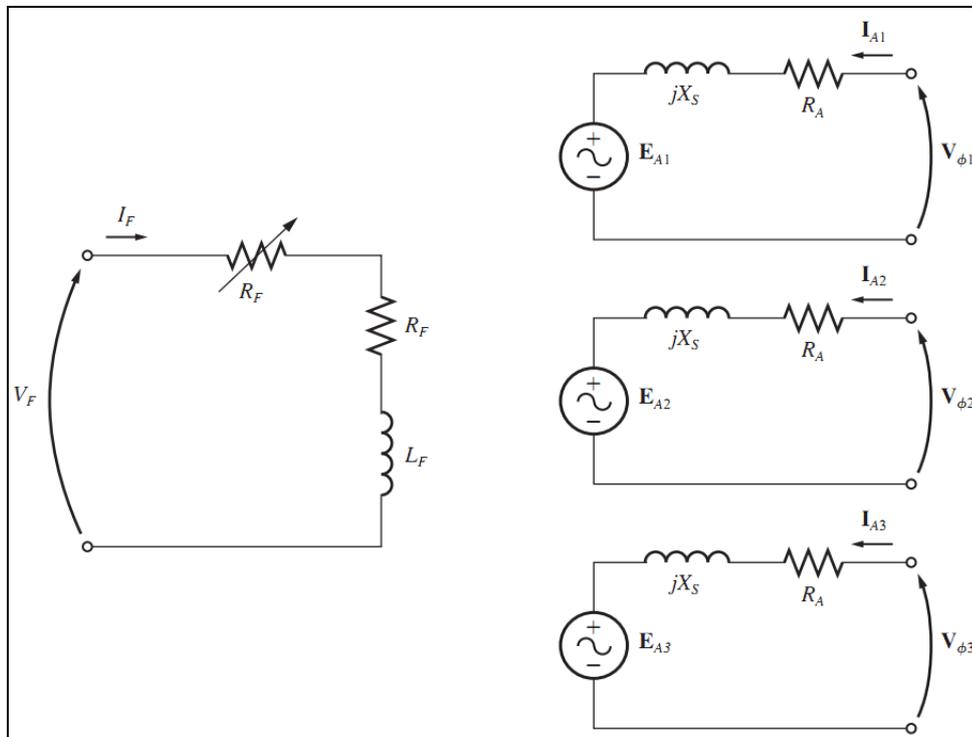
Onde:

n_m = é a velocidade mecânica de rotação

f_{se} = é a frequência elétrica do estator

P = é o número de polos do motor.

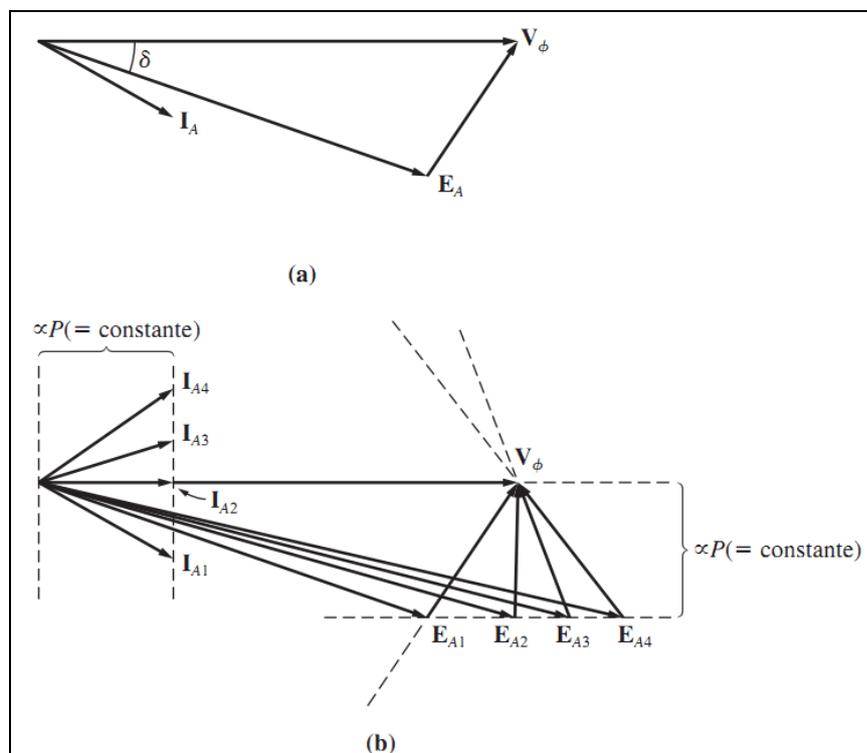
Figura 21 - O circuito equivalente completo de um motor síncrono trifásico



Fonte: Chapman (2013).

Para o funcionamento do motor, sabe-se então, que a sua tensão de terminal e frequência são constantes e que a corrente I_a aumenta quando a carga sobre o eixo é aumentada e conseqüentemente a sua potência ativa também aumenta. No que se refere às variações das correntes de campo, pode-se verificar na figura 22. A figura 22(a) mostra o motor que opera com o fator de potência atrasado. A figura 22(b) mostra o comportamento do motor quando a corrente de campo é aumentada. Verifica-se que o aumento da corrente de campo aumenta o módulo de E_a sem afetar a potência ativa. A variação de I_f não afeta a velocidade no eixo e considerando que a carga acoplada ao eixo é constante a potência ativa não é alterada. Os valores proporcionais à potência no diagrama fasorial ($I_a \cos \varphi$ e $E_a \sin \delta$) não serão alteradas. Com o aumento da corrente de campo, ocorre o aumento da tensão de armadura E_a que só poderá deslizar sobre a reta de potência constante. (CHAPMAN, 2013).

Figura 22 - (a) Um motor síncrono operando com um fator de potência atrasado. (b) O efeito do aumento da corrente de campo



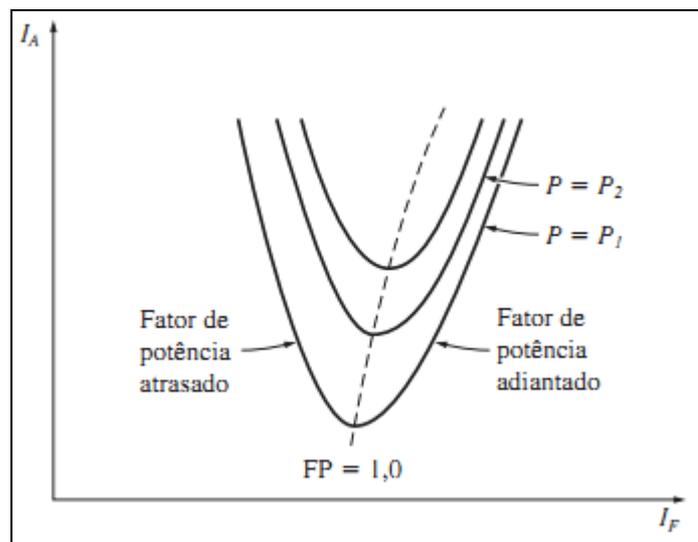
Fonte: Chapman (2013).

Quando E_a está com valores baixos, a corrente de armadura está atrasada e o motor comporta-se como uma carga indutiva consumindo potência reativa do sistema. Com o aumento da corrente de campo, a tensão E_a e V_a

alinha e a potência reativa é nula. Quando a corrente de campo for novamente aumentada, a corrente de armadura torna-se adiantada e o motor torna-se uma carga capacitiva fornecendo potência reativa ao sistema. (CHAPMAN, 2013).

O comportamento típico de uma máquina síncrona está representada na figura 23. Observa-se como controlar a corrente de campo de acordo com que a carga é alterada para manter constante o fator de potência.

Figura 23 - Curvas V do motor síncrono



Fonte: Chapman (2013).

Estas características permitem que uma máquina síncrona opere como um compensador síncrono absorvendo ou fornecendo potência reativa. Desta forma, regulando o fator de potência do sistema. A ANEEL (2018) determina por meio da regulamentação vigente que o fator de potência deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo.

2.3.2 Acumulador de Energia

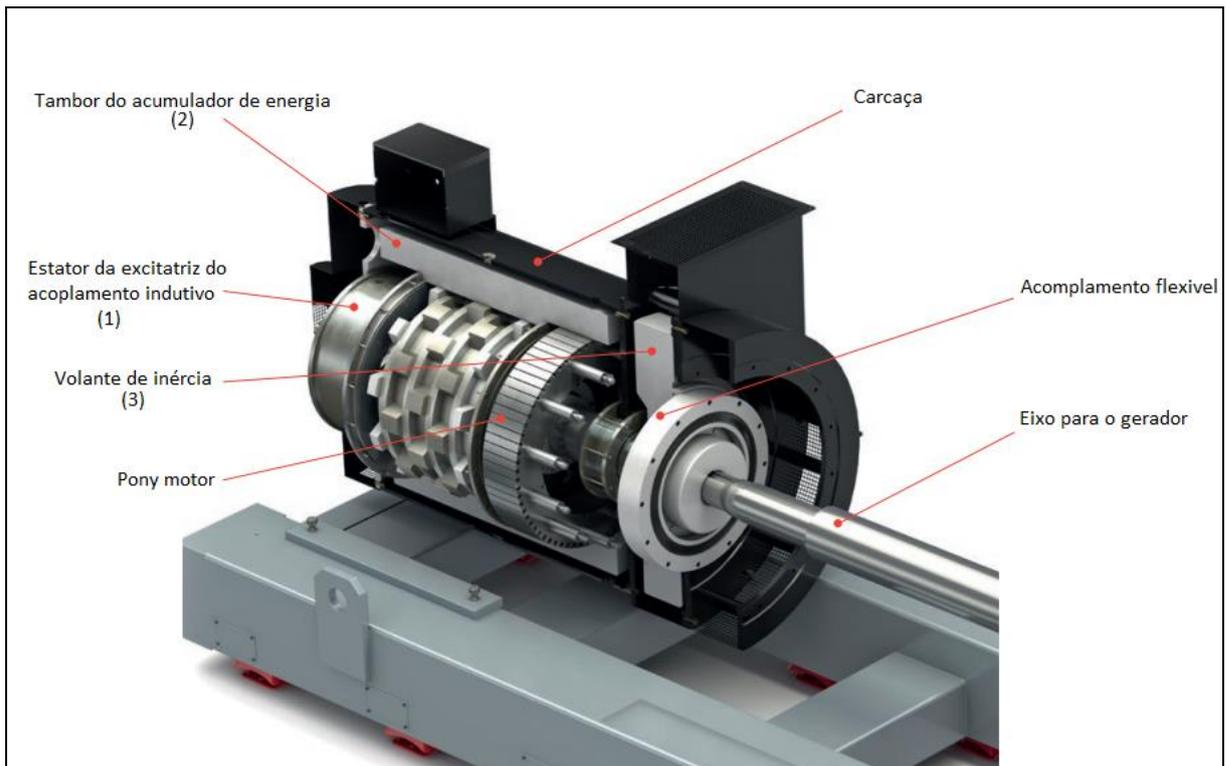
O acumulador de energia é composto por:

- a) acoplamento de indução (1);
- b) tambor do acumulador de energia (2);
- c) volante de inércia (3).

Os componentes 1 e 2 da figura 24 são elementos que armazenam energia cinética. O tambor do acumulador permite que a energia elétrica da rede

seja absorvida lentamente sem provocar variações de tensão na barra e convertida para energia mecânica e armazenada como energia cinética. Em situações de falta de curta duração no fornecimento de energia elétrica este sistema é capaz de fornecer potência ativa. (WEISSBACH; KARADY; FARMER, 1999).

Figura 24 - Acumulador de energia da UPS



Fonte: IEM Power Systems (2016).

O tambor do acumulador armazena energia quando sua massa cilíndrica pesada é acelerada usando um motor elétrico. Para descarregar, a energia do tambor é transferida através do acoplamento de indução para o eixo de um gerador para produzir eletricidade. (FARAHANI, 2012).

No sistema UPS mostrado na figura 24 o volante de inércia opera com velocidade de 1800 rpm e o tambor do acumulador de energia tem sua velocidade variável podendo chegar até 3000 rpm. O tambor de aço forjado fornece ao sistema UPS a energia durante interrupções mais longas e o volante fornece energia durante interrupções curtas.

O volante e o tambor do acumulador armazenam energia na forma de energia cinética. A quantidade de energia " E " armazenada varia linearmente com

o momento de inércia " I " e com o quadrado da velocidade angular " ω ", conforme equação 28.

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (28)$$

O momento de inércia é uma grandeza física que depende da massa e da forma do acumulador de energia cinética. É definido como a integral do quadrado da distância " X " do eixo de rotação para a massa diferencial " dm_x " conforme equação 29,

$$I = \int X^2 \cdot dm_x \quad (29)$$

A solução para um volante cilíndrico de massa " m " e raio " r " será conforme equação 30,

$$I = m \cdot r^2 \quad (30)$$

Substituindo " I " na equação 28 pela equação 30 tem-se que a Energia Cinética depende das variáveis conhecidas conforme equação 31,

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2 \quad (31)$$

ou

$$v = r \cdot \omega \quad (32)$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (33)$$

Como a energia armazenada é proporcional ao quadrado da velocidade angular, o aumento da velocidade angular aumenta a energia armazenada de forma mais eficaz do que o aumento da massa. (FARAHANI, 2012).

Através da equação 28 é possível observar que o aumento da energia armazenada em um volante através da sua velocidade ω é muito superior comparado ao aumento do momento de inércia sem que ω seja alterado. Por outro lado, o aumento das velocidades angulares resulta em maiores perdas. (SOTELO; ROLIM; FERREIRA, 2002).

Ainda conforme Sotelo, Rolim e Ferreira (2002), com o aumento da velocidade do acumulador, podem surgir problemas, como:

- a) aumento das perdas de energia geradas pelo atrito;
- b) aumento das frequências de chaveamento das chaves semicondutoras do inversor de frequência;
- c) aumento nas perdas magnéticas devido ao aumento da frequência das correntes de estator.

Conforme Farahani (2012), a limitação da energia armazenada ocorre também em função da resistência à tração " σ " do material que limita a velocidade periférica " v " e, portanto, a quantidade de energia armazenada que pode ser compreendido através das equações 34 e 35.

$$\sigma = \rho \cdot v^2 \quad (34)$$

$$E_{vmax} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{max} \quad (35)$$

Onde ρ é a densidade de massa. Desta forma, se as dimensões forem fixas, a energia máxima armazenada por volume " E_{vmax} " depende da resistência à tração do material.

Da mesma forma, conforme equação 36 a energia máxima armazenada por massa " E_{mmax} " é,

$$E_{mmax} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (36)$$

Portanto, a capacidade máxima de armazenamento de energia pode ser alcançada usando um material com baixa densidade e alta resistência à tração.

A expressão da energia cinética da equação 34 aplica-se a um volante do tipo aro simples. Existem muitos projetos para acumulador de energia cinética, e a expressão geral de energia máxima armazenada por massa é apresentada na equação 37,

$$E_{mmax} = K \cdot \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (37)$$

Onde " K " é definido como o fator de forma do acumulador de energia que depende da sua geometria. Os fatores de forma do acumulador para vários tipos diferentes de são fornecidos na tabela 3. O valor de " K " é obtido a partir da equação 29 para o momento de inércia. A distribuição de tensão em um acumulador devido ao carregamento centrífugo torna-se complexa para fatores de forma maiores que 0,5, e uma análise detalhada precisa ser feita para alcançá-lo com segurança. (FARAHANI, 2012).

Tabela 3 - Fatores de forma do volante (adaptado do inglês)

Forma do volante	K
Disco de tensão constante	0,931
Disco de espessura constante	0,606
Borda fina	0,500
Barra de tensão constante	0,500
Haste ou escova circular	0,333
Disco perfurado plano	0,305

Fonte: Farahani (2012).

Conforme Farahani (2012), para volantes de baixa velocidade, a melhor maneira de maximizar a energia armazenada é aumentando o momento de inércia. Um aro maciço ou disco feito de material de alta densidade, como ferro fundido ou aço, é suficiente nestes casos. As principais vantagens dos volantes de baixa velocidade são que eles usam uma tecnologia bem estabelecida e são mais baratos de construir.

Conforme Sotelo, Rolim e Ferreira (2002), pode-se fazer a relação entre as velocidades ω_1 e ω_2 que são velocidades angulares do rotor e as suas respectivas energias cinéticas E_{c1} e E_{c2} :

$$E_{c1} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega_1^2$$

$$E_{c2} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega_2^2$$

Desta forma, a energia armazenada é a variação entre as duas energias quando a velocidade do volante passa de ω_1 para ω_2 , conforme é apresentado na equação 38,

$$\Delta E_C = E_{C2} - E_{C1} \quad (38)$$

Conforme apresentando na equação 39, a potência elétrica que será absorvida (ou fornecida) é a variação desta energia em um intervalo de tempo Δt ,

$$P = \frac{\Delta E_C}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \frac{(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\Delta t} \quad (39)$$

Os estudos de volantes de inércia e acumuladores de energia cinética são mais abrangentes do ponto de vista de projeto e aplicação. Os conceitos e equações que foram verificados até aqui são suficientes para a contextualização e análise do estudo de caso que é a proposta deste trabalho.

3 MODELAGEM E ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será apresentado o modelo do sistema e a metodologia utilizada para análise da solução que foi implementada e que é alvo deste estudo de caso e será fundamentado na análise das simulações realizadas em ambiente Simulink/Matlab e das medições reais com analisador de energia.

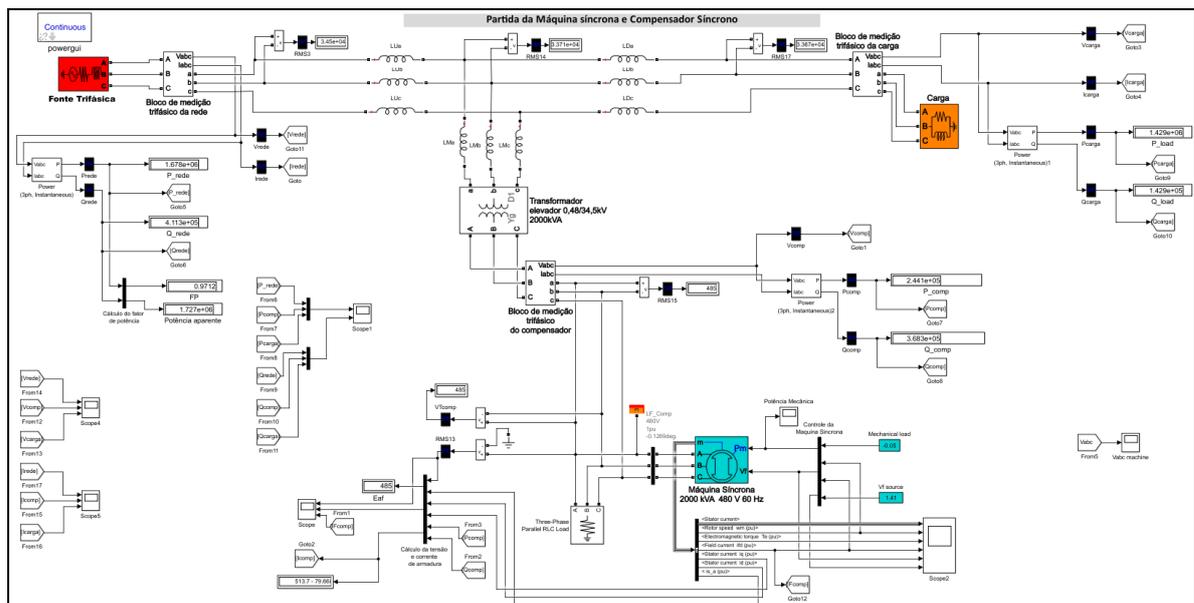
O sistema em estudo foi aplicado no prédio corporativo descrito na introdução deste trabalho e tem como principais funções fazer a regulação da tensão para carga crítica, compensar a carga reativa do sistema, filtrar harmônicas e absorver as faltas de curta duração da concessionária de energia elétrica.

3.1 MODELO DO SISTEMA

Este modelo baseia-se no funcionamento de um sistema UPS. Nele é possível observar o comportamento de transitório e de regime dos níveis de carga e tensão do sistema elétrico bem como o comportamento da máquina síncrona.

O modelo mostrado na figura 25 representa o sistema elétrico deste estudo, com destaque para os principais blocos do sistema.

Figura 25 - Modelo completo do compensador síncrono



Fonte: Elaborado pelo autor.

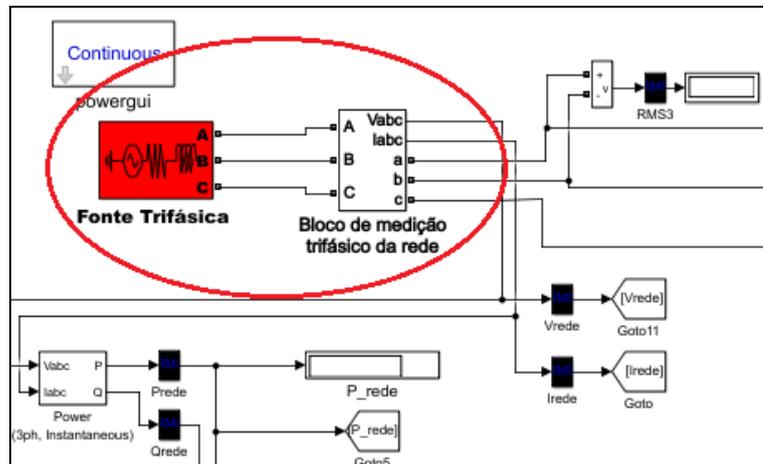
Neste modelo não foram implementados controladores dinâmicos para a máquina síncrona, podendo estes, serem alvo de trabalhos futuros.

A seguir, serão demonstrados os principais componentes do sistema representados no modelo.

3.1.1 Componentes do Modelo

O modelo é composto por uma fonte trifásica que representa a entrada de rede da concessionária. Este componente está configurado de acordo com os valores nominais da rede.

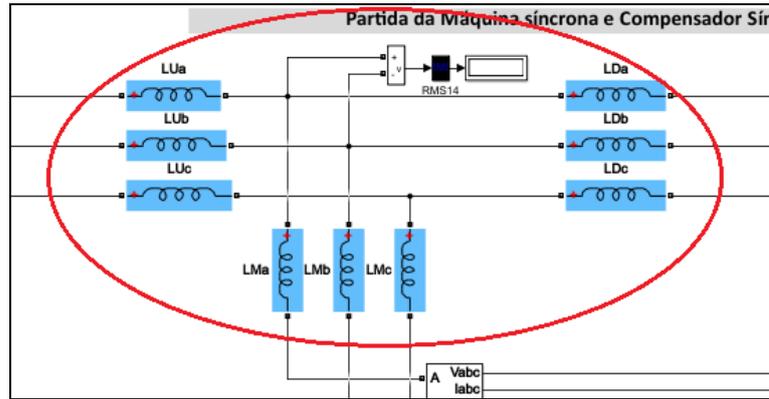
Figura 26 - Representação da rede da concessionária



Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloqueador de sequência zero, denominado CHOKE, é representado no modelo pela associação dos indutores conforme mostrado na figura 27. Os parâmetros destes componentes estão de acordo com as especificações disponibilizadas pelo fabricante.

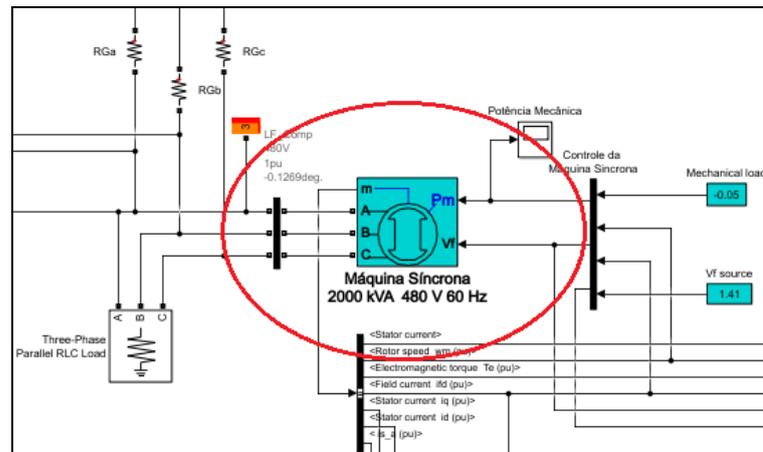
Figura 27 - Representação do CHOKE



Fonte: Elaborado pelo autor.

A máquina síncrona mostrada na figura 28, está parametrizada de acordo as especificações da aplicação. Este, por sua vez, representa o equivalente a duas UPS de 1000kVA do sistema real.

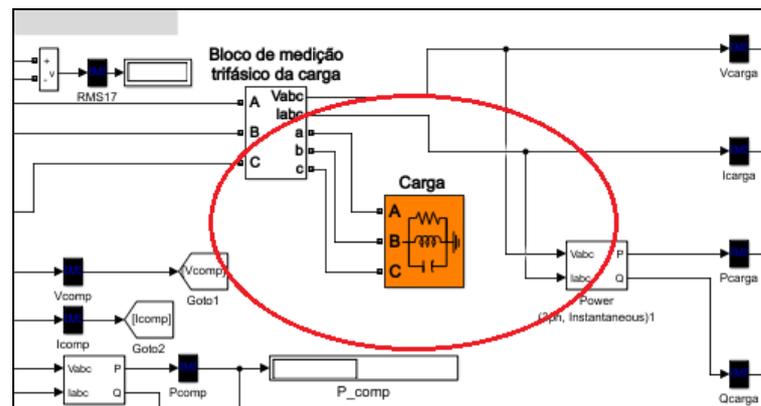
Figura 28 - Representação da máquina síncrona



Fonte: Elaborado pelo autor.

A carga crítica é representada pelo bloco de cargas mostrado na figura 29 que está parametrizada com as características da carga que representam o sistema.

Figura 29 - Representação da carga do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 CENÁRIOS DE ANÁLISE

Com o objetivo de analisar o comportamento do sistema UPS durante as anormalidades no fornecimento de energia elétrica, o modelo será utilizado em diferentes cenários que caracterizam o fornecimento inadequado de energia elétrica. O objetivo é demonstrar através das análises dos resultados deste modelo que o sistema UPS é capaz de garantir a qualidade de energia para a carga crítica.

Para as análises serão realizadas variação nos níveis de tensão da rede com valores nominais e críticos, variações da potência ativa e reativa da carga crítica e distorções harmônicas.

Neste item serão descritos os cenários utilizados para as avaliações do sistema modelado. Os valores e a sequência dos ensaios utilizados na simulação estão apresentados em sequência. Para cada ensaio a corrente de campo da máquina síncrona é ajustada para regular a tensão nominal sob a carga.

a) *Comportamento dos níveis de tensão no sistema:*

Estes ensaios consistem em avaliar o comportamento do sistema para as variações dos níveis de tensão da rede, conforme tabela 4, com os valores pré-definidos no quadro 1 que se refere às definições do PRODIST.

Tabela 4 - Ensaio para análise do comportamento da tensão do sistema

Ensaio	Tensão de Atendimento	Varição de tensão [pu]	Tensão de linha da rede [kV]	Tensão de fase da rede [kV]
1	Nominal	1,00	34.5	19.92
2	Crítica	0.8	27.6	15.93
3		1.2	41.4	23.9

Fonte: Elaborado pelo autor.

b) *Comportamento durante variações de carga:*

Estes ensaios consistem em avaliar o comportamento do sistema para as variações de carga. Os valores e a sequência dos ensaios utilizados na simulação estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio para análise do comportamento da variação de carga

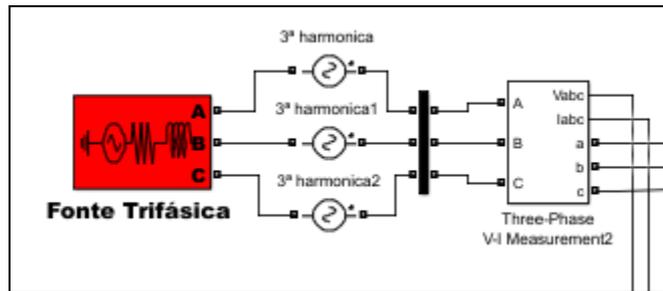
Ensaio	Carga Reativa Indutiva [kVar]	Carga Reativa Capacitiva [kVar]	Potência Ativa [kW]
4	0	0	1500
5	800	0	1500
6	0	800	1500

Fonte: Elaborado pelo autor.

c) *Filtro para harmônicas:*

Para analisar o comportamento do Bloqueador de Sequência-Zero, filtrando as harmônicas múltiplas de 3, foi inserida em cada fase uma fonte com frequência de 180 Hz somada à frequência fundamental do sistema, figura 45, este sendo o ensaio 7. Desta forma, tem-se na fonte correspondente a entrada de rede a presença de harmônica de ordem 3, com o percentual de distorção pré-definido na tabela 2 que se refere às definições do PRODIST. O percentual de distorção para análise será de 6,5% e extrapolado para 13%.

Figura 30 - Fonte de harmônica de ordem 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

d) *Variações de tensão de curta duração – VTCD:*

Este ensaio consiste na simulação de variações de curta duração da rede. Serão simuladas diferentes condições de tempo de duração da falha e níveis de tensão conforme sequência apresentada na tabela 6.

Tabela 6 - Ensaio para análise do sistema com variações de curta duração

Ensaio	Tempo de duração do distúrbio [S]	Nível de tensão [pu]	Tensão de linha da rede [kV]	Tensão de fase da rede [kV]
8	0.1	0	0	0
9	0.1	0.5	17.25	9.96
10	1.0	0	0	0
11	1.0	0.5	17.25	9.96

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 ANÁLISE DOS ENSAIOS DO MODELO

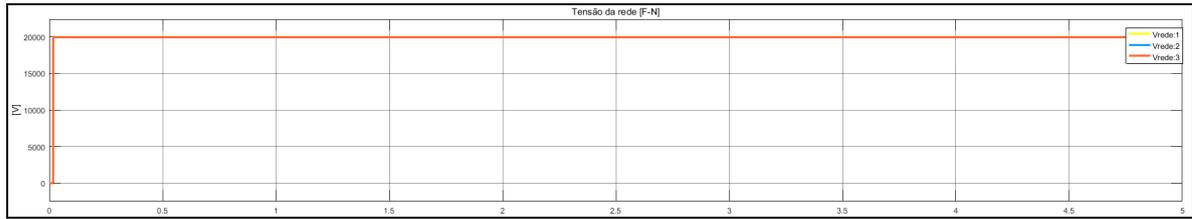
As análises são realizadas com base nas respostas do sistema quando expostos as condições definidas nos ensaios. Os gráficos representam a resposta do sistema e mostram o comportamento das grandezas em análise para os valores de tensão de fase (F-N).

3.3.1 Comportamento Durante Variações de Tensão da Rede

a) *Ensaio 1:*

Neste ensaio foi aplicada a tensão da rede no valor nominal, como pode ser visto na figura 31. Para esta análise, considerar 1500kW e 150kVar (indutivo) referente a carga crítica.

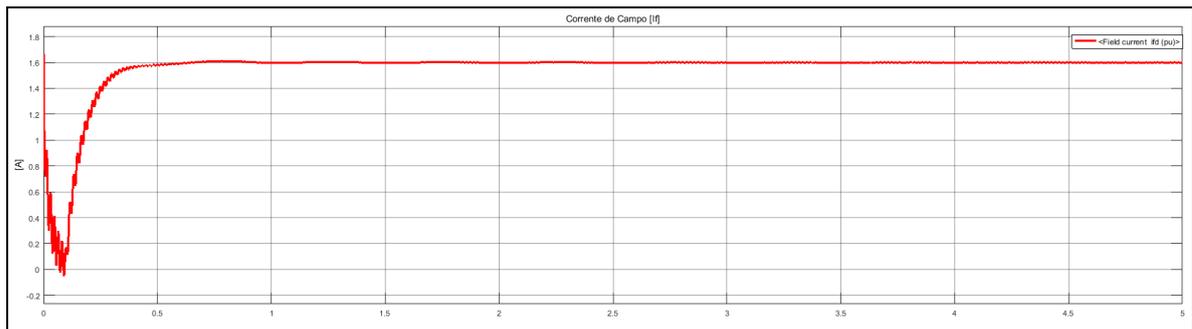
Figura 31 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

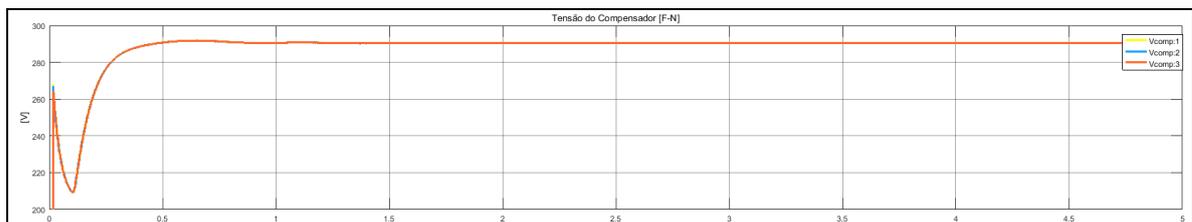
Considerando os ajustes da corrente de campo, figura 32, realizados para manter a tensão na carga com os valores nominais, verifica-se, na figura 33, o comportamento da tensão no compensador, no qual pode-se verificar que a tensão ajustada é superior ao seu valor nominal, para que, desta forma, a queda de tensão do sistema seja compensada.

Figura 32 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

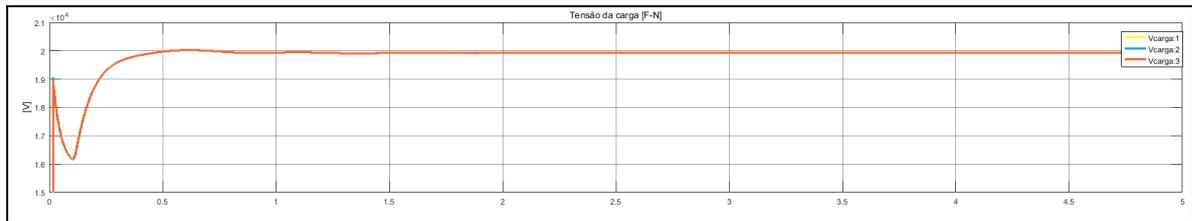
Figura 33 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 34 que a tensão na carga foi regulada no valor nominal esperado.

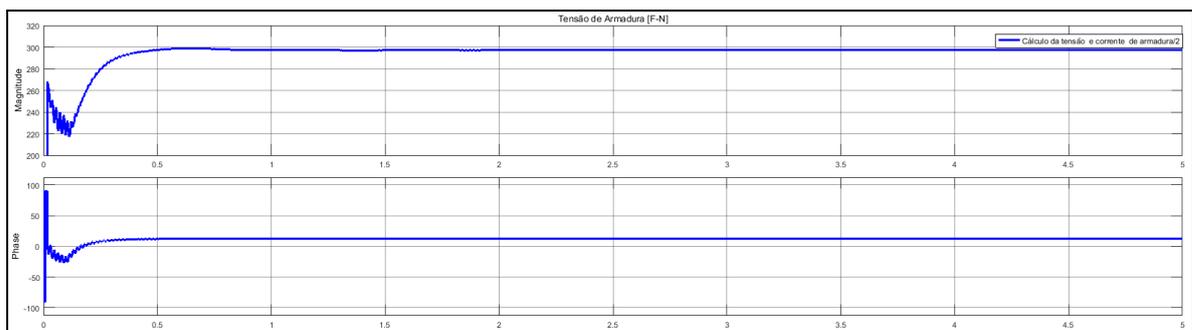
Figura 34 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que a tensão sob a carga pudesse ser ajustada em seu valor nominal, observa-se, através das figuras 35 e 36, o comportamento da máquina síncrona, para a qual, a corrente de armadura ficou adiantada, revelando assim, que a máquina síncrona está fornecendo potência reativa para o sistema.

Figura 35 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

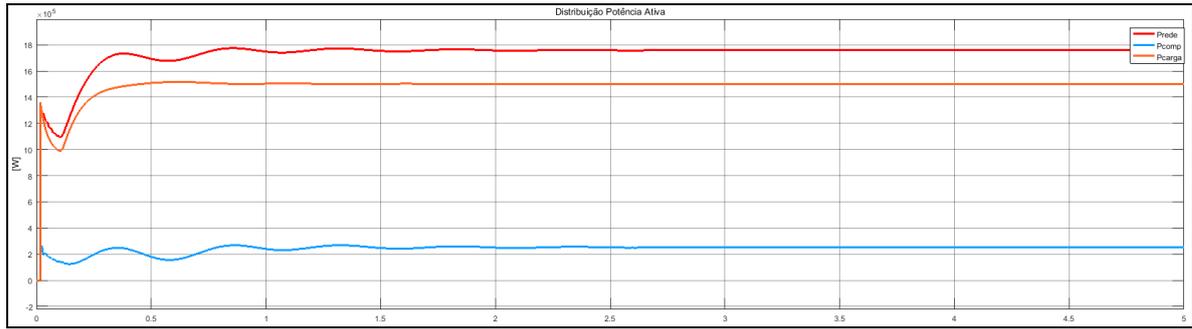
Figura 36 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência ativa do sistema para este ensaio, mostrado na figura 37, demonstra que o compensador consome uma parcela pequena da potência ativa fornecida pela rede.

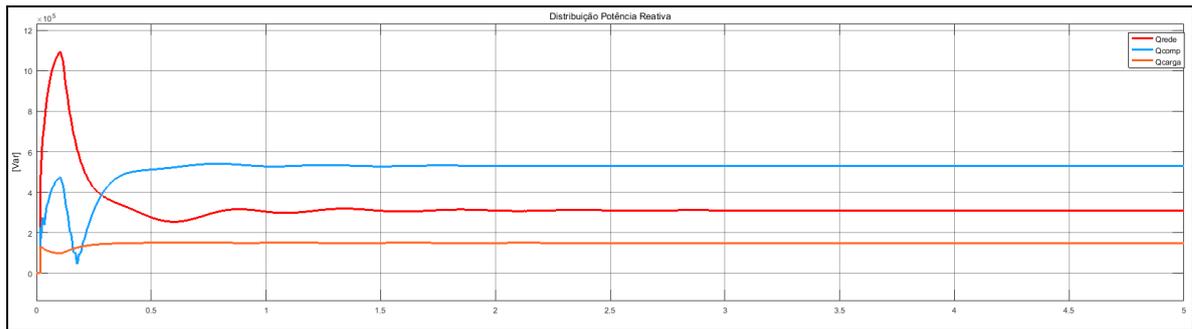
Figura 37 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, a distribuição de potência reativa, mostrado na figura 38, revela que a potência reativa do sistema é proveniente do compensador síncrono.

Figura 38 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

b) Ensaio 2:

Neste ensaio foi aplicada a tensão da rede abaixo do valor crítico inferior, como pode ser visto na figura 39. Para esta análise, considerar 1500kW e 150kVar (indutivo) referente a carga crítica.

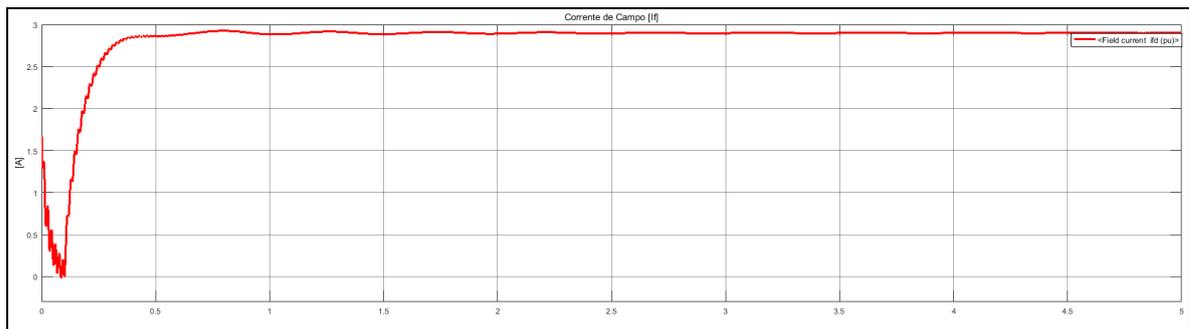
Figura 39 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os ajustes da corrente de campo, figura 40, realizados para manter a tensão na carga com os valores nominais, verifica-se, na figura 41, o comportamento da tensão no compensador, no qual pode-se verificar que a tensão ajustada é superior ao seu valor nominal, para que, desta forma, a queda de tensão do sistema seja compensada. Observa-se neste ensaio que a corrente de campo é superior a corrente de campo do ensaio anterior.

Figura 40 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

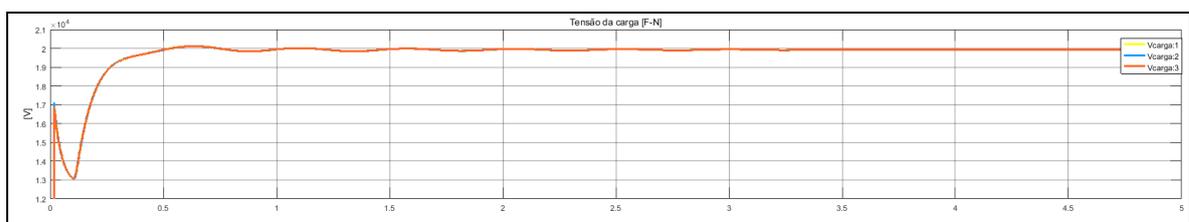
Figura 41 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 42 que a tensão na carga foi regulada no valor nominal esperado.

Figura 42 - Comportamento da tensão na carga para o ensaio 2

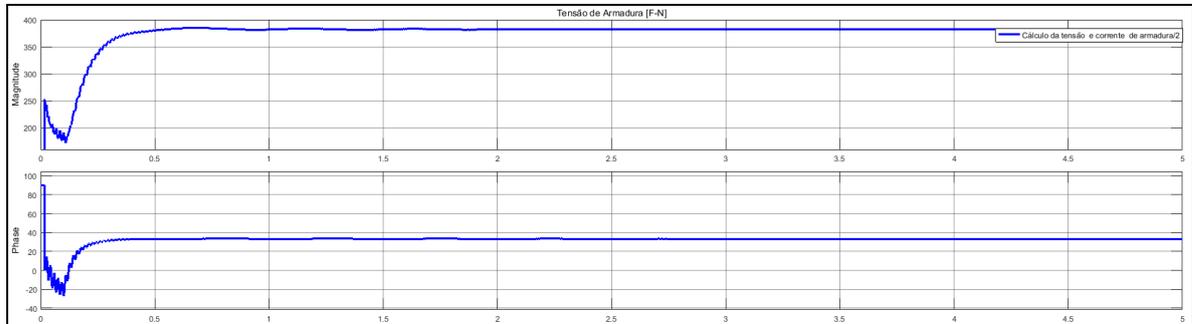


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que a tensão sob a carga pudesse ser ajustada em seu valor nominal, observa-se, através das figuras 43 e 44, o comportamento da máquina

síncrona, para a qual, a corrente de armadura ficou adiantada, revelando assim, que a máquina síncrona está fornecendo potência reativa para o sistema.

Figura 43 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

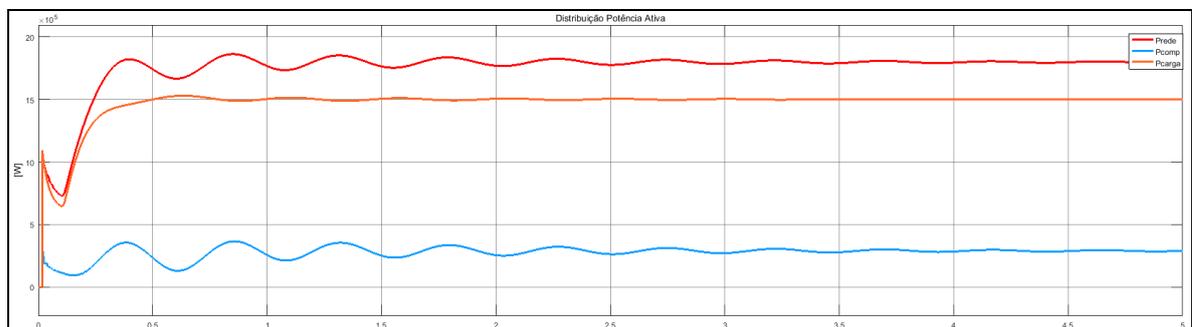
Figura 44 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência ativa no sistema para este ensaio, mostrado na figura 45, demonstra que o compensador consome uma parcela pequena da potência ativa fornecida pela rede.

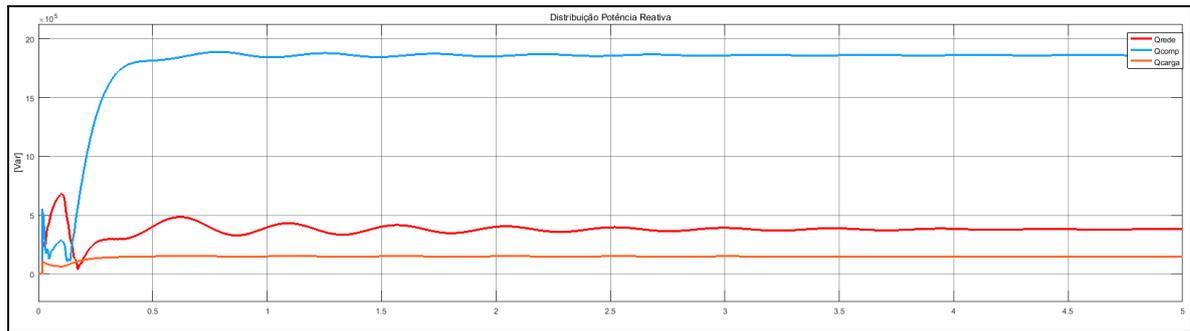
Figura 45 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência reativa, mostrado na figura 46, revela que a potência reativa do sistema é proveniente do compensador síncrono, que se comporta como um grande capacitor.

Figura 46 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 2

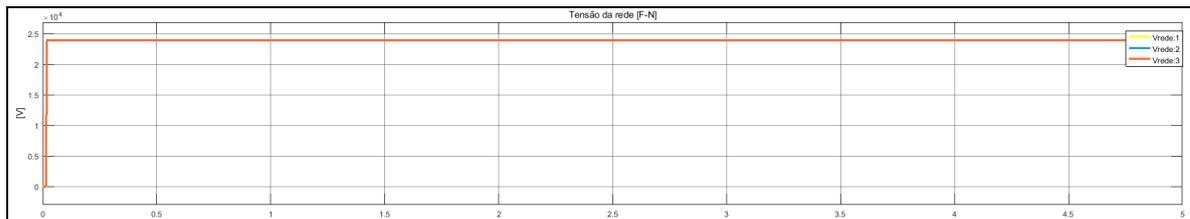


Fonte: Elaborado pelo autor.

c) *Ensaio 3:*

Neste ensaio foi aplicada a tensão da rede acima do valor crítico superior, como pode ser visto na figura 47. Para esta análise, considerar 1500kW e 150kVar (indutivo) referente à carga crítica.

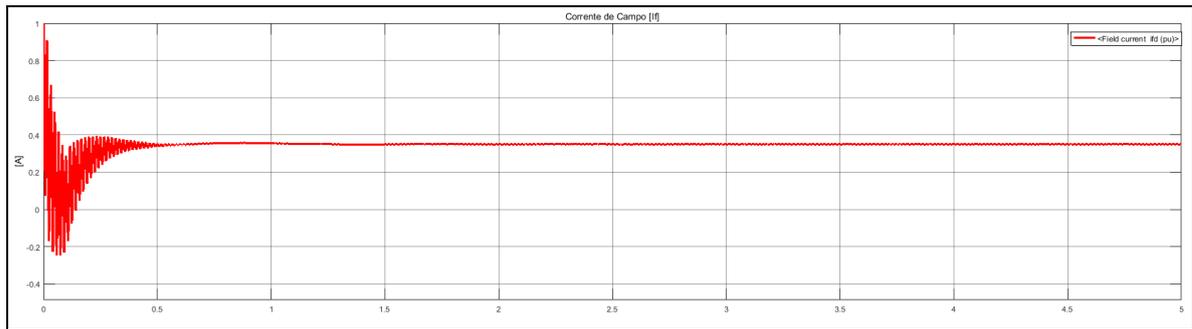
Figura 47 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

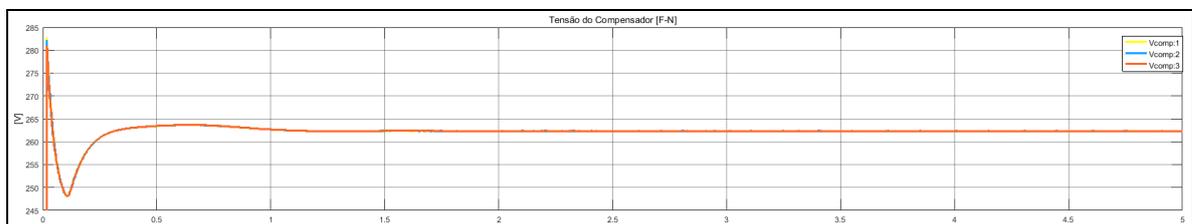
Considerando os ajustes da corrente de campo, figura 48, realizados para manter a tensão na carga com os valores nominais, verifica-se, na figura 49, o comportamento da tensão no compensador, no qual pode-se verificar que a tensão ajustada é inferior ao seu valor nominal, reflexo da baixa excitação do campo. Observa-se que neste ensaio a corrente de campo é muito inferior a corrente de campo do ensaio anterior.

Figura 48 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

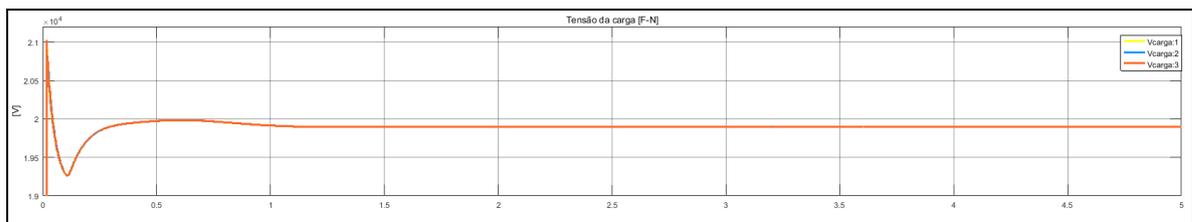
Figura 49 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 50 que a tensão na carga foi regulada no valor nominal esperado.

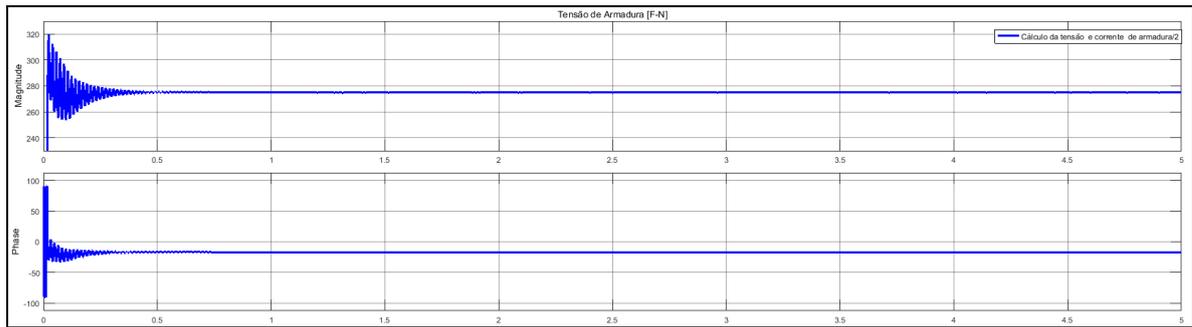
Figura 50 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que a tensão sob a carga pudesse ser ajustada em seu valor nominal, observa-se, através das figuras 51 e 52, o comportamento da máquina síncrona, para a qual, a corrente de armadura ficou atrasada, revelando assim, que a máquina síncrona está consumindo potência reativa do sistema.

Figura 51 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

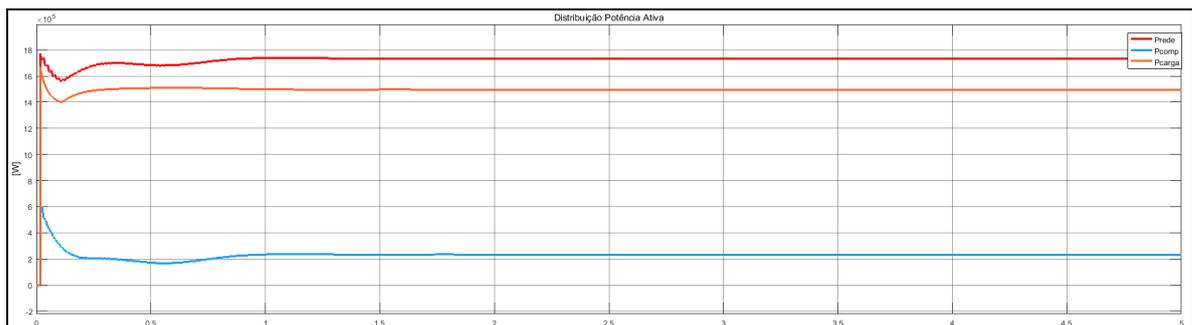
Figura 52 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência ativa do sistema para este ensaio, mostrado na figura 53, demonstra que o compensador consome uma parcela pequena da potência ativa fornecida pela rede.

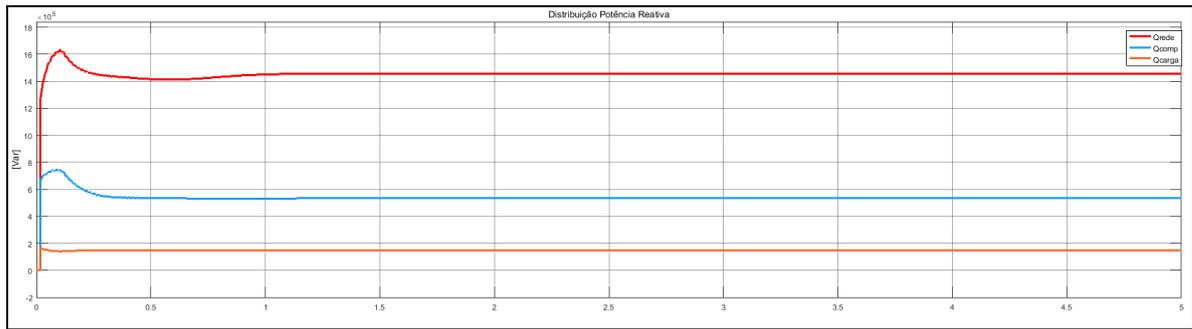
Figura 53 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência reativa, mostrado na figura 54, revela que a potência reativa do sistema é fornecida pela rede.

Figura 54 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 3



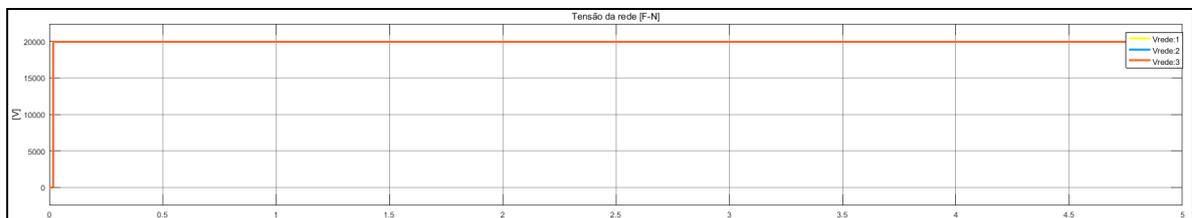
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Comportamento Durante Variações da Carga Crítica

d) *Ensaio 4:*

Neste ensaio foi aplicada a tensão nominal da rede, como pode ser visto na figura 55. Para esta análise, considerar 1500kW e 0kVar referente a carga crítica.

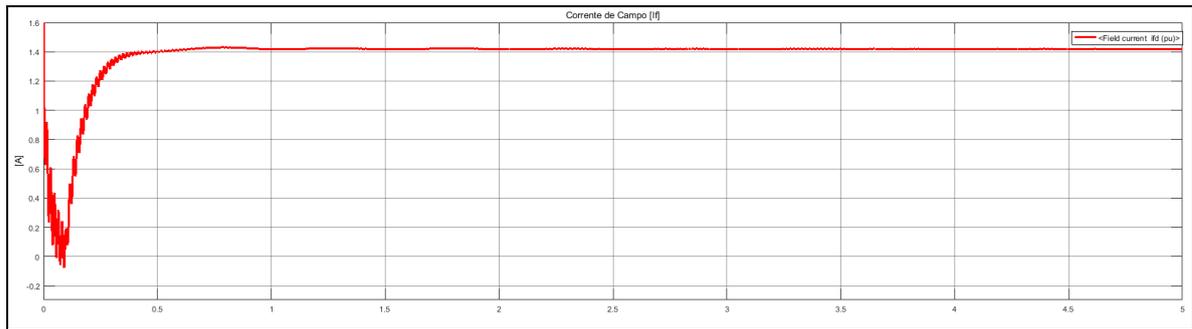
Figura 55 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

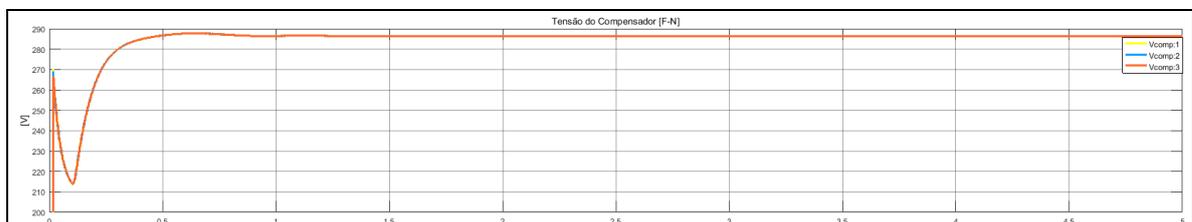
Considerando os ajustes da corrente de campo, figura 56, realizados para manter a tensão na carga com os valores nominais, verifica-se, na figura 57, o comportamento da tensão no compensador, no qual pode-se verificar que a tensão ajustada está muito próxima do valor nominal.

Figura 56 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 58 que a tensão na carga foi regulada no valor nominal esperado.

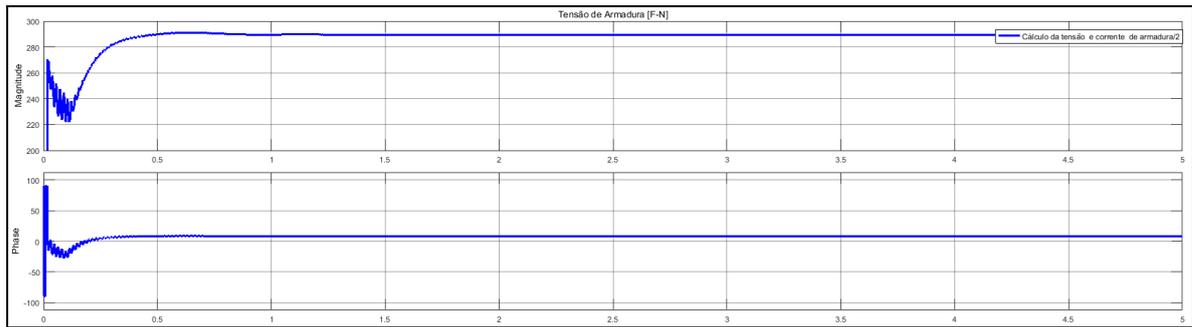
Figura 58 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

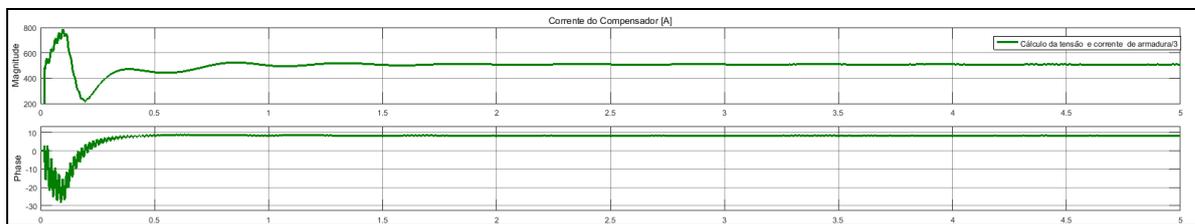
Para que a tensão sob a carga pudesse ser ajustada em seu valor nominal, observa-se, através das figuras 59 e 60, o comportamento da máquina síncrona, para a qual, a corrente de armadura ficou adiantada, revelando assim, que a máquina síncrona está se comportando como uma carga capacitiva, fornecendo potência reativa para o sistema. Em função de a carga aplicada ser puramente resistiva, observa-se que, o ângulo de fase da corrente de armadura é baixo.

Figura 59 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

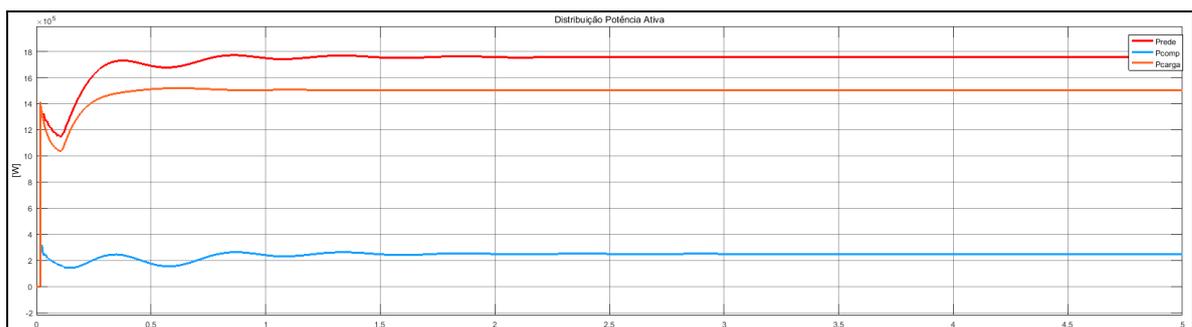
Figura 60 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência ativa do sistema para este ensaio, mostrado na figura 61, demonstra que o compensador consome uma parcela pequena da potência ativa fornecida pela rede.

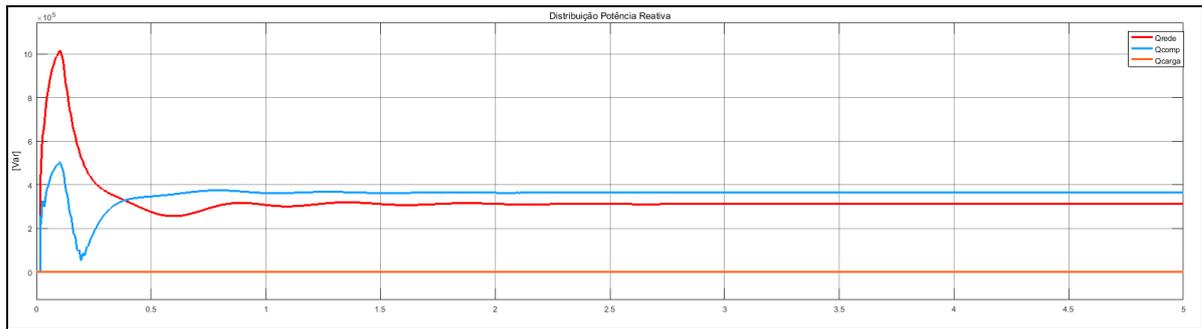
Figura 61 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, a distribuição de potência reativa, mostrado na figura 62, revela que a potência reativa do sistema é baixa, representando somente o efeito dos elementos indutivos que compõe o sistema.

Figura 62 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

e) *Ensaio 5:*

Neste ensaio foi aplicada a tensão nominal da rede, como pode ser visto na figura 63. Para esta análise, considerar 1500kW e 800kVar (indutivo) referente a carga critica.

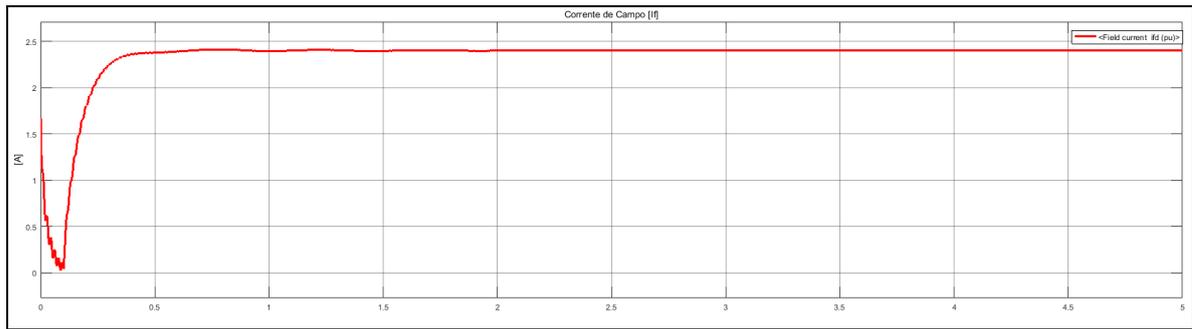
Figura 63 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

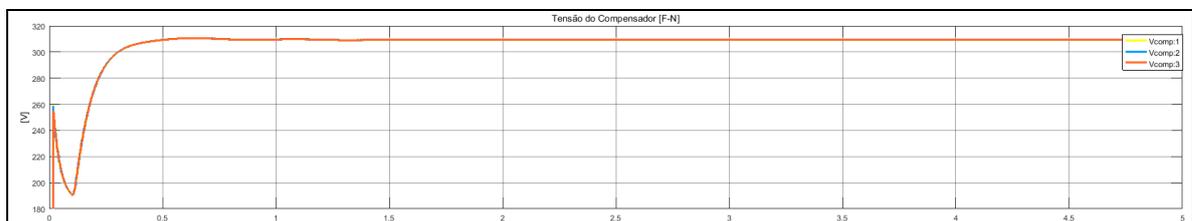
Considerando os ajustes da corrente de campo, figura 64, realizados para manter a tensão na carga com os valores nominais, verifica-se, na figura 65, o comportamento da tensão no compensador, no qual pode-se verificar que a tensão ajustada está acima do valor nominal, reflexo da excitação de campo que está mais alta.

Figura 64 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

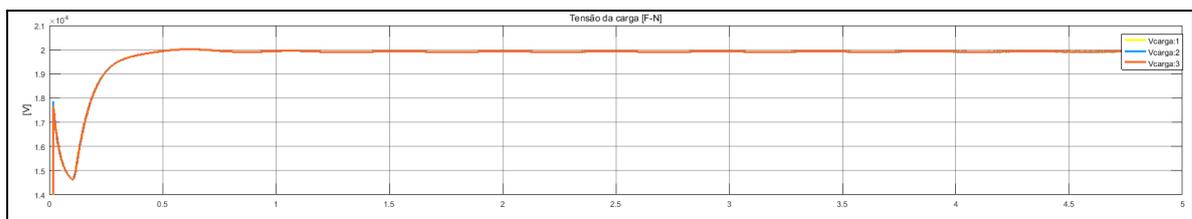
Figura 65 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 66 que a tensão na carga foi regulada no valor nominal esperado.

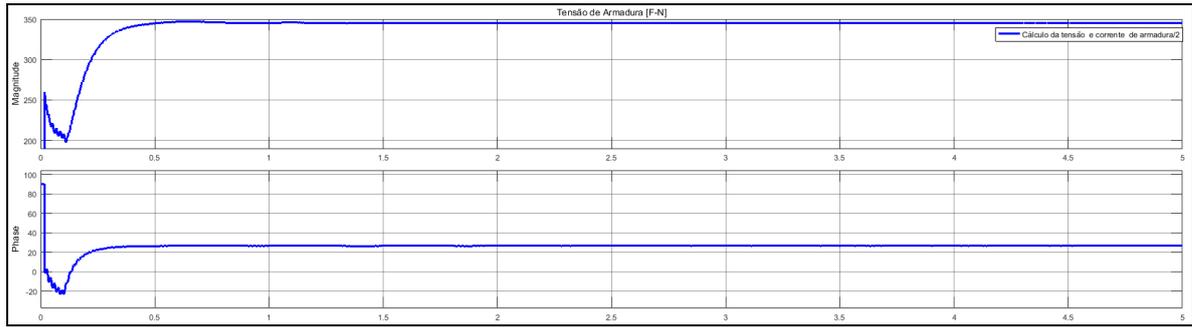
Figura 66 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

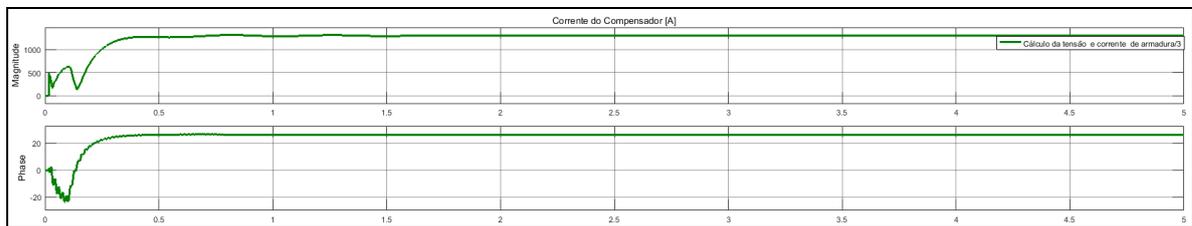
Para que a tensão sob a carga pudesse ser ajustada em seu valor nominal, observa-se, através das figuras 67 e 68, o comportamento da máquina síncrona, para a qual, a corrente de armadura ficou adiantada, revelando assim, que a máquina síncrona está se comportando como uma carga capacitiva, fornecendo potência reativa para o sistema.

Figura 67 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

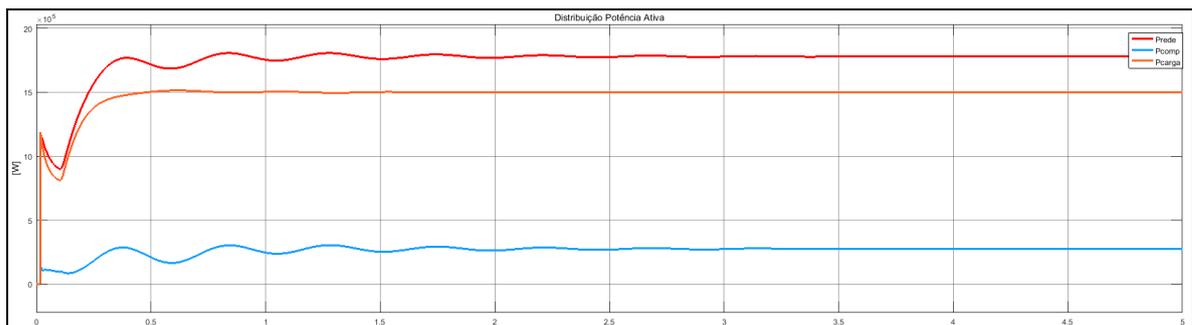
Figura 68 - Comportamento da corrente do compensador para o ensaio 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência ativa do sistema para este ensaio, mostrado na figura 69, demonstra que o compensador consome uma parcela pequena da potência ativa fornecida pela rede.

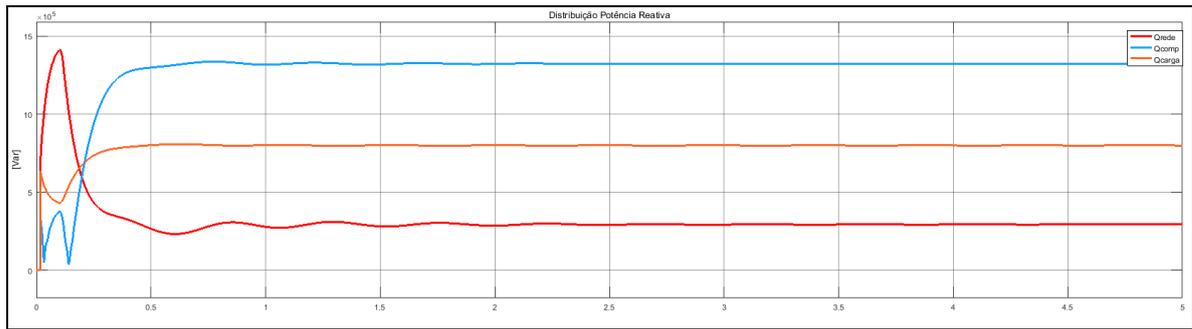
Figura 69 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência reativa, mostrado na figura 70, revela que a potência reativa do sistema é fornecida pelo compensando.

Figura 70 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 5

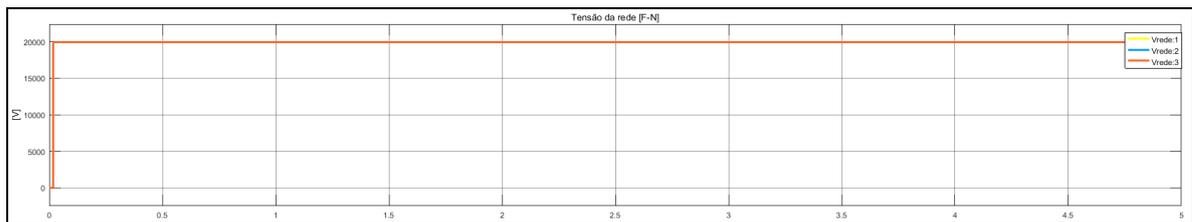


Fonte: Elaborado pelo autor.

f) *Ensaio 6:*

Neste ensaio foi aplicada a tensão nominal da rede, como pode ser visto na figura 71. Para esta análise, considerar 1500kW e 800kVar (capacitivo) referente à carga crítica.

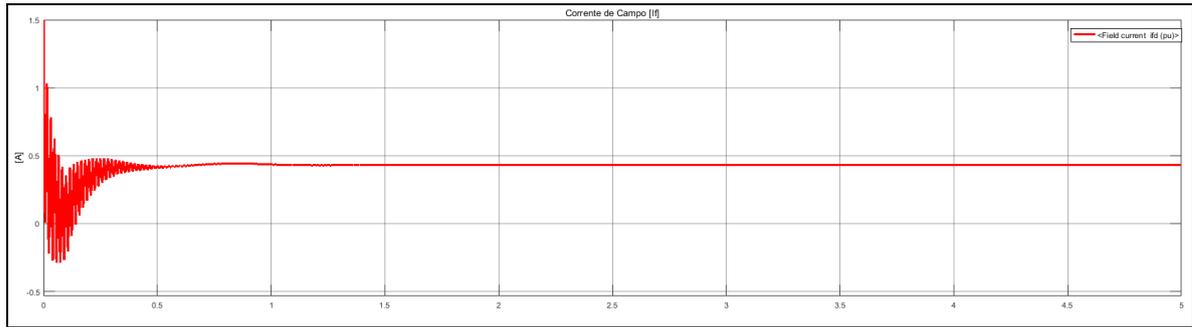
Figura 71 - Comportamento da tensão da rede para o ensaio 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

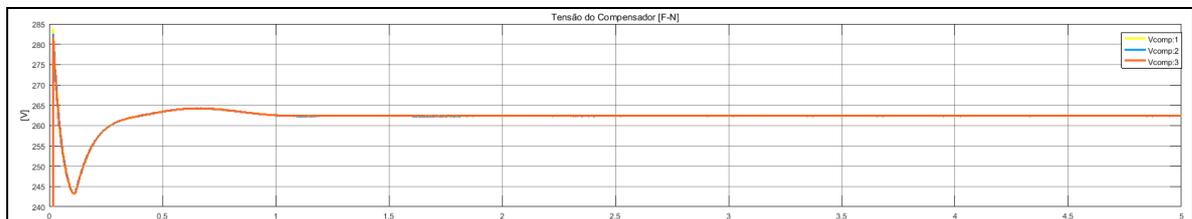
Considerando os ajustes da corrente de campo, figura 72, realizados para manter a tensão na carga com os valores nominais, verifica-se, na figura 72, o comportamento da tensão no compensador, no qual pode-se verificar que a tensão ajustada está abaixo do valor nominal, reflexo da excitação de campo que está mais baixa.

Figura 72 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

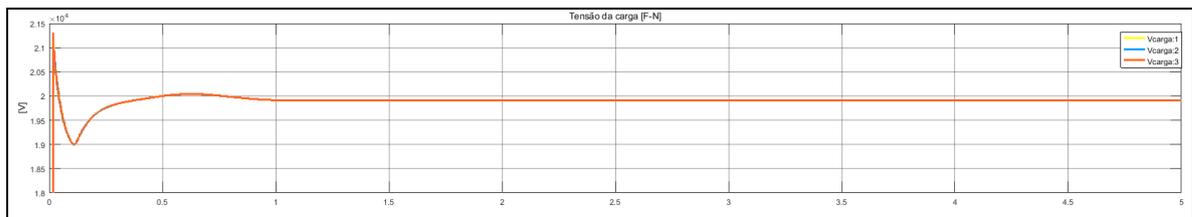
Figura 73 - Comportamento da tensão do compensador para o ensaio 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 74, que a tensão na carga foi regulada no valor nominal esperado.

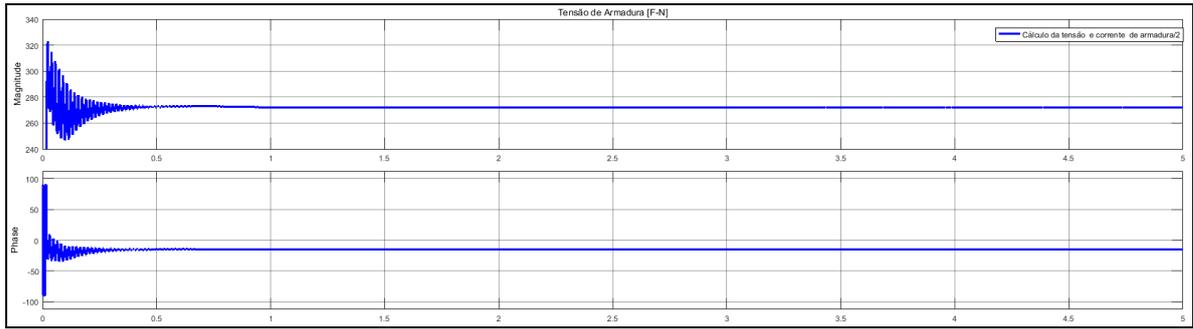
Figura 74 - Comportamento da tensão da carga para o ensaio 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

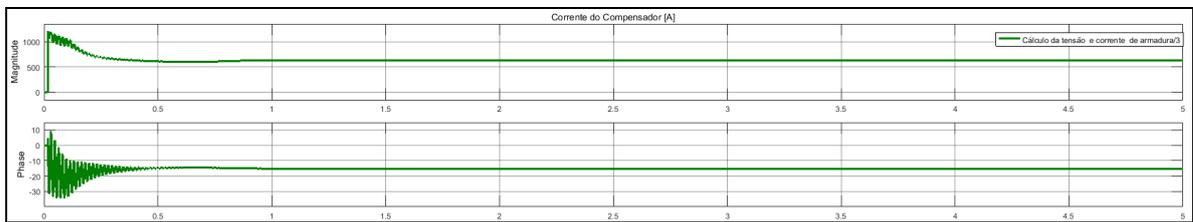
Para que a tensão sob a carga pudesse ser ajustada em seu valor nominal, observa-se, através das figuras 75 e 76, o comportamento da máquina síncrona, para a qual, a corrente de armadura ficou atrasada, revelando assim, que a máquina síncrona está se comportando como uma carga indutiva, consumindo potência reativa do sistema.

Figura 75 - Comportamento da tensão de armadura para o ensaio 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

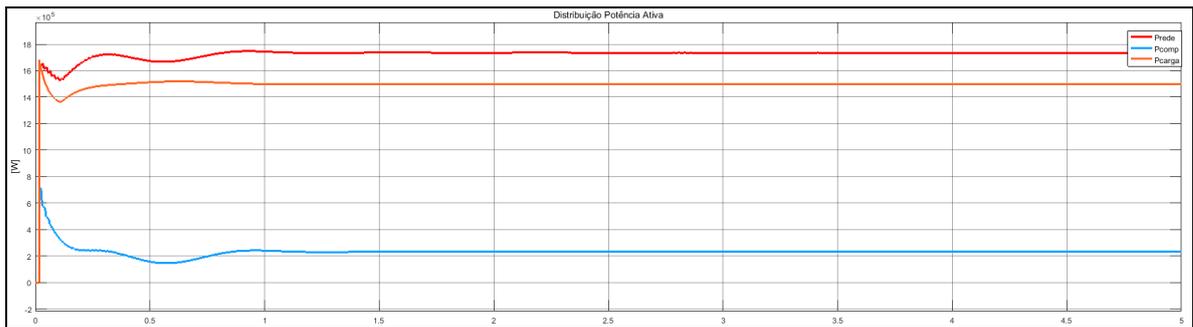
Figura 76 - Comportamento da corrente de campo para o ensaio 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência ativa do sistema para este ensaio, mostrado na figura 77, demonstra que o compensador consome uma parcela pequena da potência ativa fornecida pela rede.

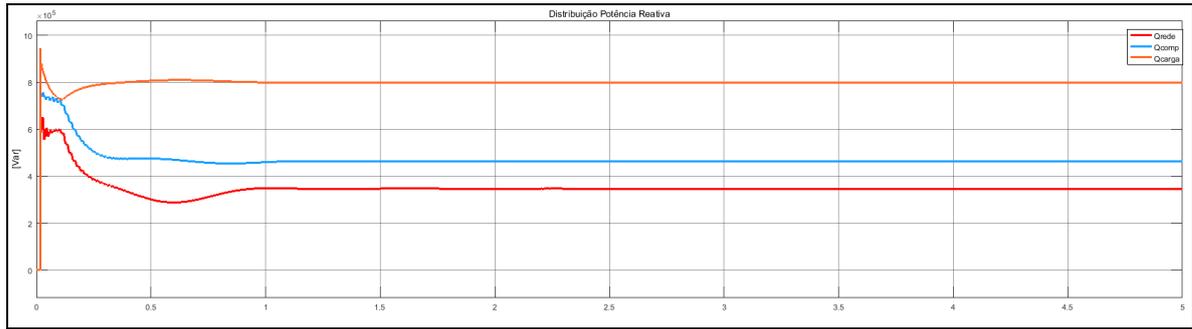
Figura 77 - Distribuição de potência ativa no sistema para o ensaio 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de potência reativa, mostrado na figura 78, revela que a potência reativa do sistema é proveniente da carga.

Figura 78 - Distribuição de potência reativa no sistema para o ensaio 6



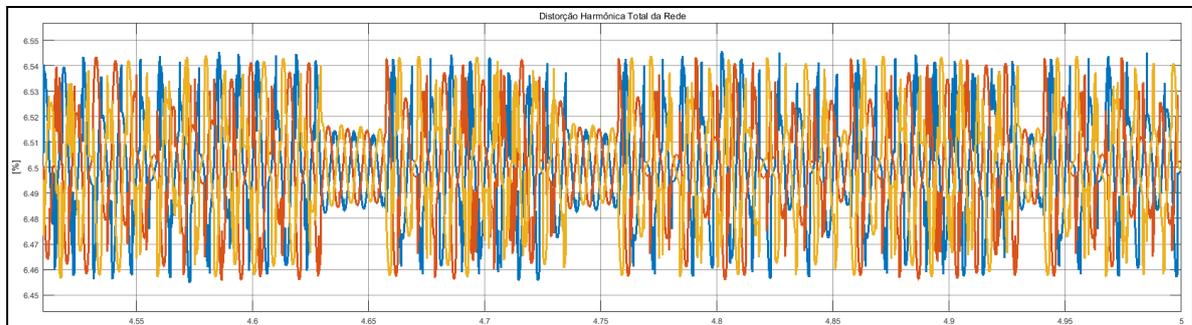
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Comportamento do Bloqueador de Sequência Zero

g) *Ensaio 7:*

Neste ensaio foi aplicada a tensão nominal da rede com Distorção Harmônica Total de 6,5%, conforme pode ser verificado na figura 79, e com a carga crítica definida de 1500kW e 150kVar (indutivo).

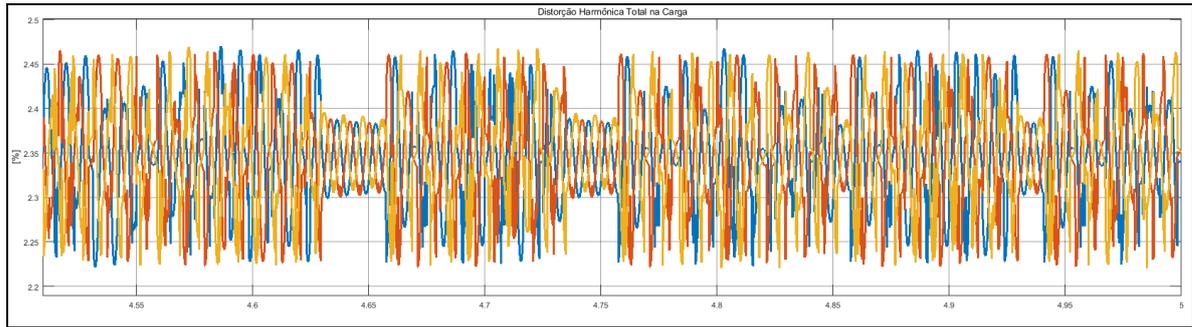
Figura 79 - Distorção Harmônica Total de Tensão na Rede pelo PRODIST



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distorção sobre a carga, mostrada na figura 80, confirma a capacidade do sistema em filtrar harmônicas múltiplas de 3. A distorção sobre a carga ficou inferior a 2,5%.

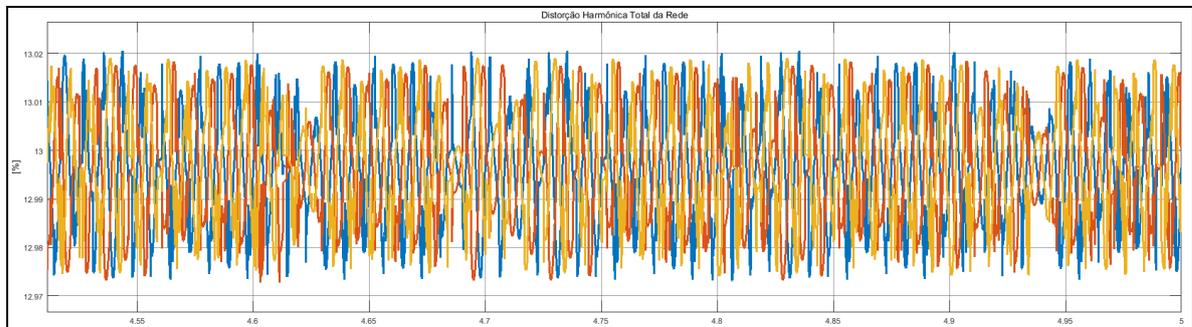
Figura 80 - Distorção Harmônica Total de Tensão na Carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

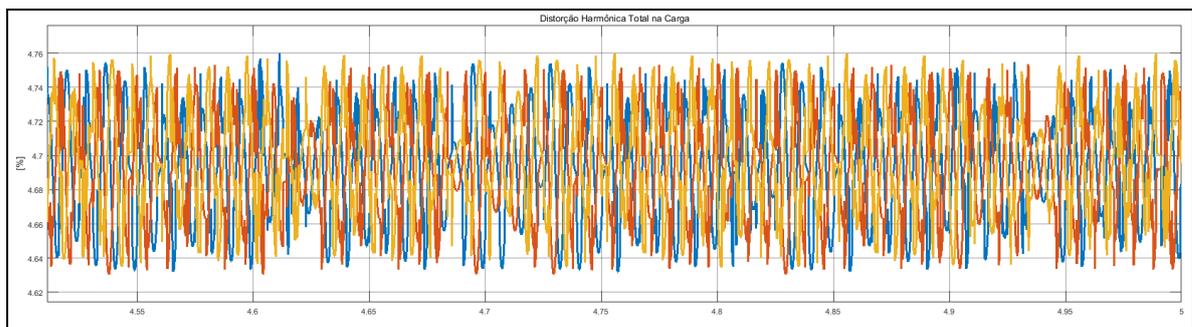
Para verificar a eficiência do sistema, a Distorção Harmônica Total de Tensão da rede foi extrapolada, aumentando para 13%, conforme figura 81. A distorção sobre a carga, mostrada na figura 82, ficou no limite especificado pela norma, mas ainda assim, reforça a capacidade que o sistema possui em filtrar harmônicas múltiplas de 3. A distorção sobre a carga ficou inferior a 4,8%, atendendo a norma, conforme tabela 2, que se refere às definições do PRODIST, para fornecimento em 34,5kV, a DHT deve ser de até 5%.

Figura 81 - Distorção Harmônica Total de Tensão da Rede extrapolado



Fonte: Elaborado pelo autor.

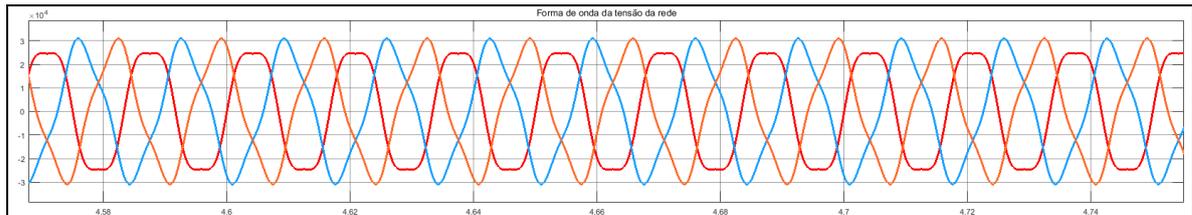
Figura 82 - Limite de Distorção Harmônica Total de Tensão na Carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto as formas de onda da tensão da rede e carga, nas figuras 83 e 84, respectivamente, mostram que a distorção da tensão na carga é muito inferior a da rede, devido ao efeito do Bloqueador de Sequência-Zero, que oferece uma reatância elevada para as frequências altas, impedindo estas de chegarem a carga.

Figura 83 - Forma de onda da tensão da rede



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 84 - Forma de onda da tensão sob a carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.4 Comportamento Durante Faltas de Curta Duração

h) *Ensaio 8:*

Este ensaio simula uma falta de curta duração da rede, com interrupção de 100 milisegundos, como pode ser visto na figura 85.

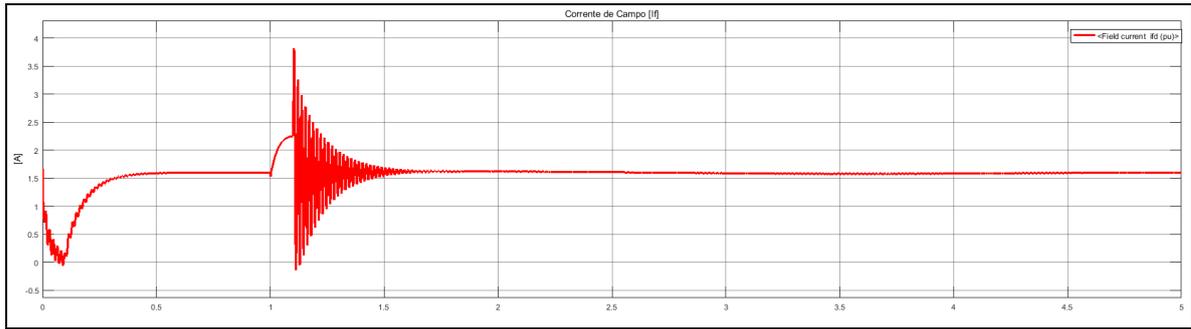
Figura 85 - Interrupção de tensão da rede para o ensaio 8



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a interrupção da rede, a corrente de campo da máquina síncrona é aumentada, como é mostrado na figura 86, para corrigir a tensão sob a carga.

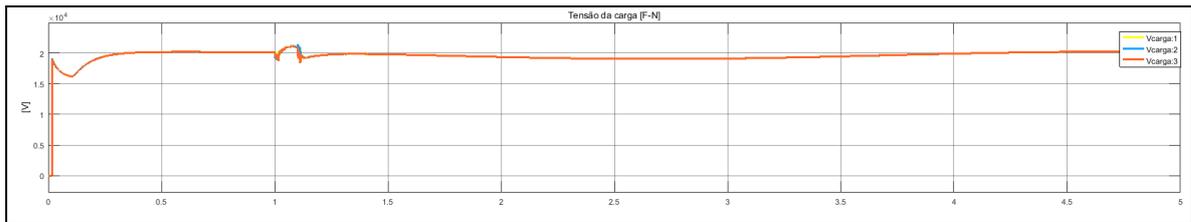
Figura 86 - Comportamento da corrente de campo no ensaio 8



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 87, que a tensão na carga sofreu uma pequena oscilação, e manteve-se no valor nominal esperado e sem interrupção.

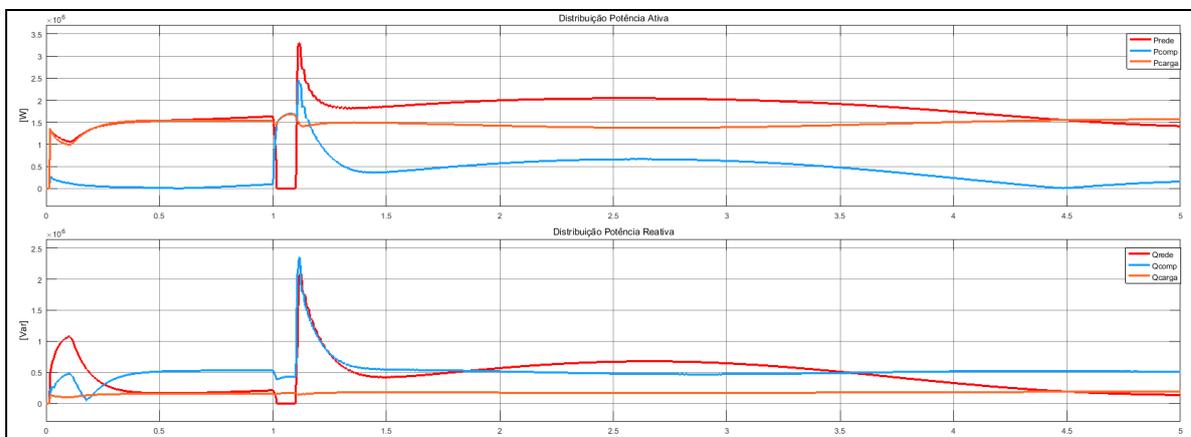
Figura 87 - Comportamento da tensão sob a carga no ensaio 8



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 88, observa-se que, durante a falta de curta duração, a UPS fornece potência ativa para carga, suprindo a falta da rede.

Figura 88 - Comportamento da carga para o ensaio 8



Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência ativa fornecida pela UPS para carga faz com que, a rotação da máquina síncrona seja reduzida, como pode ser visto na figura 89, desta forma, verifica-se que, o conjugado mecânico da máquina síncrona que produziu energia, é proveniente da energia cinética do sistema.

Figura 89 - Comportamento da frequência da UPS no ensaio 8

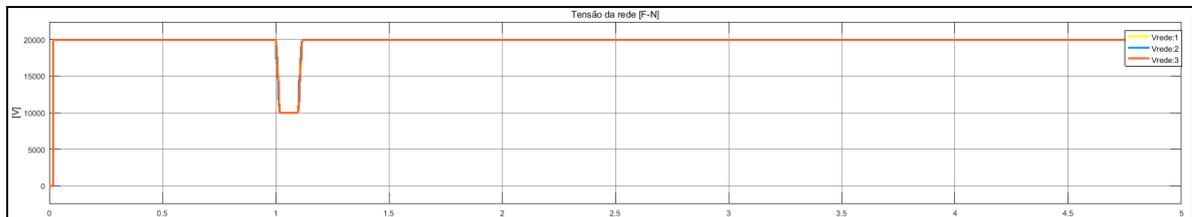


Fonte: Elaborado pelo autor.

i) *Ensaio 9:*

Este ensaio simula um afundamento de tensão de 0.5 pu da rede, com duração de 100 milissegundos, como pode ser visto na figura 89.

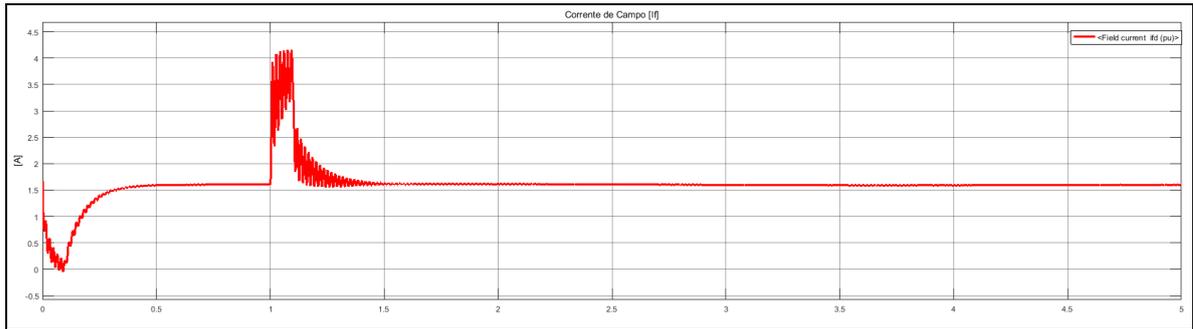
Figura 90 - Afundamento de tensão da rede para o ensaio 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o afundamento de tensão da rede, a corrente de campo da máquina síncrona é aumentada, como é mostrado na figura 91, para corrigir a tensão sob a carga.

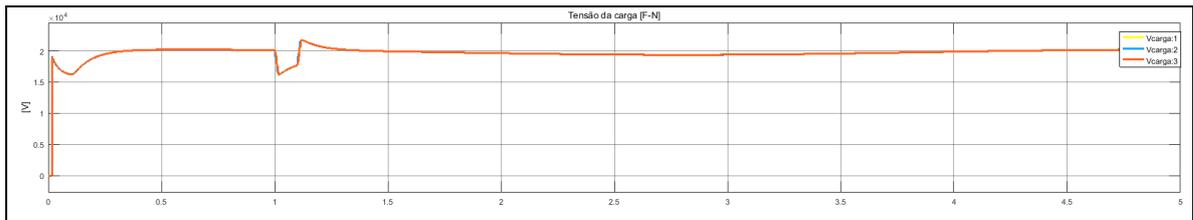
Figura 91 - Comportamento da corrente de campo no ensaio 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 92, que a tensão na carga apresentou afundamento de tensão inferior ao afundamento da rede que retornou para o valor nominal estabilizando a tensão.

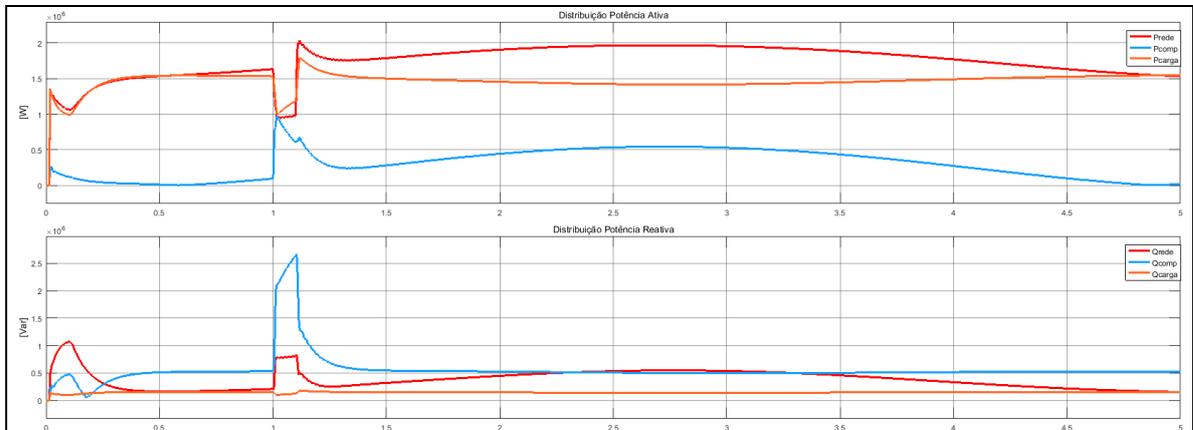
Figura 92 - Comportamento da tensão sob a carga no ensaio 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 93, observa-se que, durante o afundamento de tensão da rede, a UPS fornece potência ativa para carga, suprindo a falta da rede.

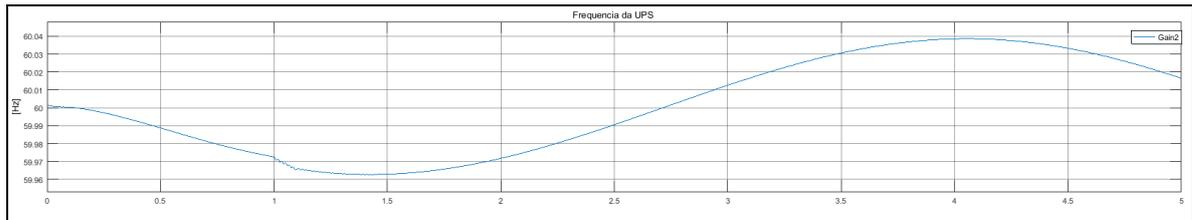
Figura 93 - Comportamento da carga no ensaio 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

A frequência da UPS, diferentemente do ensaio anterior, sofreu uma pequena variação durante o afundamento de tensão da rede, como pode ser visto na figura 94. O afundamento de tensão da rede é compensado pela excitação da máquina síncrona, desta forma, é exigido pouco da energia cinética do sistema.

Figura 94 - Comportamento da frequência da UPS no ensaio 9

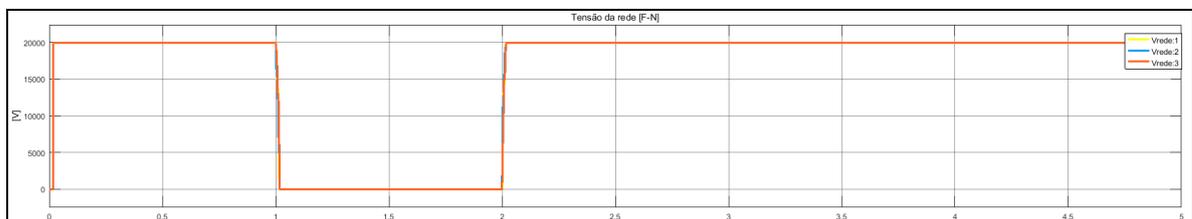


Fonte: Elaborado pelo autor.

j) *Ensaio 10:*

Este ensaio simula uma falta de curta duração da rede, com interrupção de 1 segundo, como pode ser visto na figura 95.

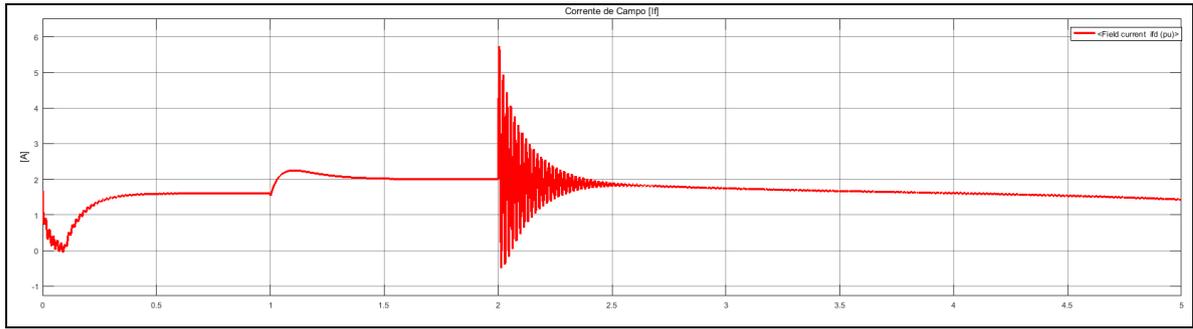
Figura 95 - Interrupção de tensão da rede para o ensaio 10



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a interrupção da rede, a corrente de campo da máquina síncrona é aumentada, como é mostrado na figura 96, para corrigir a tensão sob a carga.

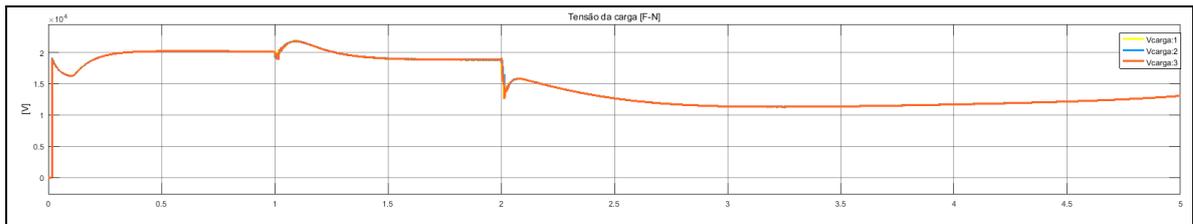
Figura 96 - Comportamento da corrente de campo no ensaio 10



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 97, que a tensão na carga sofreu uma pequena oscilação, e manteve-se próximo do valor nominal sem interrupção durante a interrupção.

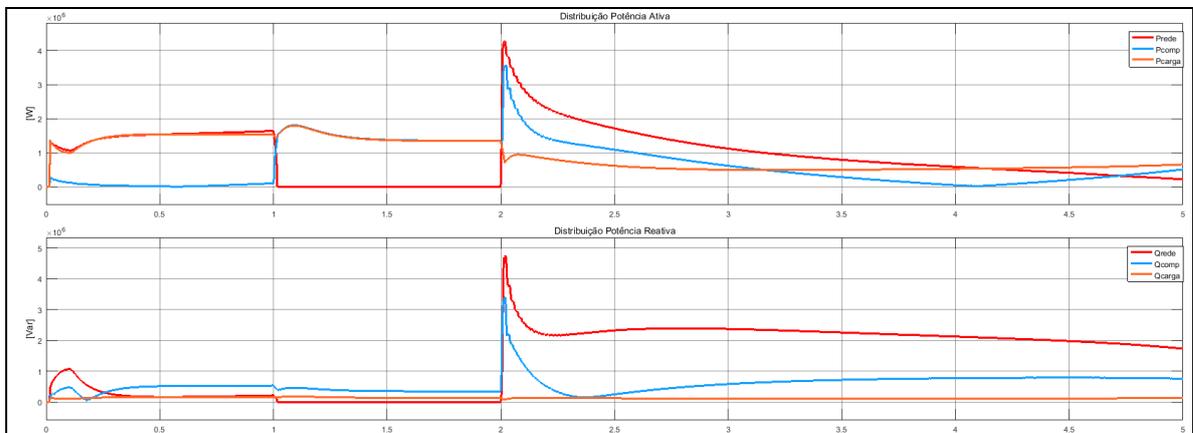
Figura 97 - Comportamento da tensão sob a carga no ensaio 10



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 98, observa-se que, durante a falta de curta duração, a UPS fornece potência ativa para carga, suprindo a falta da rede.

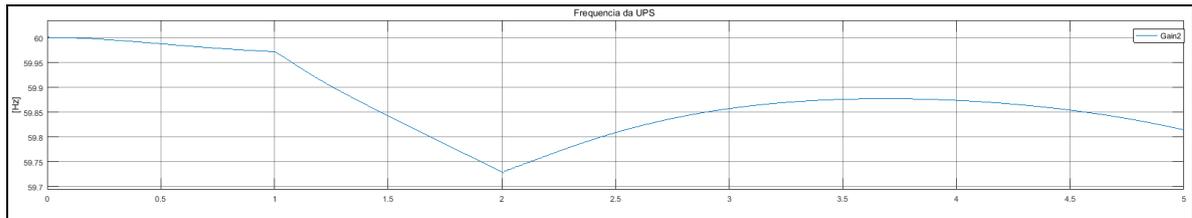
Figura 98 - Comportamento da carga no ensaio 10



Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência ativa fornecida pela UPS para carga faz com que, a rotação da máquina síncrona seja reduzida, influenciando a frequência de forma mais acentuada, como pode ser visto na figura 99, desta forma, verifica-se que, do mesmo modo que ocorreu no ensaio 8, o conjugado mecânico da máquina síncrona que produziu energia, é proveniente da energia cinética do sistema.

Figura 99 - Comportamento da frequência da UPS no ensaio 10

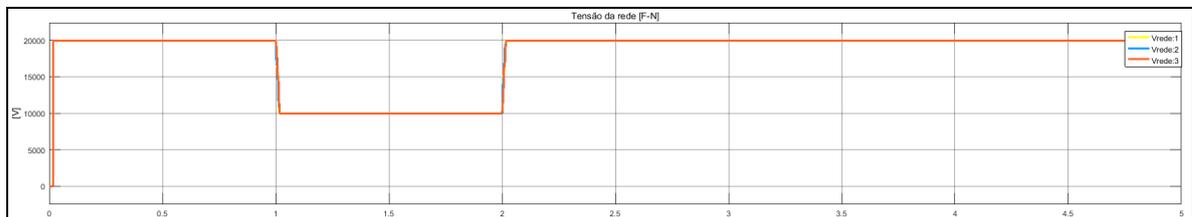


Fonte: Elaborado pelo autor.

k) *Ensaio 11:*

Este ensaio simula um afundamento de tensão de 0.5 pu da rede, com duração de 1 segundo, como pode ser visto na figura 100.

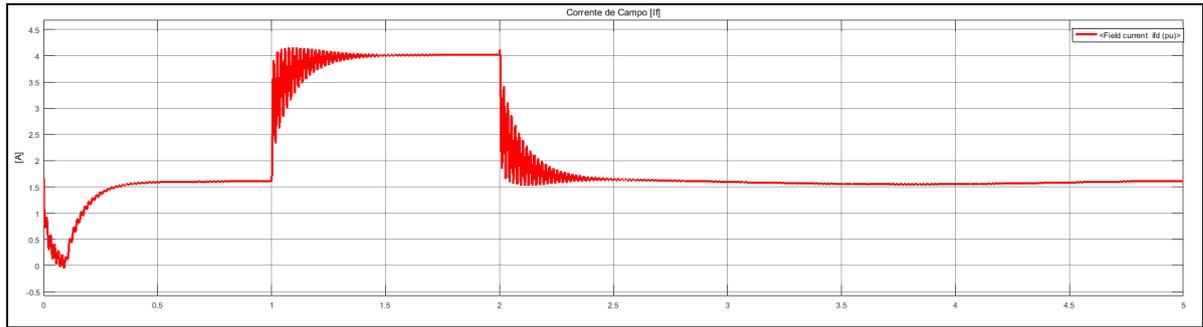
Figura 100 - Afundamento de tensão da rede para o ensaio 11



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o afundamento de tensão da rede, a corrente de campo da máquina síncrona é aumentada, como é mostrado na figura 101, para corrigir a tensão sob a carga.

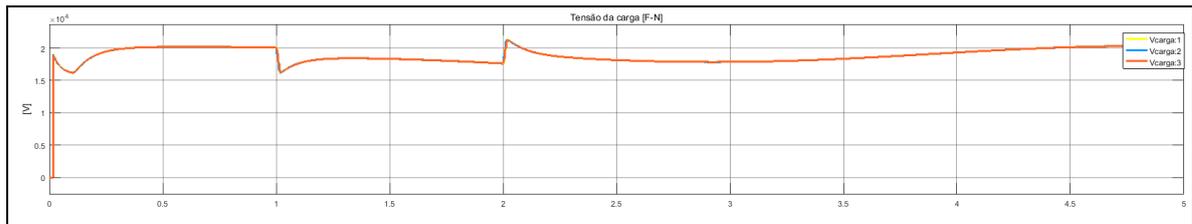
Figura 101 - Comportamento da corrente de campo no ensaio 11



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, verifica-se, na figura 102, que a tensão na carga apresentou afundamento de tensão inferior ao afundamento da rede que retornou para o valor nominal estabilizando a tensão.

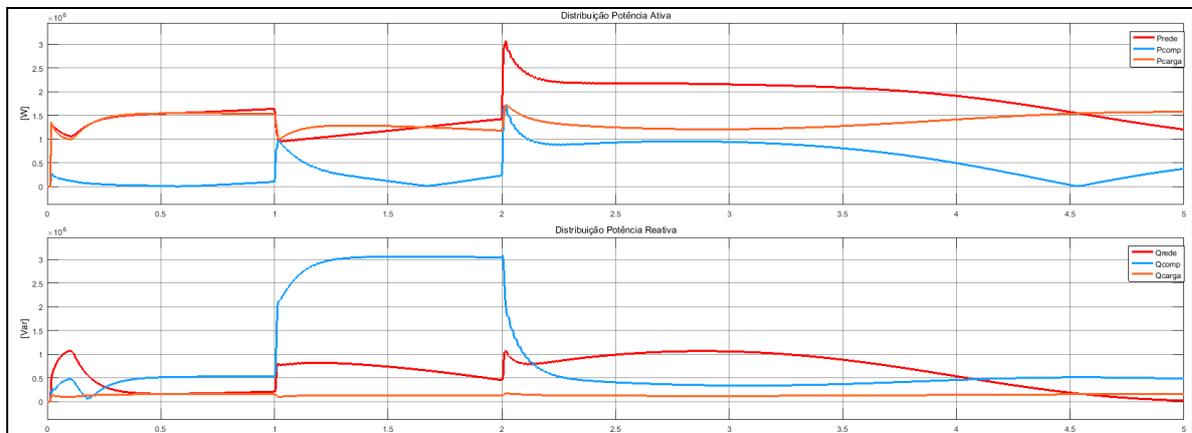
Figura 102 - Comportamento da tensão sob a carga no ensaio 11



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 103, observa-se que, durante o afundamento de tensão da rede, a UPS fornece potência ativa para carga, suprindo a falta da rede.

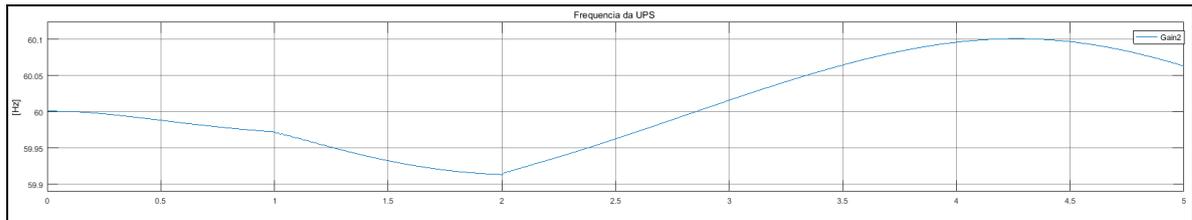
Figura 103 - Comportamento da carga no ensaio 11



Fonte: Elaborado pelo autor.

A frequência da UPS, assim como aconteceu no ensaio 9, sofreu uma pequena variação durante o afundamento de tensão da rede, como pode ser visto na figura 104. O afundamento de tensão da rede é compensado pela excitação da máquina síncrona, desta forma, é exigido pouco da energia cinética do sistema e sem apresentar influência significativa na frequência.

Figura 104 - Comportamento da frequência da UPS no ensaio 11



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios realizados com o modelo visam demonstrar através dos resultados como o sistema se comporta diante do cenário aplicado. A tabela 7 mostra o comportamento da máquina síncrona quando exposta à variações de tensão da rede. Por certo, conforme já visto na revisão bibliográfica, verifica-se que a máquina síncrona pode se comportar como uma carga capacitiva estando com a sua corrente de armadura adiantada, resultado que foi obtido no ensaio 2 com a tensão da rede muito abaixo da nominal e também, pode se comportar como uma carga indutiva estando sua corrente de armadura atrasada, resultado obtido no ensaio 3 com a tensão da rede muito acima da nominal. Para estes ensaios verifica-se que a máquina síncrona opera sobre-excitada e sub-excitada respectivamente, condição que é revelada pela tensão de armadura que é reflexo da corrente de campo. Para o ensaio 1 a máquina síncrona foi excitada o suficiente para regular a tensão sob a carga compensando a queda de tensão no sistema.

Tabela 7 - Resumo dos resultados dos ensaios de 1 a 3

Ensaio	Tensão da rede F-N [pu]	Carga Crítica			Máquina Síncrona						
		Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVar]	Tipo de carga	Tensão de armadura [V]	Corrente e armadura		Comportamento	Fator de Potência	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVar]
						Magnitude [v]	Fase [°]				
1	1	1500	150	Indutivo	298	650	11	Capacitivo	0.98	230	520
2	0.8	1500	150	Indutivo	380	1620	37	Capacitivo	0.80	300	1800
3	1.2	1500	150	Indutivo	275	700	-18	Indutiva	0.95	220	550

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diferente dos resultados mostrados na tabela anterior, tem-se o comportamento da máquina síncrona, mostrado na tabela 8, para variações na carga crítica. O ensaio 4 nos mostra que a corrente de armadura está levemente adiantada, reflexo dos componentes indutivos dos sistema e da carga resistiva, ou seja, sem componente reativo na carga. Para os ensaios 5 e 6, pode ser visto que a máquina síncrona se comporta de forma oposta à carga para desta forma, compensar a componente reativa.

Tabela 8 - Resumo dos resultados dos ensaios de 4 a 6

Ensaio	Tensão da rede F-N [pu]	Carga Crítica			Máquina Síncrona						
		Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVar]	Tipo de carga	Tensão de armadura [V]	Corrente e armadura		Comportamento	Fator de Potência	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVar]
						Magnitude [v]	Fase [°]				
4	1	1500	0	-	270	500	8	Capacitivo	0.99	230	350
5	1	1500	800	Indutivo	345	1300	25	Capacitivo	0.90	250	1300
6	1	1500	800	Capacitivo	275	600	-15	Indutiva	0.96	230	470

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim também, como visto na revisão bibliográfica, pode ser visto que a potência ativa da máquina síncrona, independentemente da corrente de campo, ou por consequência da tensão de armadura, não sofre variações.

Dando continuidade a análise de resultados, verifica-se a tabela 9, na qual estão apresentados os resultados do ensaio 7.

Tabela 9 - Resultados do ensaio 7

Ensaio	Ordem da harmônica	Entrada de Rede DHT [%]	Medição na carga DHT [%]
7	3	6.5	< 2.5
		13	< 4.8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes resultados revelam a ação do bloqueador de sequência zero para as harmônicas múltiplas de 3. Verifica-se que a distorção sob a carga é muito inferior a entrada, devido a ação do bloqueador.

Por fim, para finalizar a análise de resultados, é mostrado na tabela 16 a corrente de campo e a tensão sob a carga para os ensaios de 8 a 11.

Tabela 10 - Resumo dos resultados dos ensaios de 8 a 11

Ensaio	Tempo de interrupção [S]	Variação de tensão [pu]	Tensão de linha da rede [kV]	Tensão de fase da rede [kV]	Antes do evento		Durante o evento	
					Corrente de campo [A]	Tensão de fase sob a carga [kV]	Corrente de campo [A]	Tensão de fase sob a carga [kV]
8	0.1	0	0	0	1.6	20	2.3	20.2
9	0.1	0.5	17.25	9.96	1.6	20	3.9	> 17 e < 22
10	1.0	0	0	0	1.6	20	2	> 18 e < 23
11	1.0	0.5	17.25	9.96	1.6	20	4	> 17 e < 22

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível ver que nos ensaios 8 e 10 a corrente de campo é baixa, sendo suficiente para regular a tensão sob a carga durante o evento. Já para os ensaios 9 e 11, verifica-se que a corrente de campo durante o evento é muito superior, devido ao afundamento de tensão da rede.

3.5 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES NO SISTEMA REAL

Nesta etapa, serão analisadas as medições do sistema real para confrontar com os dados obtidos nos ensaios realizados com o modelo e consolidar os conceitos da revisão bibliográfica. As medições para análise da energia elétrica foram realizadas com o analisador de energia RE6000, da EMBRASUL, com intervalo de aquisição de 100 milissegundos. As medições ocorreram durante o período de 22/10/2018 até 26/10/2018. Neste período foram registradas as grandezas necessárias para verificar o comportamento do sistema

UPS na instalação que é foco deste estudo de caso. Em 29/10/2018, foram realizadas novas medições durante testes com carga para verificar como o sistema UPS se comporta alimentando a carga.

3.5.1 Análise das Medições

Inicialmente, verifica-se que a tensão da rede na entrada do sistema UPS apresenta muitas oscilações como pode ser visto na figura 105.

Figura 105 - Comportamento da tensão da rede na entrada do sistema UPS

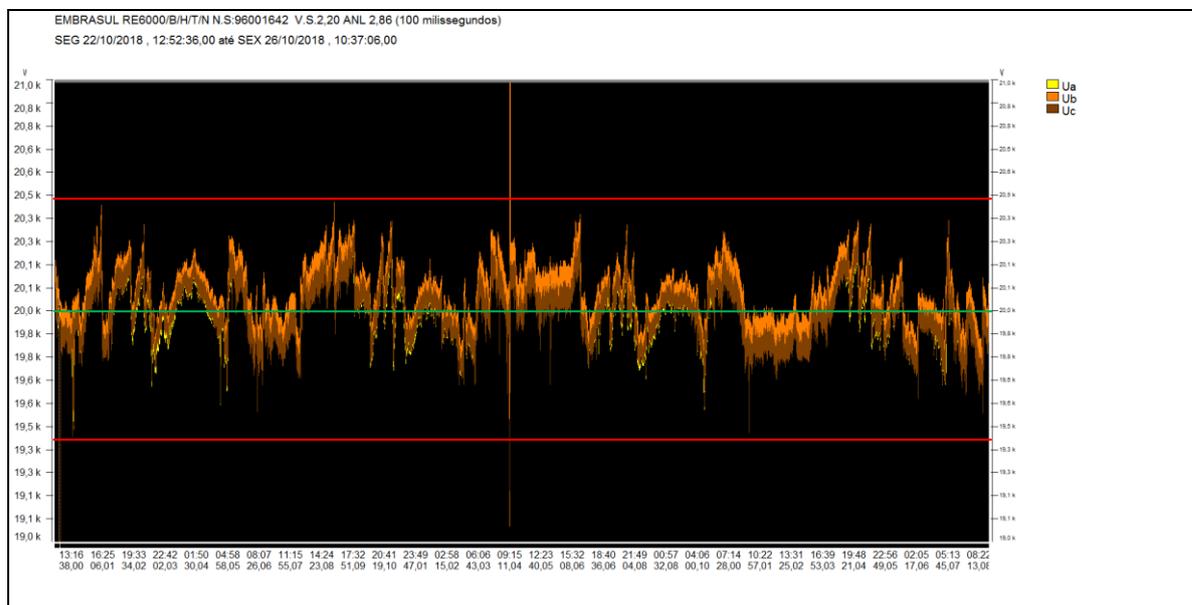
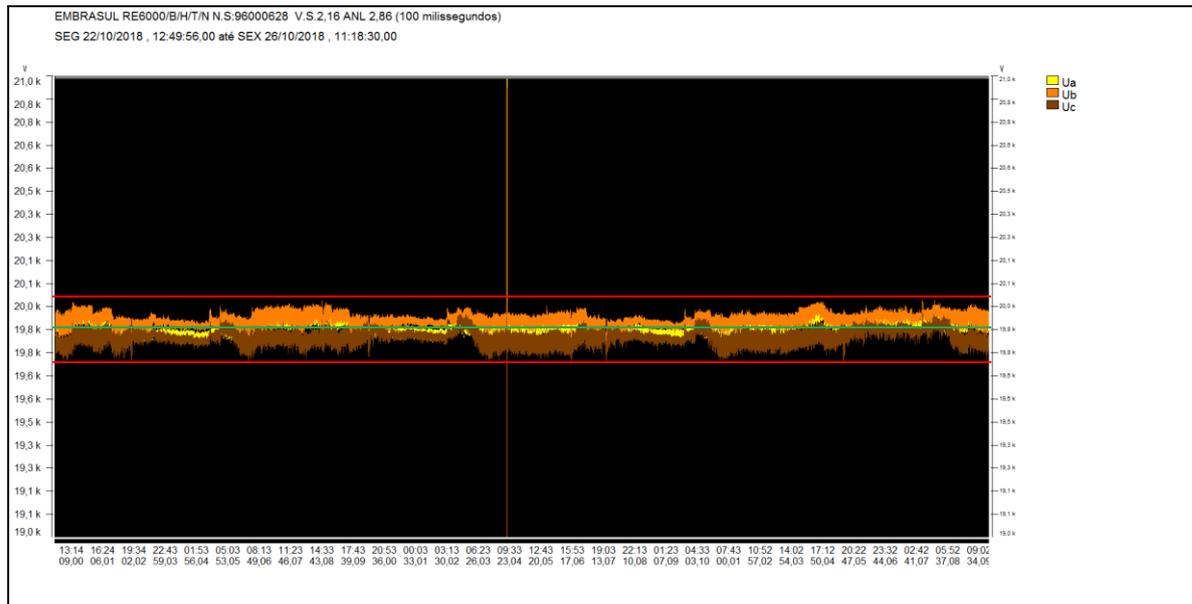


Figura 106 - Comportamento da tensão sob a carga na saída do sistema UPS

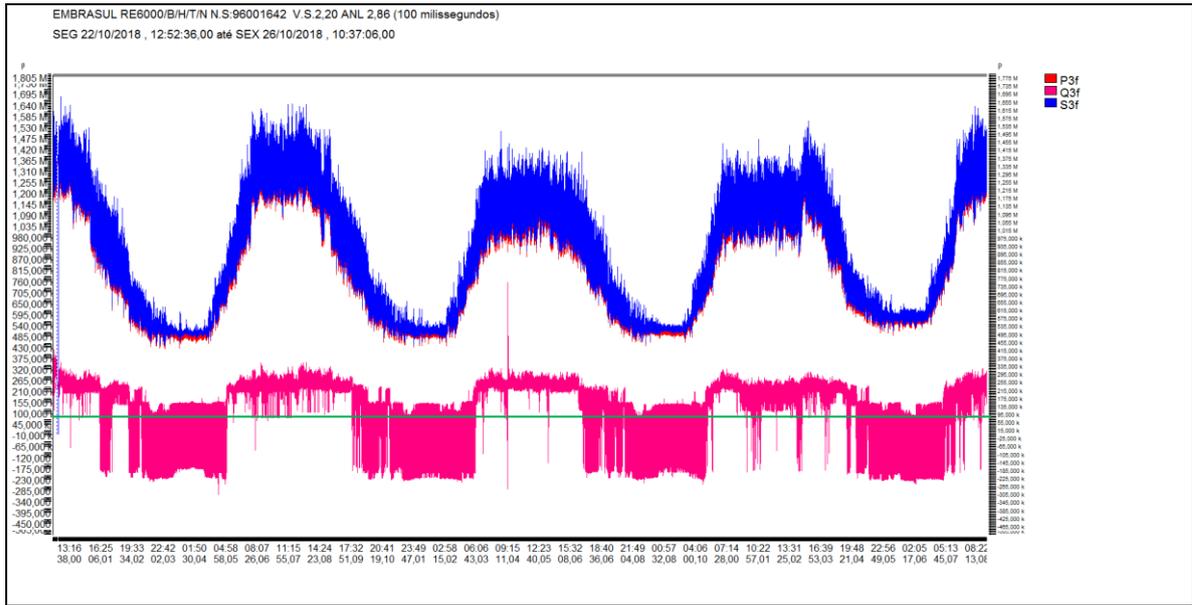


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o mesmo intervalo de medição, a tensão sob a carga sofre pequenas oscilações e seu valor médio é de 19,8kV, o valor mínimo atingiu 19,7kV e o valor máximo atingiu 20,05kV aproximadamente.

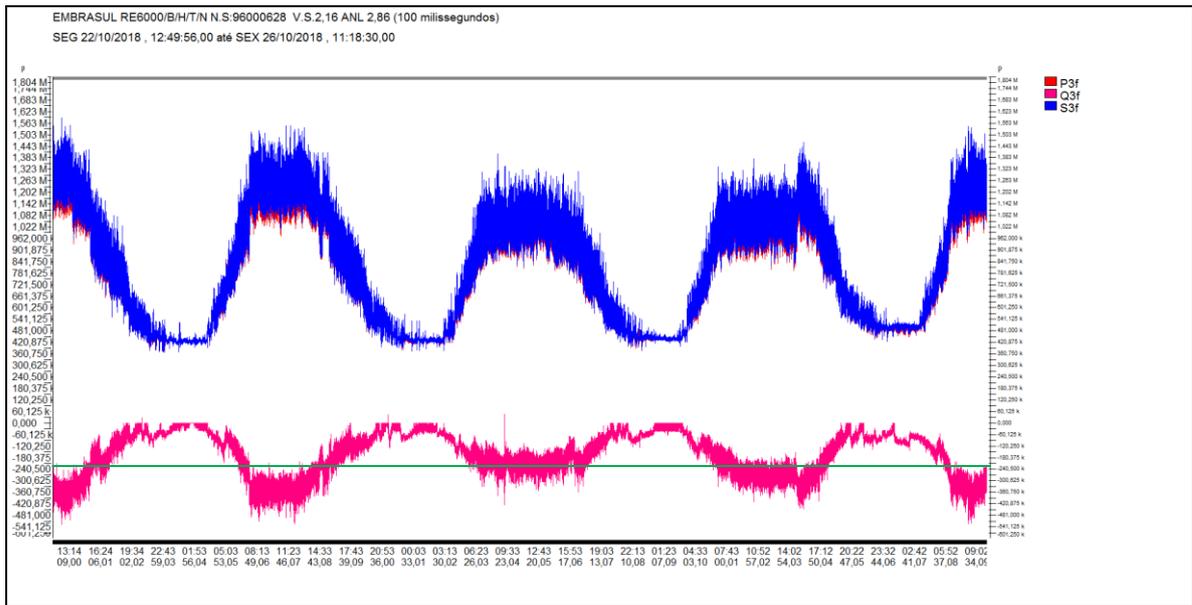
A tensão sob a carga está estabilizada e também, verificando os níveis de potência do sistema, é possível identificar que o sistema UPS compensa a carga reativa para ajustar o fator de potência e também regular a tensão, como pode ser visto na figura 107, a carga reativa média na entrada do sistema é 155kVar (indutivo) e conforme figura 108, a carga reativa na saída do sistema é -240kVar (capacitivo).

Figura 107 - Comportamento da carga – Entrada UPS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 108 - Comportamento da carga – Saída UPS



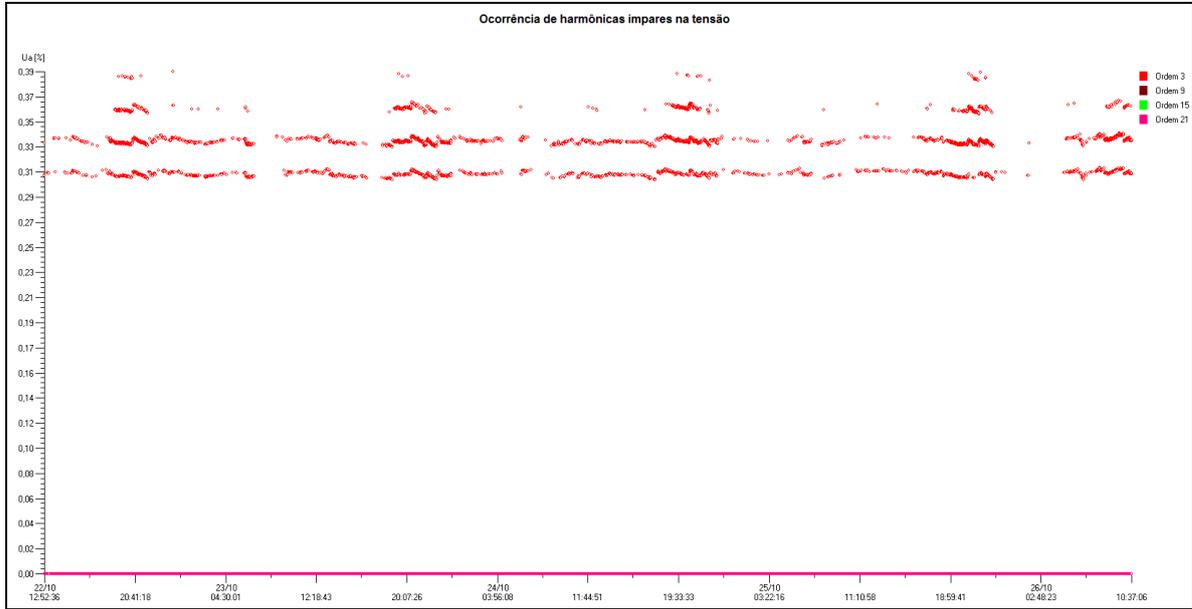
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo exposto, verifica-se que na entrada do sistema UPS um fator de potência atrasado e que com a devida compensação reativa do sistema, a saída para carga possui um fator de potência adiantado, caracterizando um efeito capacitivo da máquina síncrona.

Verificando agora as medições da distorção harmônica, mostrado na figura 109, tem-se as ocorrências de harmônicas ímpares na tensão na entrada

do sistema UPS, que apresentam valores baixos de distorção, sendo estes, inferiores aos limites do PRODIST.

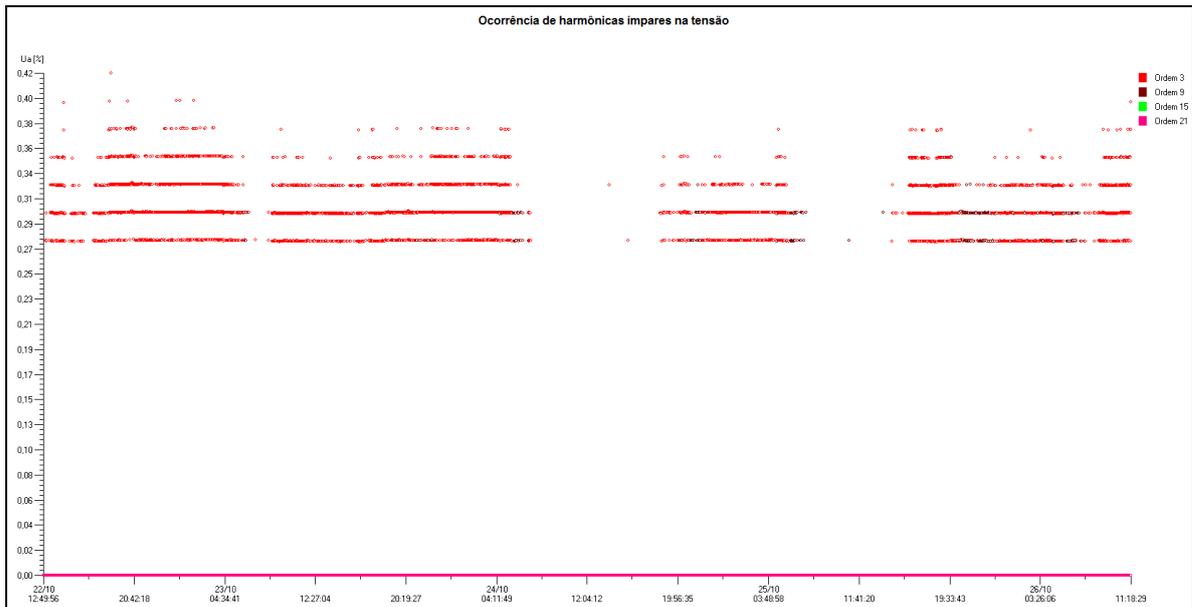
Figura 109 - Distorção harmônica de tensão na entrada do sistema UPS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, como mostrado na figura 110, tem-se que, o efeito do bloqueio das harmônicas múltiplas de 3 é praticamente nulo, visto que estes valores são ínfimos.

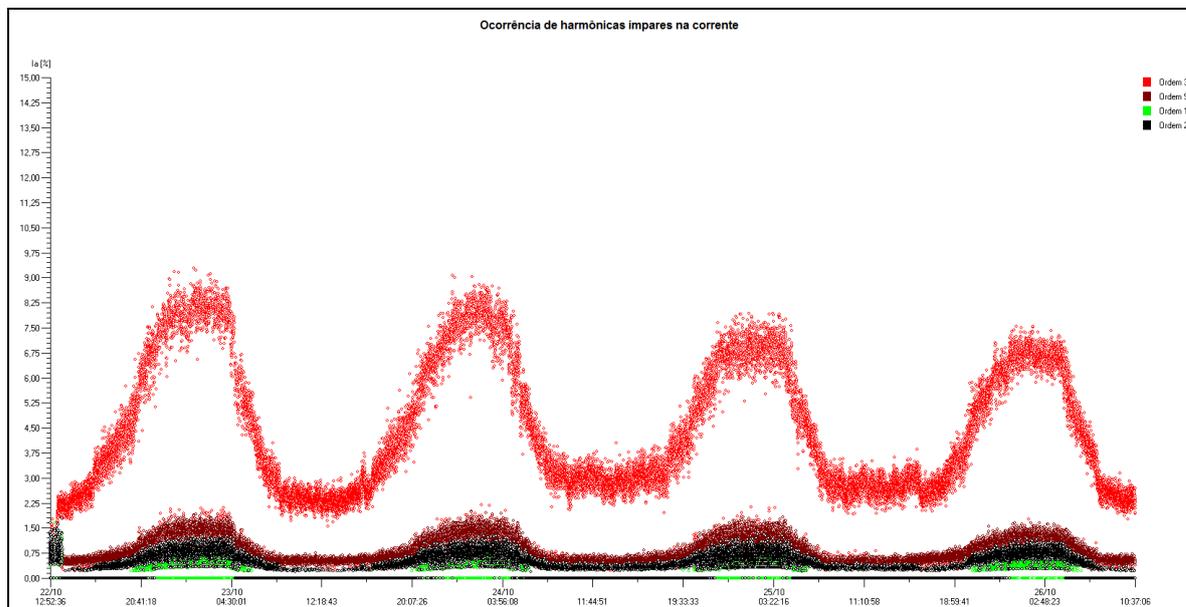
Figura 110 - Distorção harmônica de tensão na saída do sistema UPS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os níveis de distorção harmônica de corrente são mais expressivos, como é mostrado na figura 111, as harmônicas múltiplas 3 estão presentes na corrente.

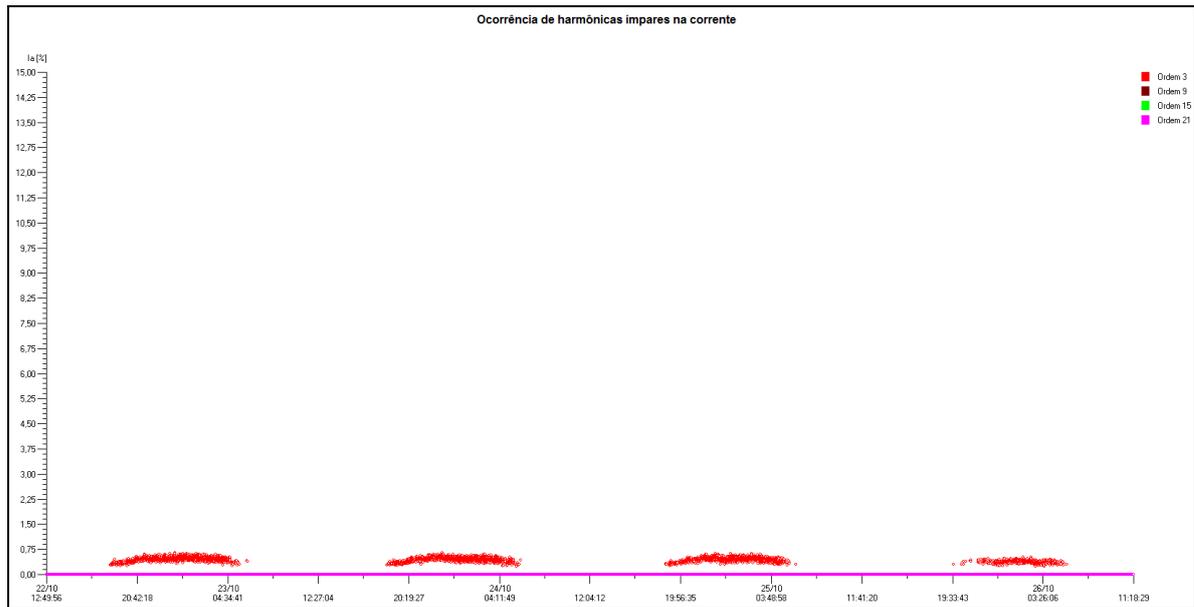
Figura 111 - Distorção harmônica de corrente na entra do sistema UPS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mostrado na figura 112, tem-se que, as harmônicas de correntes presentes na entrada do sistema não estão presentes na saída para a carga. Pelo exposto, comprova-se a efetividade do bloqueador de sequência-zero para harmônicas múltiplas 3.

Figura 112 - Distorção harmônica de corrente na saída do sistema UPS



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.2 Análise das Medições do Teste com Carga

O comportamento do sistema UPS em regime permanente foi verificado nas medições anteriores. Nas medições seguintes será mostrado o comportamento do sistema UPS durante as comutações de chave (DM e DG) do painel de transferência (ATS) e do disjuntor D1.

Onde:

- a) DM é o disjuntor de rede do painel ATS;
- b) DG é o disjuntor do gerador diesel do painel ATS;
- c) D1 é o disjuntor de entrada do sistema UPS;
- d) ATS é chave de transferência automática de transição aberta.

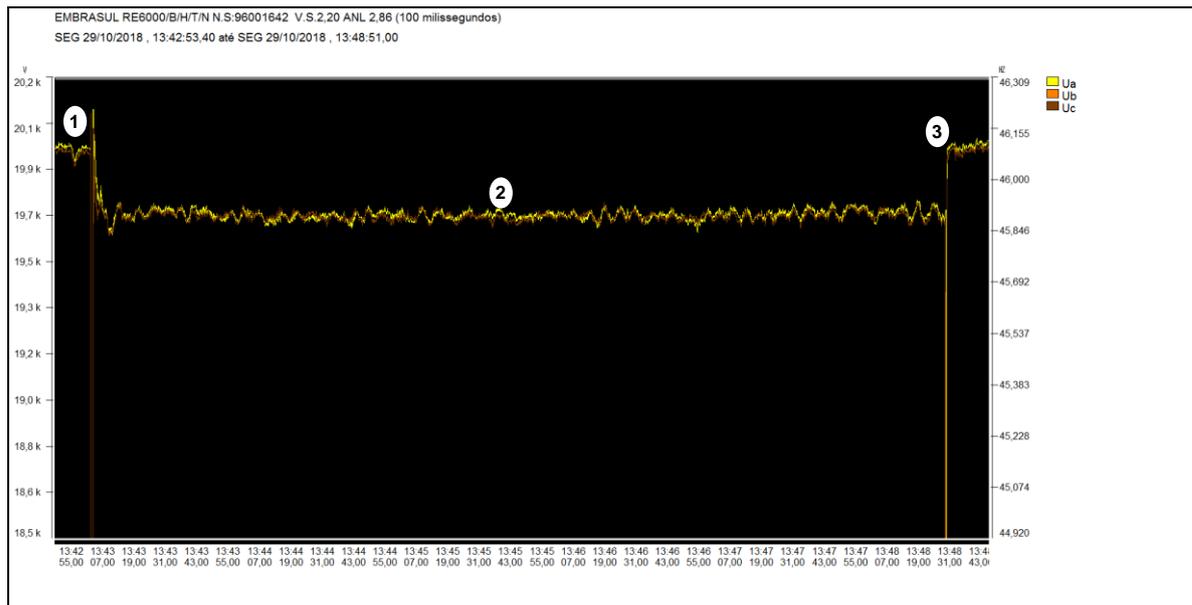
Para este teste os geradores a diesel são colocados em funcionamento. Os eventos estão descritos a seguir:

- 1) com os geradores a diesel prontos pra carga, o disjuntor D1 e DM abrem e o disjuntor DG fecha vindo o disjuntor D1 a fechar novamente com sincronismo entre as fontes (geradores e UPS);
- 2) geradores a diesel ficam alimentando a carga;

- 3) os disjuntores D1 e DG abrem e o disjuntor DM fecha vindo o disjuntor D1 a fechar novamente com sincronismo entre as fontes (rede e UPS).

Na figura 113 é possível identificar o comportamento da energia na entrada do sistema UPS para cada evento descrito acima.

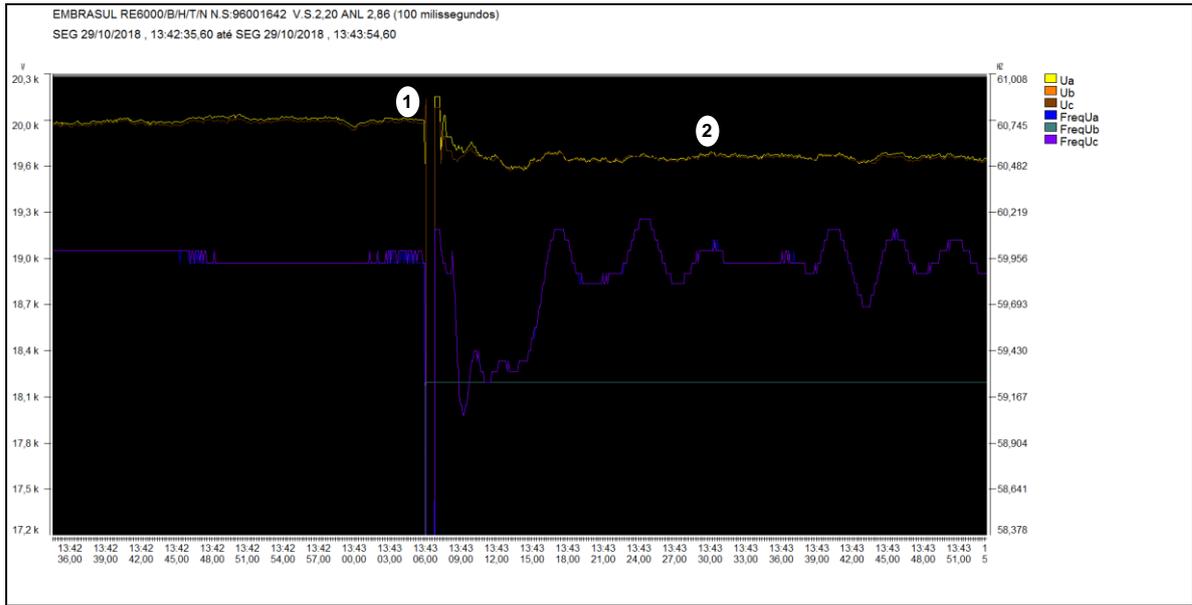
Figura 113 - Tensão na entrada da UPS durante transição da chaves DM/DG



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 114, mostra com destaque, o evento 1, na qual é possível verificar a interrupção de energia que ocorre na entrada do sistema UPS durante as transições de chave e em seguida o evento 2 com os geradores a diesel alimentando a entrada do sistema UPS.

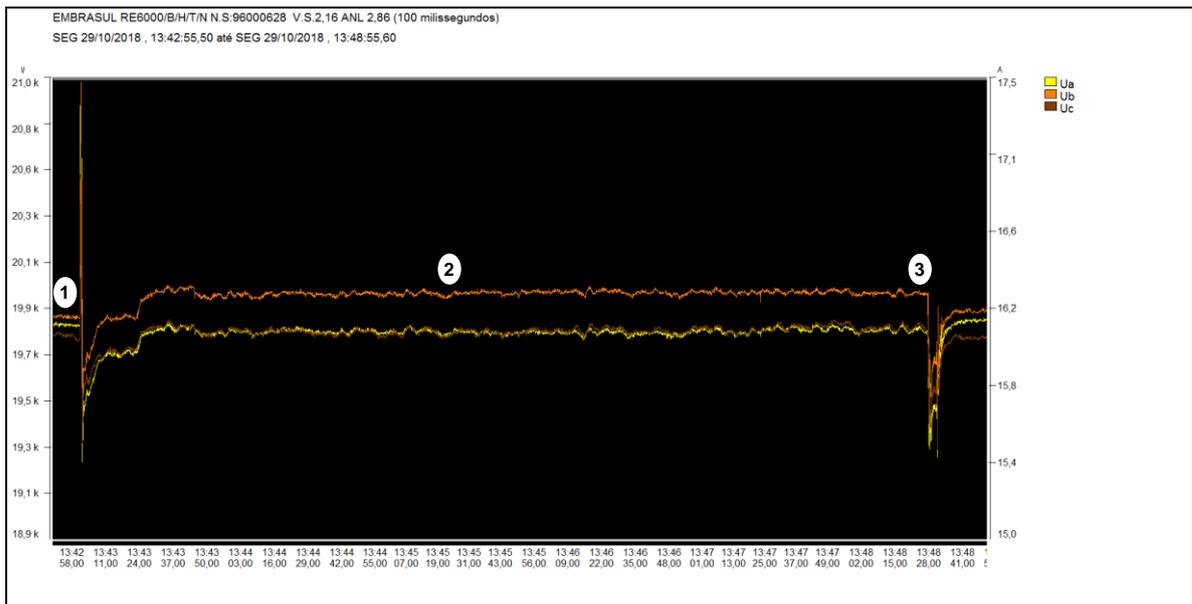
Figura 114 - Interrupção da energia durante transição das chaves



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento da tensão sob a carga, mostrado na figura 115, mostra que durante o evento 1, não ocorreu interrupção de energia para a carga. O mesmo ocorreu no evento 3, para o qual, pode-se verificar que a transição entre as chaves não provocou qualquer interrupção de energia na carga.

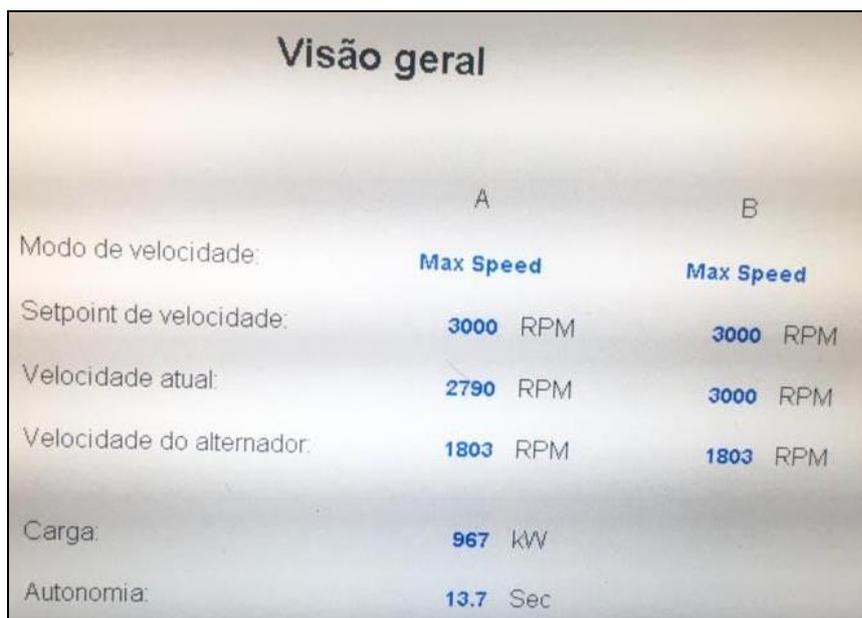
Figura 115 - Comportamento da tensão sob carga durante transição das chaves



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando destaque para o evento 1, verifica-se a figura 116 o instante em que a carga é plenamente alimentada pela UPS que tem sua energia cinética do

Figura 117 - Leitura de rotação do sistema UPS



The image shows a control panel titled "Visão geral" (General View) with a table of data for two units, A and B. The data includes speed mode, setpoint, actual speed, generator speed, load, and autonomy.

	A	B
Modo de velocidade:	Max Speed	Max Speed
Setpoint de velocidade:	3000 RPM	3000 RPM
Velocidade atual:	2790 RPM	3000 RPM
Velocidade do alternador:	1803 RPM	1803 RPM
Carga:	967 kW	
Autonomia:	13.7 Sec	

Fonte: Elaborado pelo autor.

No teste descrito, a UPS alimenta a carga somente durante os eventos de comutação das chaves de transferência do ATS.

4 CONCLUSÃO

Os conceitos levantados na revisão bibliográfica visam buscar o entendimento do funcionamento dos sistemas UPS frente aos fenômenos de QEE. Os distúrbios da rede elétrica que afetavam o funcionamento da carga crítica, foram eliminados com a aplicação da UPS que demonstrou ser capaz de filtrar as anormalidades da rede, garantindo energia com qualidade para carga. Foram explorados os recursos da máquina síncrona como compensador de reativos funcionando como motor e alimentando a carga crítica, fornecendo potência ativa, neste segundo caso, funcionando com gerador.

O sistema UPS, alvo deste estudo de caso, é composto por uma máquina síncrona combinada com um volante de inércia, denominado em inglês "*Flywheel*", e um acumulador de energia. O volante de inércia acumula energia cinética, a qual é despendida em transitórios de curta duração e a energia do acumulador é transferida para o eixo do gerador, através de um acoplamento de indução (magnético), quando ocorrem variações ou interrupções mais longas, que demandem a energia acumulada, para manter a rotação do eixo da máquina síncrona em 1800 rpm.

O funcionamento da máquina síncrona, foi bastante explorado, verifica-se a capacidade do sistema em controlar através da corrente de campo, os níveis de tensão do sistema para corrigir as variações de tensão da rede e de regular os níveis de potência reativa do sistema, ajustando desta forma, o fator de potência e a tensão sob a carga.

O funcionamento do sistema UPS foi estudado através do modelo criado no Simulink/Matlab. Neste modelo não foram implementados os controladores da tensão de campo e da potência mecânica da máquina síncrona, podendo estes, serem objetos de estudo para trabalhos futuros. Estes ajustes foram realizados manualmente, através de uma constante, para regular os valores conforme o ensaio era realizado.

O sistema foi modelado representando a entrada de rede através de uma fonte trifásica, o bloqueador de sequência-zero, denominado Choke, pela associação dos indutores L_u , L_m e L_d , a UPS através de uma máquina síncrona e a carga através de um bloco de carga RLC.

O sistema real é constituído de dois sistema UPS, cada um sendo de 1000kVA. No modelo, foi utilizado a representação de uma máquina síncrona de 2000 kVA equivalente. Através do modelo, foi possível, realizar diferentes cenários, que possibilitaram a compreensão do sistema, demonstrando que o modelo criado, representa o sistema real.

Os diferentes cenários que foram criados para verificar o sistema UPS, através do modelo, possibilitou a obtenção de resultados variados, com os quais, foi possível realizar análises detalhadas do comportamento das grandezas que alteram o comportamento do sistema UPS e por consequência do sistema elétrico.

Os parâmetros dos ensaios realizados foram baseados nos dados do PRODIST, desta forma, as análises realizadas estão em consonância com os procedimentos do órgão que controla a qualidade de energia elétrica no Brasil, ANEEL.

Para um sistema que opera sem UPS a rede alimenta a carga diretamente, sem a ação de nenhum outro dispositivo, desta forma, todos os distúrbios serão sentidos pela carga.

Para este estudo de caso, foram realizadas medições no sistema, que foram analisadas e comparadas com os resultados obtidos nas simulações. Verifica-se que o comportamento do sistema real é muito semelhante com os comportamentos observados no modelo. Também foi possível verificar o comportamento do sistema UPS, através das medições realizadas durante o teste que foi realizado com carga. Estas medições possibilitaram entender a atuação do sistema UPS e perceber que as variações da rede não afetam a carga.

Os resultados obtidos que foram demonstrados nas análises revelam que o sistema é capaz de absorver os distúrbios da rede e entregar para a carga energia elétrica com qualidade com parâmetros dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes.

Além dos objetivos que foram alvo deste estudo, é possível fazer uso do modelo criado no Simulink/Matlab para o desenvolvimento de trabalhos futuros, tais como: controle e eficiência do acoplamento de indução, controle da tensão de campo da máquina síncrona, comportamento do sistema UPS durante variações de longa duração, capacidade de curto-circuito de um sistema UPS.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Manual dos programas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor elétrico brasileiro**. [S.l.]: ANEEL, 2001.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)**: 10. ed. [S.l.]: ANEEL, 2018a. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica.

_____. **Prodist Módulo 8**. Divulgação dos limites dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/srd/indqual/default.cfm>>. Acesso em: 22 set. 2018b.

AKAGI, H. Large static and utility applications. **Proceeding of the IEEE**, 2001.

APAS SHOW. Expo Center Norte. Sistemas de Energia. Porto Alegre: STEMAC, 2017.

BECHTEL INTERNATIONAL. Power quality for semiconductor industry: management and improvement. **Final Report**, Dec. 1998.

BEKIAROV, S. B.; EMADI, A. Uninterruptible power supplies: classification, operation dynamics, and control. **Applied Power electronics Conference and Exposition**, v. 1, p. 597-604, mar. 2002.

BRONZEADO, H. et al. Uma proposta de nomenclatura nacional de termos e definições associados à qualidade de energia elétrica. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (SBQEE), 2., 1997, Itajubá. **Anais...** Itajubá, nov. 1997.

CAMPELO, Miguel Otávio Barreto. Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia. **Produto & Produção**, v. 9, n. 3, p. 15-25, out. 2008.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamento de máquinas elétricas**. 5. ed. Australia: AMGH, 2013.

COUNCIL EUROPEAN ENERGY REGULATORS (CEER). In: BENCHMARKING REPORT ON QUALITY OF ELECTRICITY SUPPLY, 14., 2008, [S.l.]. **Anais...** [S.l.]: CEER, 2008. Disponível em: <http://www.autorita.energia.it/allegati/pubblicazioni/C08-EQS-24-04_4th_Benchmarking_Report_EQS_10-Dec-2008_re.pdf>. Acesso em: 14 out. 2018.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas: sequência de fase das harmônicas. In: DECKMANN, S. M. **Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas**. Campinas: DSE; FEEC; UNICAMP, 2017. p. 1-49.

DORR, D. S.; GRUZS, T. M.; STANISLAWKSKI, J. J. Interpreting recent power quality surveys to define the electrical environment. **Intertec International**, 1996.

FARAHANI, Kamran Masteri. **Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage regulation**. 2012. 65 f. Tese (Doutorado) – Curso de Electrical And Computer Engineering, Ryerson University, Toronto, 2012.

_____. **Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage regulation**. 2010. 65 p. Tese (Master of Applied Science in the program of Electrical and Computer Engineering) – Ryerson University, Toronto, 2010.

FITZGERALD, A. E.; CHARLES, Kingsley Jr. **Máquinas elétricas**. 7. ed. New York: AMGH, 2014.

FREITAS, S. C. L. **Supressor eletromagnético de componentes harmônicas de sequência zero**. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2011.

GONÇALVES, Fabricio Douglas. **Resposta de sistemas ininterruptos de energia frente a fenômenos de qualidade da energia**. 2008. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Eletrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

HUNTER, I. Power quality issues: a distribution company perspective. **Power Engineering Journal**, [S.l.], v. 15, n. 2, p. 75-80, 1 abr. 2001. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/920669>>. Acesso em: 30 set. 2018.

IEEE. Recommended practice for monitoring electric power quality. 1159-1995 - IEEE Standards Coordinating Committee 22 On Power Quality, [S.l.], p. 1-76, 1995.

IEM POWER SYSTEMS (Battice) (Org.). Rotary ups rotabloc rbt user guide. 2016. Disponível em: <www.iemps.eu>. Acesso em: 04 ago. 2018.

INSTITUTO ACENDE BRASIL (ACENDEBRASIL). Qualidade do fornecimento de energia elétrica: confiabilidade, conformidade e presteza. **White Paper Instituto Acende Brasil**, São Paulo, v. 14, p. 1-36, jul. 2014. Disponível em: <http://www.acendebrasil.com.br/media/estudos/2014_WhitePaperAcendeBrasil_14_Qualidade_Fornecimento_Energia_Rev_0.pdf>. Acesso em: 14 out. 2018.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

KING, C. A.; KNIGHT, W. **Uninterruptible power supplies and standby power systems**. USA: McGraw-Hill, 2003.

MAIA, Reinaldo Moreira. **Caracterização das variações de tensão de curta duração e seus impactos em uma planta da indústria alimentícia**. 2011. 88 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2011.

MELO, Miguel Otávio Barreto Campelo de. Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial. **Produto & Produção**, v. 9, n. 3, p. 15-25, out. 2008.

MUHAMAD, Mohd Izhwan; MARIUN, Norman; RADZI, Mohd Amran Mohd. The effects of power quality to the industries. In: Student Conference On Research And Development, 5., 2007, [S.l.]. **Anais...** [S.l.]: IEEE, p.1-4, nov. 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4451410>>. Acesso em: 30 set. 2018.

NOBRE, Maitê Martins. **Avaliação da qualidade da energia elétrica através do custo da interrupção para o consumidor industrial e dos indicadores de continuidade (DEC e FEC)**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

OLIVEIRA, L. C. O. de et al. Modeling for performance analysis of electromagnetic zero-sequence suppressor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER – ICHQP, 14., [S.l.], 2010. **Anais...** [S.l.]: IEEE, p.1-8, set. 2010.

PANIAGO, E. L. **Dispositivo para monitoramento, registro e análise dos indicadores de continuidade no fornecimento da energia elétrica**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

PESSANHA, J. F. M.; SOUZA, R. C.; LAURENCEL, L. da C. Um modelo de análise envoltória de dados para o estabelecimento de metas de continuidade do fornecimento de energia elétrica. **Pesquisa Operacional**, n. 27, p. 51-83, 2007.

SOTELO, Guilherme G.; ROLIM, Luis G. B.; FERREIRA, Antonio C. Uso de uma máquina de relutância variável para armazenamento energético: uma aplicação para qualidade de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2002, Natal. **Anais...** Natal, p. 1-6, set. 2002.

SOUZA, Luciano Moraes de. **Compensador síncrono de velocidade variável**. 2003. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

STANDARD EN 50160. **VOLTAGE DISTURBANCES**: Voltage Characteristics in Public Distribution Systems. 5.4.2 ed. [S.l.]: Copper Development Association, 2004.

STEMAC GRUPOS GERADORES. **Sistema ups dinâmico rotabloc - RBT**. Porto Alegre: STEMAC, 2016.

WEG GERADORES (Org.). **Alternadores Síncronos**: manual de operação, instalação e manutenção. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: 26 set. 2018.

_____. **DT-5**: características e especificações de geradores. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: 23 set. 2018.

WEISSBACH, R. S.; KARADY, G. G.; FARMER, R. G. Dynamic voltage compensation on distribution feeders using flywheel energy storage. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 465-471, abr. 1999.