

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Aeronáutica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica.

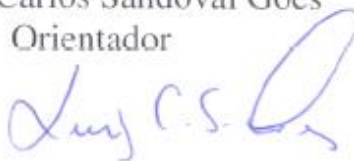
Fabício Lima Migliorini

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DOS COMPONENTES
HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
AERONAVES**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Dr. Luiz Carlos Sandoval Góes
Orientador



Dr. Luiz Carlos Sandoval Góes
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

<p>Migliorini, Fabrício Lima Avaliação dos Impactos dos Componentes Harmônicos em Sistemas Elétricos de Aeronaves / Fabrício Lima Migliorini. São José dos Campos, 2015. 73f.</p> <p>Dissertação de mestrado – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Aeronáutica, Área de Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2015. Orientador: Dr. Luiz Carlos Sandoval Góes</p> <p>1. Fontes de alimentação de energia elétrica. 2. Aeronaves. 3. Equipamentos elétricos. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Avaliação dos Impactos dos Componentes Harmônicos em Sistemas Elétricos de Aeronaves</p>
--

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MIGLIORINI, Fabrício Lima. **Avaliação dos Impactos dos Componentes Harmônicos em Sistemas Elétricos de Aeronaves**. Ano. 73f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fabrício Lima Migliorini

TÍTULO DO TRABALHO: Avaliação dos Impactos dos Componentes Harmônicos em Sistemas Elétricos de Aeronaves

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2015

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação ou tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Fabrício Lima Migliorini

Rua Raul Roldão da Costa, 22, Apartamento 21 – Vila Betânia

CEP: 12245-484, São José dos Campos - SP

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DOS COMPONENTES HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE AERONAVES

Fabício Lima Migliorini

Composição da Banca Examinadora:

Dr. Luiz Carlos Sandoval Góes	Presidente/Orientador	- ITA
Dr. Osamu Saotome		- ITA
MEng. Frederico Castelhana Sanchez		- Embraer

ITA

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus quem sempre iluminou meu caminho e deu forças para que fosse capaz de trilhá-lo.

A meus pais por todo o cuidado e por tudo que me ensinaram e me permitiram chegar hoje aqui.

Agradeço aos amigos e à minha família, muito importantes na minha vida e em especial à Verônica que permaneceu ao meu lado e fez parte desta caminhada.

À Embraer por me proporcionar a oportunidade de participação no Programa de Especialização em Engenharia (PEE) e àqueles com os quais lá tive a honra de estudar, trabalhar e aprender.

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) por me proporcionar esta conquista e ao professor Luiz Góes pela motivação e orientação neste trabalho.

Resumo

Na concepção e operação de sistemas de geração e distribuição elétrica um ponto de grande importância consiste na qualidade da energia que é entregue aos consumidores, visto que desta depende o bom funcionamento dos mesmos. Entre os parâmetros analisados estão as formas de onda da tensão e da corrente as quais podem sofrer distorções devido à presença de componentes harmônicas no sistema. O trabalho proposto tem como objetivo estudar a relação entre as cargas e a presença de harmônicos no sistema elétrico assim como os efeitos da distorção no restante do sistema. Para tal serão utilizadas normas e bibliografia técnica sobre o tema assim como a modelagem e simulação de diferentes tipos de carga de forma a buscar reproduzir os efeitos das mesmas sobre o sistema. Por fim busca-se comparar os resultados com os requisitos comumente utilizados de forma a possibilitar uma orientação para suporte a decisões no projeto do sistema de geração e distribuição assim como dos equipamentos dos demais sistemas.

Abstract

The power quality is a major point what requires great attention during the designing process of an electrical generation and distribution system because the load's proper operation depends on that. Some of the main characteristic studied are the waveforms of the voltage and current signals since there are some phenomenon, in special the harmonic distortion, which can affect their characteristics. This paper proposal consists in studying the connection between the electrical loads and the harmonic content in the system and its interactions with other equipment. The methodology bases on the review of the standards and technical publications regarding the subject as well as modelling and simulate an electrical system in order to reproduce the effects on the generation system. Finally, the paper tries to elaborate a comparison between the typical requirements and simulation results to support decisions during the design phase of an electrical system and for the other systems components selection.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Evolução da capacidade elétrica das aeronaves (ROBOAM, 2011).	17
FIGURA 2.2 – Estrutura tradicional do sistema elétrico (MOIR; SEABRIDGE, 2008).	18
FIGURA 2.3 – IDG do Boeing 767 (LIFT AEROSPACE, 2015).	19
FIGURA 2.4 – Variable Frequency Starter Generator do B787 (BOEING, 2012).	20
FIGURA 2.5 – Sistema de geração AC (ABDELHAFEZ; FORSYTH, 2009).	21
FIGURA 2.6 – Ram air turbine (UTCAERO, 2015).	22
FIGURA 2.7 – Transformer rectifier unit (ELDEC CORPORATION, 2009).	23
FIGURA 2.8 – Exemplo de sinal harmônicos.	25
FIGURA 2.9 – Exemplo de sinal harmônicos (MIL-STD-704F, 2004).	28
FIGURA 2.10 – Gerador de distorção para equipamentos monofásicos (RTCA, 2010).	29
FIGURA 2.11 – Gerador de distorção para equipamentos trifásicos (RTCA, 2010).	29
FIGURA 2.12 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos monofásicos (RTCA, 2010).	30
FIGURA 2.13 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos trifásicos (RTCA, 2010).	30
FIGURA 2.14 – Monitoramento de harmônicos para equipamentos trifásicos (RTCA, 2010).	31
FIGURA 3.1 – Dimensões do Boeing 737 (BOEING, 2015).	36
FIGURA 3.2 – Dimensões do Airbus 319 (AIRBUS, 2015).	36
FIGURA 3.3 – Dimensões do Embraer 190 (EMBRAER, 2015).	37
FIGURA 3.4 – Sistema de distribuição centralizada (ABDELHAFEZ; FORSYTH, 2009). ..	39
FIGURA 3.5 – Sistema de distribuição para o modelo de sistema elétrico.	40

FIGURA 3.6 – Representação de gerador elétrico aeronáutico (MOIR; SEABRIDGE, 2008).	42
FIGURA 3.7 – Circuito equivalente de uma máquina síncrona (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).	42
FIGURA 3.8 – Arquitetura de um conversor de 12 pulsos (SANGLIKAR; JOHN, 2006).	45
FIGURA 3.9 – Arquitetura de um conversor de 6 pulsos (CHANG; CHIN; LEE, 2006).	46
FIGURA 3.10 – Circuito equivalente de um motor de indução (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).	47
FIGURA 3.11 – Curvas de performance da bomba hidráulica (EATON, 2013).	48
FIGURA 3.12 – Modelo do sistema elétrico em Simulink.	51
FIGURA 4.1 – Espectro da corrente na entrada do conversor (Caso 1).	53
FIGURA 4.2 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 1).	53
FIGURA 4.3 – Espectro da tensão na fonte (Caso 1).	54
FIGURA 4.4 – Espectro da corrente na entrada do conversor (Caso 2).	55
FIGURA 4.5 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 2).	55
FIGURA 4.6 – Espectro da tensão na fonte (Caso 2).	56
FIGURA 4.7 – Espectro da corrente na entrada do conversor (Caso 3).	57
FIGURA 4.8 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 3).	57
FIGURA 4.9 – Espectro da tensão na fonte (Caso 3).	58
FIGURA 4.10 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 4).	61
FIGURA 4.11 – Espectro da tensão na fonte (Caso 4).	61
FIGURA 4.12 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 5).	62
FIGURA 4.13 – Espectro da tensão na fonte (Caso 5).	63
FIGURA 4.14 – Espectro de tensão na saída da fonte (Fase A) com sistema desbalanceado.	65
FIGURA 4.15 – Espectro de tensão na saída da fonte (Fase B) com sistema desbalanceado.	65

FIGURA 4.16 – Espectro de tensão na saída da fonte (Fase C) com sistema desbalanceado. 66

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Capacidade de geração das aeronaves.	36
TABELA 3.2 – Modelos para as cargas.	38
TABELA 3.3 – Parâmetros do gerador de 60 kVA.	43
TABELA 3.4 – Conversores em aeronaves recentes.	45
TABELA 3.5 – Características dos condutores utilizados no modelo	50
TABELA 4.1 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 1).	54
TABELA 4.2 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 2).	56
TABELA 4.3 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 3).	58
TABELA 4.4 – Resumo das simulações para diferentes conversores.	59
TABELA 4.5 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 4).	62
TABELA 4.6 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 5).	63
TABELA 4.7 – Distorção harmônica total em função da potência do conversor.	64
TABELA 4.8 – Distorção harmônica total em função da potência do conversor.	66

Lista de Abreviaturas e Siglas

TRU	<i>Transformer Rectifier Unit</i>
VDC	<i>Volts Direct Current</i>
VAC	<i>Volts Alternating Current</i>
VF	<i>Variable Frequency</i>
CF	<i>Constant Frequency</i>
VSCF	<i>Variable Speed Constant Frequency</i>
IDG	<i>Integrated Speed Drive</i>
CSD	<i>Constant Speed Drive</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
IHC	<i>Individual Harmonic Content</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
EPDS	<i>Electrical Power Distribution System</i>
POR	<i>Point of Regulation</i>
BCRU	<i>Battery Charger Regulator Unit</i>
PDU	<i>Power Drive Unit</i>
ELCU	<i>Electronic Load Control Unit</i>
GCB	<i>Generator Control Breaker</i>
BTB	<i>Bus Tie Breaker</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos.....	15
1.3	Estrutura	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Sistema elétrico em aeronaves	16
2.1.1	Geração	18
2.1.2	Distribuição primária	22
2.1.3	Distribuição secundária	22
2.1.4	Baterias e conversores	23
2.2	Conceitos de qualidade de energia elétrica	24
2.3	Harmônicos em sistemas elétricos.....	25
2.4	Normas de qualidade de energia	27
2.4.1	MIL-STD-704F	27
2.4.2	DO-160G Seção 16 – Power Input	28
2.5	Fonte de harmônicos presentes em aeronaves	31
2.6	Efeitos de harmônicos em equipamentos	32
2.6.1	Máquinas rotativas.....	32
2.6.2	Transformadores	33
2.6.3	Equipamentos eletrônicos.....	33
2.6.4	Proteções.....	33
2.6.5	Outros casos.....	33
3	MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO	35
3.1	Modelagem do sistema	35
3.2	Premissas	35
3.2.1	Dimensionamento	35
3.2.2	Listagem de cargas elétricas	37
3.2.3	Arquitetura do sistema de distribuição	38
3.3	Plataforma para simulação.....	40
3.4	Representação dos componentes	41

3.4.1	Gerador	41
3.4.2	Coversores AC/DC	44
3.4.3	Motor	46
3.4.4	Fonte de corrente harmônica	48
3.4.5	Cargas resistivas	48
3.4.6	Feeders.....	49
3.5	Modelo do sistema elétrico.....	50
4	SIMULAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO	52
4.1	Efeito do tipo de conversor	52
4.1.1	Caso 1 - Conversor de 6 pulsos	52
4.1.2	Caso 2 - Conversor de 12 pulsos	54
4.1.3	Caso 3 - Conversor com a distorção limite da DO-160G.....	56
4.1.4	Análise dos resultados	59
4.2	Efeito da dimensão ou número de conversores.....	60
4.2.1	Caso 4 – Conversor de 6 pulsos com 20 % do nominal do sistema	60
4.2.2	Caso 5 – Conversor de 6 pulsos com 60 % do nominal do sistema	62
4.2.3	Distorção em função da potência do conversor de 6 pulsos.....	63
4.2.4	Análise dos resultados	64
4.3	Efeito de cargas desbalanceadas no conteúdo harmônico	64
4.3.1	Análise dos resultados	66
5	CONCLUSÃO.....	68
5.1	Considerações de projeto para mitigação de harmônicos	68
5.2	Considerações de projeto para qualificação dos equipamentos.....	70
5.3	Propostas para continuidade do trabalho	70
	REFERÊNCIAS	71

1 Introdução

A evolução que pode ser percebida nos projetos aeronáuticos das últimas décadas tem sido motivada por mudanças não só nas ferramentas e tecnologias disponíveis para utilização, como também em uma evolução no que diz respeito a requisitos para o produto sejam eles de desempenho, segurança, conforto entre outros.

Assim, as aeronaves têm dependido cada vez mais de seus sistemas, mecânicos ou eletroeletrônicos atendendo assim às necessidades do projeto. Deste modo sua importância tem crescido, fazendo com que seu projeto se torne cada vez mais complexo e preciso, tendo estes de observar uma gama cada vez maior de variáveis.

O estudo da qualidade da energia elétrica advém de evoluções não só das filosofias de projeto de sistemas de geração e distribuição de energia e a aplicação de normas, como também de evoluções do próprio comportamento das cargas que ao mesmo tempo em que se tornam mais sensíveis a distúrbios, terminam também contribuindo para um aumento na poluição do sistema de distribuição.

1.1 Motivação

Os esforços na área de qualidade de energia no meio aeronáutico são normalmente guiados pelas referências encontradas em materiais como a MIL-STD-704F e DO-160G a qual possui uma seção dedicada para o assunto de *Power Input* (Seção 16).

Entretanto, em certos casos, podem aparecer desvios com relação às referências, como, por exemplo, correntes de partida elevadas, modulação de tensão e corrente, ou ainda níveis elevados de conteúdo harmônicos configurando-se assim cenários complicados para realização de análises devido à ausência de um modelo ou método que auxilie a decisão em critérios de projeto.

A possibilidade de se ter disponível um conjunto de ferramentas e informações capazes de suportar tal tipo de decisão, seria capaz também de tornar o projeto mais flexível visto que poderia assim obter referências baseadas em suas características próprias assim como permitir a otimização de algumas soluções de sistemas.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em compreender melhor os impactos dos componentes harmônicos no sistema elétrico passando por conhecer também o papel dos diferentes tipos de carga na construção destes cenários.

Como frutos destes estudos, busca-se levantar dados suficientes para serem usados como referência no desenvolvimento de novos sistemas assim como propor uma metodologia de análise de impacto de harmônicos em sistemas elétricos.

1.3 Estrutura

No capítulo 2 será apresentada uma revisão dos principais conceitos que envolvem o desenvolvimento deste trabalho como os sistemas elétricos em aeronaves e suas tecnologias, conceitos de qualidade da energia elétrica, teoria sobre harmônicos em sistemas elétricos incluindo suas fontes e impactos e normas técnicas sobre o assunto.

No capítulo 3 pode ser encontrado um detalhamento do modelo construído para realização destes estudos referindo-se às principais escolhas e abordagens utilizadas.

No capítulo 4 são apresentados os principais resultados para cada caso de simulação realizado com o objetivo de possibilitar a comparação entre os mesmos.

Por fim, tem-se no capítulo 5 as conclusões deste trabalho com a apresentação de considerações de projeto para sistemas elétricos embarcados além de propostas para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sistema elétrico em aeronaves

Com o aumento do tamanho e complexidade das aeronaves além do surgimento de novas necessidades ligadas principalmente à segurança e operação das mesmas, os sistemas embarcados nos aviões têm observado um crescimento cada vez maior em sua importância e criticidade dentro do conjunto levando a um aumento também de sua própria complexidade.

Dentre os sistemas, a geração e a distribuição de energia elétrica têm experimentado a aplicação das mais diversas tecnologias e soluções construtivas e de instalação de forma a fazer com que o mesmo atenda cada vez melhor as suas demandas. Sua importância advém da necessidade de suprir potência elétrica para componentes de todos os demais sistemas e diferentes tipos de cargas desde unidades eletrônicas incorporadas ao sistema aviônico, bombas hidráulicas, *motor controllers* para movimentação de superfícies até itens de cabine necessários para proporcionar uma melhor experiência de voo aos passageiros. Este aumento de demanda ao sistema elétrico torna-se bem visível quando se compara a demanda elétrica de projetos mais atuais com aeronaves de algumas décadas atrás, mesmo quando se fala de aeronaves na mesma faixa de capacidade de passageiros como o Boeing 767 e posteriormente o Boeing 787 (Figura 2.1).

Outro grande desafio para o desenvolvimento de sistemas elétricos está na necessidade cada vez maior de alternativas elétricas para funções até então mecânicas com o objetivo de economia em combustível e custo operacional ou atendimento a novos requisitos da função. Estes casos podem ser tratados desde a incorporação de computadores de controle no sistema até a substituição total da fonte de energia do mesmo conceito conhecido como *More Electrical Aircraft*. Nestes casos o desafio dos engenheiros de sistemas elétricos encontra-se não apenas no dimensionamento, mas também na busca por tecnologias que sejam capazes de atender a grande demanda de energia assim como realizar sua distribuição e gerenciamento.

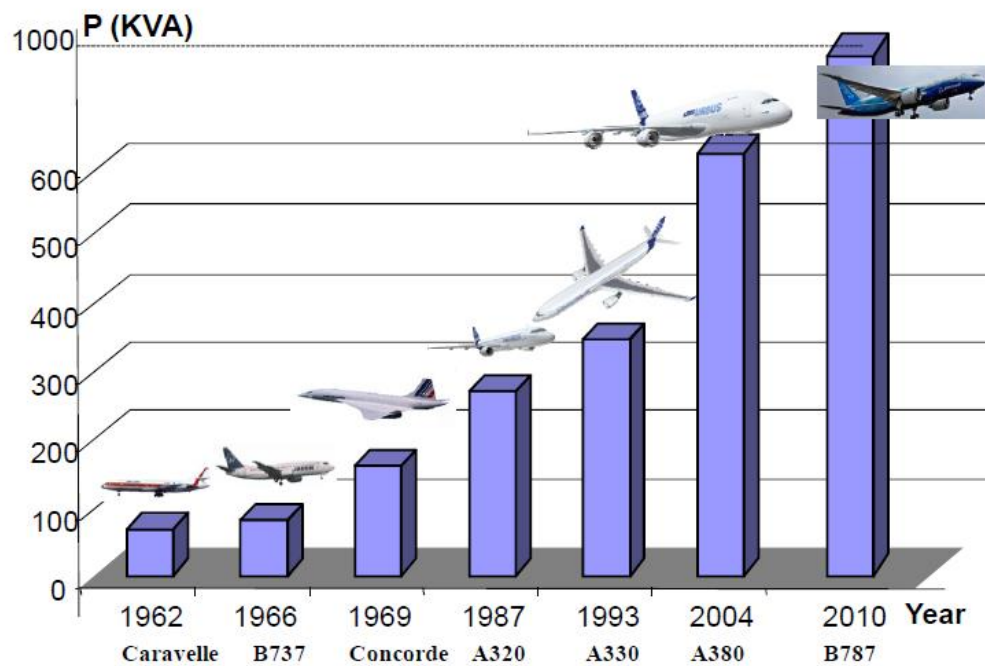


FIGURA 2.1 – Evolução da capacidade elétrica das aeronaves (ROBOAM, 2011).

Como apresentado por MOIR e SEABRIDGE (2008), o sistema elétrico de uma aeronave é composto basicamente por uma porção responsável pela geração da energia a qual engloba os geradores principais, auxiliares e geração de emergência e outra parcela responsável pela distribuição da energia a qual é usualmente dividida em distribuição primária (consolidação das fontes, proteção e separação dos canais) e distribuição secundária (alimentação individual das cargas). Há também outros itens como conversores (TRUs e inversores) e armazenadores de energia (baterias) os quais por vezes são considerados separadamente ou então juntamente com alguma das partes anteriormente citadas. A descrição do sistema é exemplificada na representação da Figura 2.2.

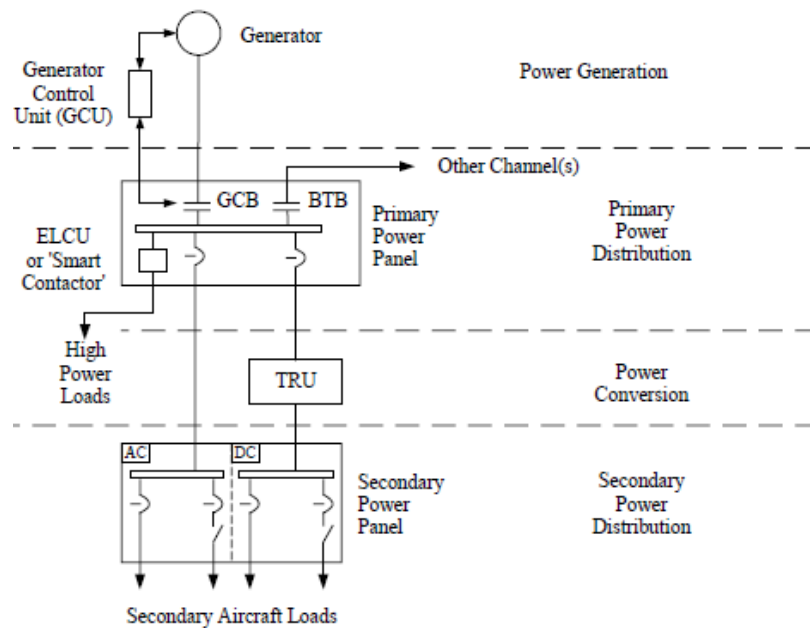


FIGURA 2.2 – Estrutura tradicional do sistema elétrico (MOIR; SEABRIDGE, 2008).

2.1.1 Geração

A porção do sistema responsável pela geração engloba principalmente os geradores assim como a os equipamentos responsáveis pelo controle dos mesmos.

Os tipos de máquinas utilizadas na geração de energia têm se modificado com a evolução dos sistemas, crescimento da demanda, disponibilidade de tecnologia com maturidade suficiente para aplicação aeronáutica assim como a disponibilidade de cargas adequadas às mesmas tecnologias. Dentre estas, destaca-se a diferença entre sistemas DC e AC.

Dentre os geradores DC, aqueles baseados em 28 VDC ainda são encontrados na indústria, porém em aeronaves de menor porte devido aos altos níveis de corrente resultantes da utilização de uma tensão mais baixa assim como da dificuldade de construção de geradores deste tipo de maior potência. Em aplicações militares recentes, sistemas de geração baseados em 270 VDC têm sido empregados vistos as vantagens dos mesmos no que diz respeito aos menores níveis de corrente o que faz também que esta tecnologia seja recorrentemente citada como alternativa para os futuros projetos de aviões mais elétricos, no entanto, a mesma ainda apresenta desafios técnicos no que diz respeito à tecnologia de proteção e controle para sua utilização de forma segura e confiável.

Os sistemas de geração AC operando tradicionalmente em 115/200 VAC ganharam espaço nas aplicações de maior porte visto as limitações do sistema 28 VDC tradicional. Entre as tecnologias utilizadas destacam-se os sistemas em frequência constante (CF), frequência variável (VF) e VSCF.

Os geradores CF baseia-se na utilização de um conversor mecânico (*constant speed drive* - CSD) capaz de proporcionar uma rotação constante no eixo do gerador baseado na rotação variável da *gearbox* do motor. O conjunto CSD e gerador recebe o nome de *integrated drive generator* ou IDG (Figura 2.3). Esta tecnologia tem como vantagem principal proporcionar uma tensão com frequência constante simplificando o projeto tanto do sistema de distribuição de energia quanto das cargas, porém apresentando, em contra partida, relacionados ao MTBF do conjunto, complexidade, rendimento, preço e peso dos componentes do sistema.



FIGURA 2.3 – IDG do Boeing 767 (LIFT AEROSPACE, 2015).

Sistemas baseados em frequência variável possibilitam eliminar a necessidade de conversão mecânica da velocidade utilizando apenas um gerador síncrono porém fornecendo na saída uma tensão com frequência não constante cujo intervalo de variação depende da aplicação (em jatos o intervalo pode ficar entre 360 Hz e 800 Hz). Apesar de apresentar benefícios para o gerador, devem ser observados os impactos desta tecnologia no sistema principalmente nas cargas as quais terão de se adaptar ao regime de frequência variável que leva, em parte dos casos, a dificuldades construtivas e possível aumento na utilização de

conversores eletrônicos. A Figura 2.4 apresenta o gerador do Boeing 787 que consiste em uma máquina VF de 250 kVA.



FIGURA 2.4 – Variable Frequency Starter Generator do B787 (BOEING, 2012).

Uma alternativa intermediária é a utilização da tecnologia VSCF que consiste na aplicação de geradores com entrada em velocidade variável, porém com capacidade de fornecer uma saída em frequência constante seja ela por meio da conversão com o uso de DC antes da conversão para AC ou pela utilização do princípio de ciclo conversor (*cycloconverter*) que constrói a onda senoidal em 400 Hz a partir de senoides de frequências mais elevadas. Esta tecnologia, no entanto, ainda não provou ainda sua confiabilidade perante as demais assim como ainda não possui aplicações na aviação comercial.

Na Figura 2.5 é mostrado um resumo das tecnologias de geração AC disponíveis.

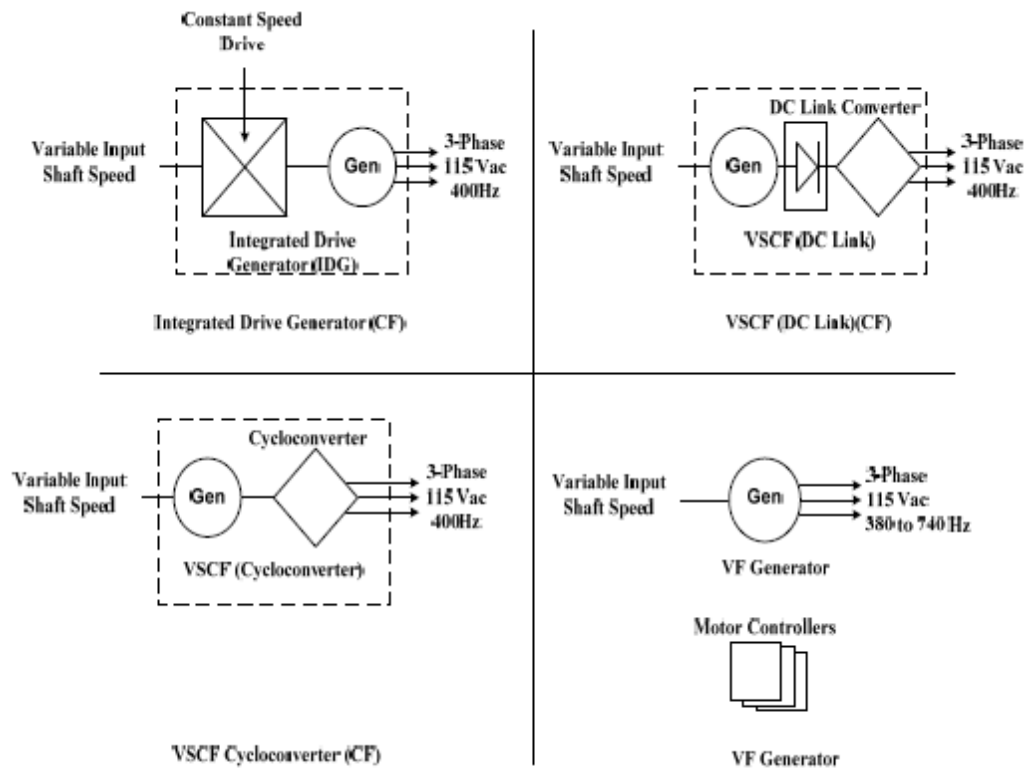


FIGURA 2.5 – Sistema de geração AC (ABDELHAFEZ; FORSYTH, 2009).

A geração auxiliar usualmente se utiliza de tecnologias similares às da geração principal apresentando como principal vantagem o fato de poder dispor de uma entrada de potência mecânica com velocidade constante por não estar sujeita às variações de regime de operação do motor.

Por fim, a geração de emergência tem por objetivo suprir a necessidade de energia no caso de perda das demais fontes de forma a garantir a possibilidade de a aeronave continuar controlável e capaz de realizar um pouso seguro. Visto a grande necessidade de energia nesses casos, a utilização de baterias nessas condições tem dado lugar a geradores movidos a turbinas eólicas, conjunto denominado de RAT (*Ram Air Turbine*), mostrada na Figura 2.6 a qual é capaz de fornecer a energia necessária, sem limitação de tempo além de oferecer dissimilaridade das fontes primárias do avião.



FIGURA 2.6 – *Ram air turbine* (UTCAERO, 2015).

2.1.2 Distribuição primária

A distribuição primária tem como principal função a consolidação das fontes de geração sendo composta assim dos contactores, fusíveis e disjuntores responsáveis pela proteção do sistema assim como configuração e reconfiguração do mesmo no caso de falha ou mudança no modo de operação. Esta é responsável pela separação dos barramentos e segregação dos mesmos de forma a atender aos critérios de segurança específicos e também de entregar energia para ser distribuída para as cargas.

2.1.3 Distribuição secundária

A distribuição secundária corresponde à porção do sistema responsável por fazer a distribuição da energia individualmente para cada carga instalada na aeronave, sendo composta principalmente pelas proteções individuais usualmente disjuntores térmicos ou

SSPCs (*Solid State Power Controllers*) e também por dispositivos de chaveamento das mesmas como relés e possivelmente contactores para correntes mais elevadas.

2.1.4 Baterias e conversores

Baterias têm sido utilizadas desde o início dos sistemas elétricos como fonte de energia sendo utilizadas em aeronaves modernas como uma fonte de *backup* para suporte a transientes além de funções específicas como a partida da aeronave. As tecnologias mais utilizadas consistem em chumbo ácido, níquel cádmio e lítio-íon sendo a última tecnologia a de melhor relação capacidade por quilograma, porém devido a suas características químicas, ainda apresenta uma série de dificuldades principalmente no que diz respeito à segurança.

Devido à variedade de cargas presentes nas aeronaves, a utilização de conversores se faz necessária com vistas a adequar a tensão a ser distribuída ao tipo de cargas. Um tipo comumente encontrado são os inversores necessários para alimentação de cargas que operam com corrente alternada em sistemas de geração DC ou para poderem operar com bateria. Tem-se também as chamadas TRUs (*Transformer Rectifier Units*), Figura 2.7, que consistem em retificadores podendo ser os mesmos controlados ou não e normalmente encontrados em sistemas de geração AC de forma a fornecer alimentação usualmente em 28 VDC para equipamentos eletrônicos, válvulas e outros dispositivos. Há também conversores utilizados para geração de 270 VDC a partir de outros sistemas de geração para alimentação principalmente de equipamentos de missão em aeronaves militares ou mesmo conversores DC/DC ou mesmo AC/AC como aqueles utilizados na conversão de 400 Hz para 60 Hz para utilização de equipamentos comerciais em aeronaves.



FIGURA 2.7 – Transformer rectifier unit (ELDEC CORPORATION, 2009).

2.2 Conceitos de qualidade de energia elétrica

O conceito de qualidade da energia elétrica, apesar de sua importância para o sistema, se tornou objeto de maiores estudos e preocupações recentemente mesmo que trabalhos e requisitos técnicos, principalmente sobre projeto de equipamentos, já sejam encontrados há algum tempo na literatura.

A maior importância que tem sido dada ao assunto advém de algumas mudanças e evoluções no que se refere aos equipamentos e o sistema. Por um lado temos as questões relacionadas a desempenho dos equipamentos os quais, devido ao aumento de complexidade, tem ficado mais susceptível a distúrbios em sua alimentação assim como tem também empregado tecnologias e arquiteturas que afetam a capacidade do sistema de manter a qualidade da energia que fornece principalmente com a presença cada vez maior de cargas não lineares. Outro fator é a necessidade e capacidade de garantia de determinadas condições para funcionamento do sistema possibilitando uma otimização do projeto e desempenho dos itens que o compõe. Além destes, o próprio fato de os padrões de qualidade e desempenho haverem se elevado com a evolução dos sistemas leva à necessidade de realização deste tipo de estudo.

Em grande parte dos casos, a qualidade da energia consiste na garantia da qualidade da tensão observada nos vários pontos do sistema assim como da corrente que transita pelo mesmo. No caso de sistemas AC as características observadas são normalmente relacionadas à regulação da tensão, ou seja, sua capacidade de manter dentro dos níveis previstos assim como a presença de variações cíclicas em sua amplitude na forma de modulação e diferenças entre as fases. Também se tem as características relacionadas à frequência da onda de tensão cujos critérios e características a serem avaliadas podem se alterar quando tratamos de sistemas VF e CF. Por fim são observadas as questões relacionadas à forma de onda da senoide cujo estudo recai sobre o estudo dos harmônicos presentes no sistema o qual é o foco deste trabalho.

Em sistemas DC, além da similar preocupação com os níveis de tensão que são entregues aos consumidores incluindo pequenas interrupções e afundamentos, há também questões relacionadas à presença de *ripple* no sinal assim como sua amplitude e espectro.

Igualmente importante à qualidade da tensão oferecida pelos sistemas está a questão relacionada às características da corrente drenada pelas cargas, visto que esta tem grande influência na capacidade do sistema de geração e distribuição em manter as características da

tensão dentro das normas. Dentre estes itens destacam-se o conteúdo harmônico da corrente na entrada dos equipamentos, questão que será mais bem estudada mais adiante, correntes de partida (*inrush currents*) as quais, devido à sua amplitude, podem levar a interrupções, comportamentos chaveados das cargas e características indutivas e capacitivas dos equipamentos (fator de potência).

2.3 Harmônicos em sistemas elétricos

O conceito de harmônicos em sistemas de energia elétrica consiste basicamente na presença de componentes de frequência múltiplas da frequência nominal do sistema. Em sistemas aeronáuticos de frequência constante, por exemplo, nos quais a frequência normal de operação é de 400 Hz, têm-se harmônicos de 3^a, 5^a e 7^a ordem correspondendo respectivamente a senoides de 1200 Hz, 2000 Hz e 2800 Hz, as quais irão se somar à onda principal causando distorções na forma do sinal observado como ilustrado no exemplo da Figura 2.8.

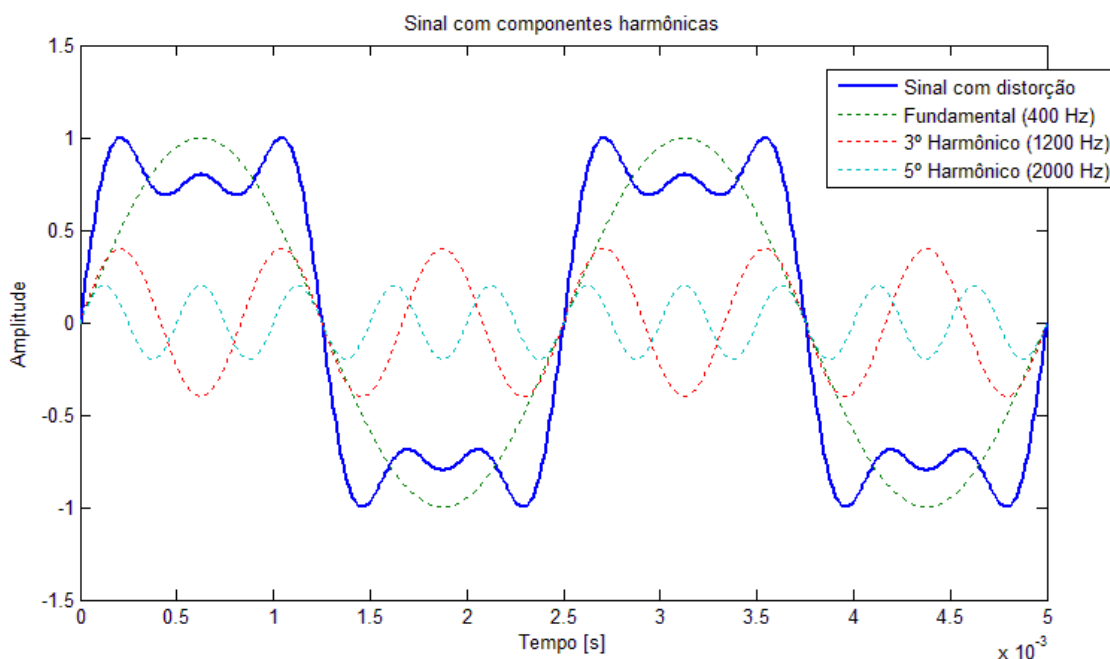


FIGURA 2.8 – Exemplo de sinal harmônicos.

Distorções na forma de onda de tensão aparecem em sistema mesmo que este possua um sistema de geração capaz de produzir ondas puramente senoidais na frequência desejada. Este processo se dá pelo fato da presença de cargas que apresentam não linearidades em seu

funcionamento levarem à circulação de corrente em frequências múltiplas da fundamental pelo sistema. Estas correntes irão interagir com a impedância de cada um dos outros integrantes como as demais cargas, condutores, e o próprio gerador de forma a gerar uma distorção na tensão no ponto de conexão com as demais cargas atingindo assim as demais porções do sistema elétrico.

A caracterização das distorções presentes no sistema pode ser feita pelo direto monitoramento da forma de onda com a utilização de equipamentos adequados os quais são capazes de identificar e medir cada componente presente na onda. Há também alguns índices que são comumente empregados na caracterização dos harmônicos sendo o mais utilizado o conceito de Distorção Harmônica Total (THD - *Total Harmonic Distortion*). Este índice é definido como sendo uma proporção entre o valor RMS das harmônicas e o valor do componente fundamental da onda sendo assim expressa pela Equação 1, onde V_n corresponde à harmônica de ordem n e V_1 corresponde à amplitude da fundamental:

$$THD = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (2.1)$$

O THD é utilizado para representar a distorção tanto do sinal de tensão quanto da corrente sendo normalmente aplicada a notação THD_v e THD_i respectivamente.

Outro conceito empregado na literatura é o de Conteúdo Harmônico Individual (IHC - *Individual Harmonic Content*) o qual se caracteriza por descrever a parcela de cada componente harmônico na forma de onda final de forma a evitar que a informação se perca junto à análise de distorção harmônica total. Este índice é dado simplesmente pela razão entre a amplitude do harmônico e a fundamental como mostrado na Equação 2.2.

$$IHC_n = 100 \cdot \frac{V_n}{V_1} \quad (2.2)$$

Harmônicos de menor ordem como, por exemplo, 3º, 5º e 7º são usualmente os mais presentes nas análises e estudos referentes ao assunto devido principalmente ao seu efeito no sistema, maiores amplitudes e dificuldade de filtragem. Entretanto, no estudo de harmônicos

são analisados os componentes de todas as ordens sendo ímpares ou pares até por volta do 40º ou 50º harmônico dependendo das referências utilizadas.

Existem também os chamados harmônicos não característicos que tem como representantes os inter-harmônicos (harmônicos onde a frequência não é um múltiplo inteiro) e sub-harmônicos (frequências menores que a fundamental), porém estes aparecem no sistema em condições específicas e mais comuns em ambiente industrial não sendo também foco deste trabalho.

2.4 Normas de qualidade de energia

No âmbito de qualidade de energia, há uma série de normas e matérias de referência para projeto emitido pelos mais variados grupos e comissões como IEC, IEEE, RTCA e até mesmo organizações militares. Entretanto, como a ênfase deste trabalho está nos sistemas embarcados em aeronaves, maior foco será dado aos documentos destinados a este fim mais comumente aplicados na indústria aeronáutica.

Os principais documentos a respeito da qualidade de energia aplicados à indústria aeronáutica são a norma DO-160G seção 16 (Power Input) e a norma MIL-STD-704F. Os comentários sobre as aplicações das mesmas serão aqui limitados apenas aos itens relacionados às distorções harmônicas.

2.4.1 MIL-STD-704F

Esta norma de origem militar consiste de um conjunto de recomendações para guiar o projeto de um sistema de geração e distribuição no que diz respeito à qualidade da energia elétrica. Ela trata de definir características mínimas para a energia provida pelo sistema elétrico de forma a permitir o funcionamento adequado das cargas. Juntamente com ela existem as MIL-HDBK-704 as quais apresentam, para cada tipo de sistema que se esteja tratando, uma série de testes a serem aplicados de forma a garantir que as cargas a serem instaladas na aeronave estão qualificadas de acordo com as características esperadas para o sistema elétrico.

No que diz respeito aos critérios de distorção da tensão em sistemas de frequência constante, a norma define uma distorção máxima de 5% para a tensão fornecida às cargas.

Ainda sobre a forma de onda, o documento apresenta também o espectro da distorção considerado aceitável para este caso o qual é apresentado na Figura 2.9.

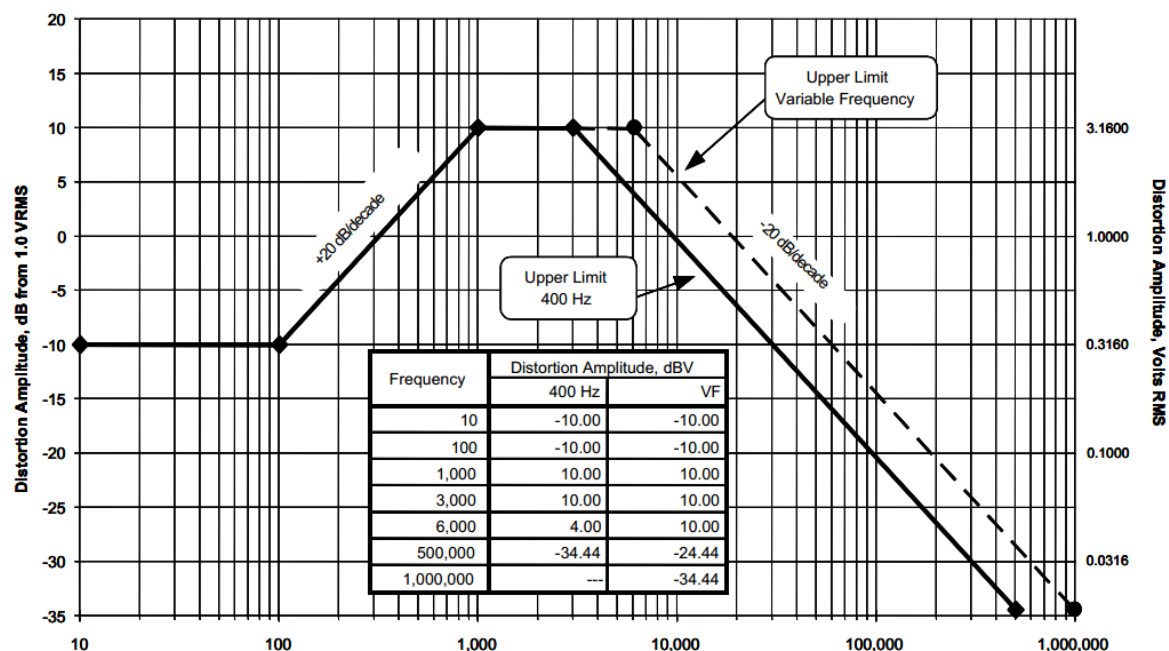


FIGURA 2.9 – Exemplo de sinal harmônico (UNITED STATES, 2004).

2.4.2 DO-160G Seção 16 – Power Input

A DO-160G consiste em um guia para qualificação de equipamentos para aplicação aeronáutica nos mais diversos temas desde vibração e temperatura até características eletromagnéticas. A seção 16 deste documento trata especificamente dos requisitos de alimentação dos equipamentos passando por questões como níveis de tensão, frequência e transientes além da influência das cargas sobre os sistemas de geração e distribuição.

No que consiste a análise de harmônicos, a norma trás primeiramente o nível de distorção harmônica da tensão sob a qual a carga tem de ser capaz de demonstrar sua capacidade de funcionamento. Segundo as recomendações, para sistemas de frequência constante, as cargas têm de ter condições de operar sob um nível de distorção harmônica total (THD_v) de 8% +2/-0 %. O guia também apresenta o aparato para geração da distorção necessária para qualificação dos equipamentos tanto em cargas monofásicas como trifásicas os quais são apresentados nas Figuras 2.10 e 2.11.

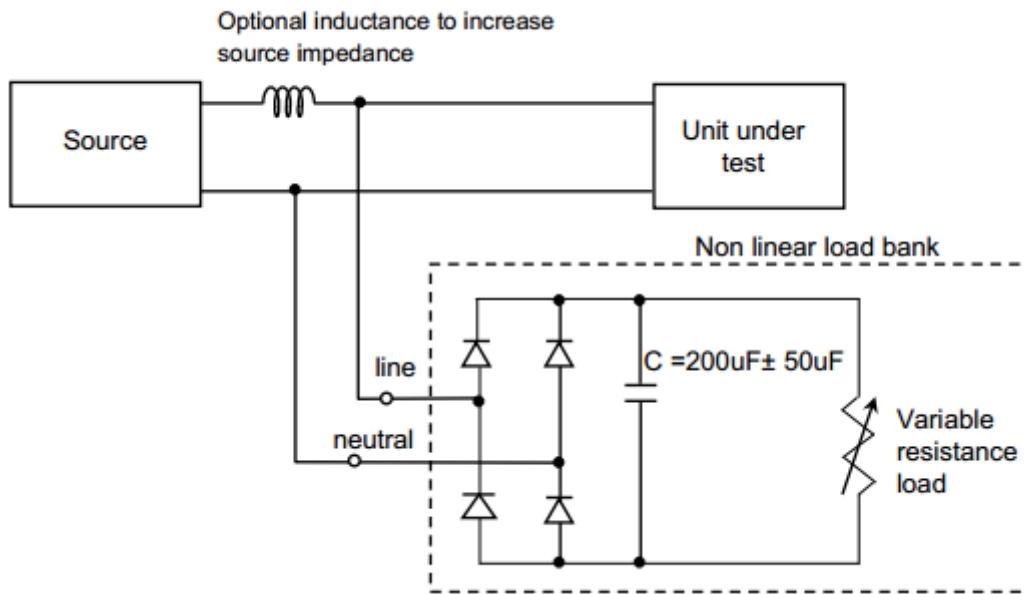


FIGURA 2.10 – Gerador de distorção para equipamentos monofásicos (RTCA, 2010).

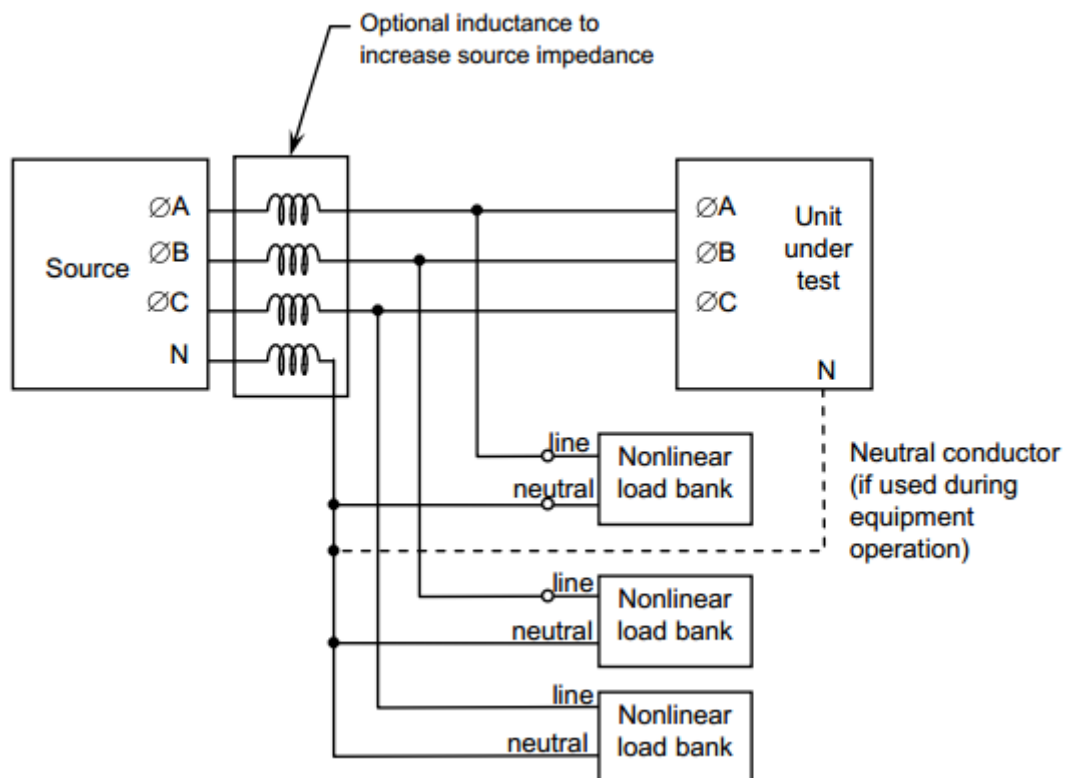


FIGURA 2.11 – Gerador de distorção para equipamentos trifásicos (RTCA, 2010).

No estudo dos impactos das correntes harmônicas geradas pelas cargas sobre o sistema elétrico, a norma traz uma tabela (Figuras 2.12 e 2.13) descrevendo os níveis recomendados

para cada ordem de harmônico na corrente com o objetivo de garantir a capacidade do sistema elétrico de entregar a qualidade de tensão esperada visto que estas correntes irão transitar pelo sistema gerando distorção na tensão. Para a utilização dos dados das tabelas deve-se atentar para a correção a ser feita para compensar o conteúdo de harmônico presente na tensão aplicada na carga durante o teste. Esta correção consiste em para cada 1 % na distorção da fonte de alimentação, o requisito máximo para as correntes harmônicas pode ser elevado em 1,25 %.

Harmonic Order	Limits
Odd Non Triplen Harmonics ($h = 5, 7, 11, 13, \dots, 37$)	$I_h = 0.3 I_1 / h$
Odd Triplen Harmonics ($h = 3, 9, 15, 21, \dots, 39$)	$I_h = 0.15 I_1 / h$
Even Harmonics 2 and 4	$I_h = 0.01 I_1 / h$
Even Harmonics > 4 ($h = 6, 8, 10, \dots, 40$)	$I_h = 0.0025 I_1$

FIGURA 2.12 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos monofásicos (RTCA, 2010).

Harmonic Order	Limits
$3^{rd}, 5^{th}, 7^{th}$	$I_3 = I_5 = I_7 = 0.02 I_1$
Odd Triplen Harmonics ($h = 9, 15, 21, \dots, 39$)	$I_h = 0.1 I_1 / h$
11^{th}	$I_{11} = 0.1 I_1$
13^{th}	$I_{13} = 0.08 I_1$
Odd Non Triplen Harmonics 17, 19	$I_{17} = I_{19} = 0.04 I_1$
Odd Non Triplen Harmonics 23, 25	$I_{23} = I_{25} = 0.03 I_1$
Odd Non Triplen Harmonics 29, 31, 35, 37	$I_h = 0.3 I_1 / h$
Even Harmonics 2 and 4	$I_h = 0.01 I_1 / h$
Even Harmonics > 4 ($h = 6, 8, 10, \dots, 40$)	$I_h = 0.0025 I_1$

FIGURA 2.13 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos trifásicos (RTCA, 2010).

Há ainda na norma recomendação do aparato a ser utilizado para monitoramento da carga durante os ensaios para estudo de harmônicos o qual é apresentado na Figura 2.14.

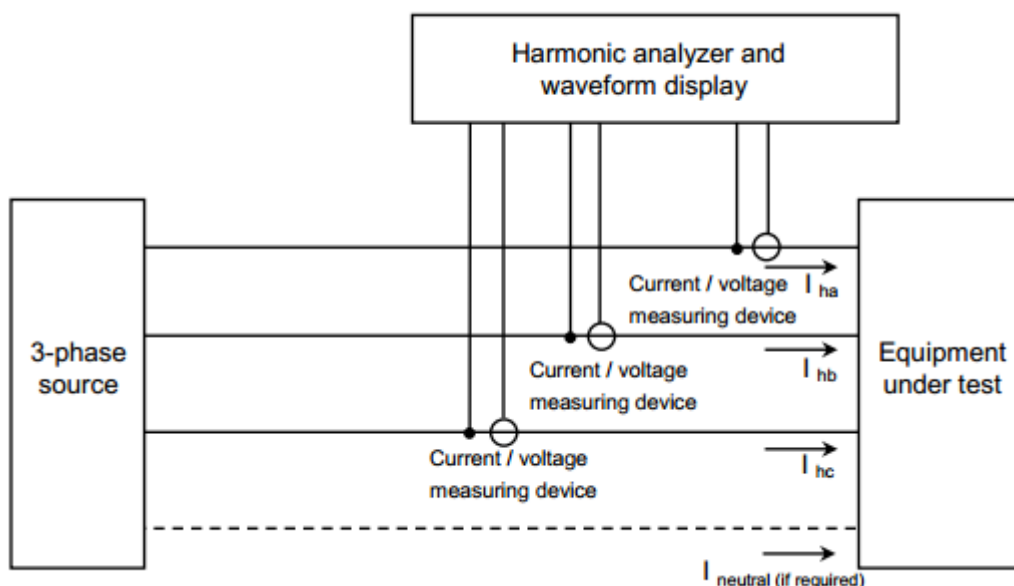


FIGURA 2.14 – Monitoramento de harmônicos para equipamentos trifásicos (RTCA, 2010).

2.5 Fonte de harmônicos presentes em aeronaves

Um ponto importante no estudo de qualquer distúrbio em um sistema consiste na identificação de sua origem e suas fontes. No caso da distorção harmônica, estas fontes são conhecidas além de terem sido amplamente estudadas, porém nem todas são aplicáveis ao estudo de sistemas embarcados visto que algumas são equipamentos ou aplicações encontradas em ambiente industrial como, por exemplo, fornos a arco.

As maiores quantidades de correntes harmônicas são geradas usualmente em cargas que se comportam de forma não linear, sendo destaque neste aspecto os mais diversos conversores utilizados dentro nos sistemas elétricos. Seu uso mais comum reside nas TRUs utilizadas para criação dos barramentos DC da aeronave para alimentação de eletrônicos e outras cargas. Estes conversores são usualmente baseados em uma arquitetura com retificação de 12 pulsos, o que ajuda na geração de harmônicos com menor amplitude e ordem mais elevada (neste caso a ordem será $12k \pm 1$, para $k=1, 2, 3...n$), comparada com aplicações de mais simples utilizando um retificador de 6 pulsos. Na literatura também é possível encontrar referências à proposta de projeto de equipamentos com retificação em 18 pulsos ou mesmo 24 pulsos com objetivo de reduzir a emissão de correntes harmônicas.

Por outro lado, o emprego de acionamento elétrico com controladores (*motor controllers*) resulta na inclusão de um maior número de conversores no sistema e por vezes de potência relativamente elevada. Estes equipamentos dispõem das mesmas opções de

retificação empregadas nas TRUs aumentando ainda mais a injeção de harmônicos no sistema.

Outra possível fonte de harmônicos consiste nas cargas rotativas como motores de indução utilizados, por exemplo, em bombas e ventiladores os quais podem vir a apresentar formas de onda distorcidas de tensão e corrente devido a não idealidade da distribuição dos enrolamentos das máquinas, do gap de ar e na distribuição do campo magnético dentro da máquina. Desta forma, o próprio gerador também apresenta tais características de distorção de forma de onda que o caracteriza como uma fonte de harmônicos. Neste caso, a distorção total irá depender de seu carregamento, que influencia no funcionamento interno da máquina.

2.6 Efeitos de harmônicos em equipamentos

A motivação do entendimento do aparecimento e propagação dos harmônicos na rede tem como objetivo principal mitigar os problemas que os mesmos podem gerar mediante sua interação com as cargas. Os efeitos destes componentes nas cargas variam de acordo com o tipo de carga e assim com sua suscetibilidade às distorções.

2.6.1 Máquinas rotativas

A presença de componentes com frequência diferente da nominal do sistema na alimentação de motores elétricos, assim como nas correntes drenadas de geradores síncronos, tem como primeiro impacto o aumento das perdas simplesmente pelo maior aquecimento dos enrolamentos das mesmas devido aos componentes extras de corrente que irão transitar pelas máquinas.

Outro ponto que afeta o funcionamento adequado das máquinas consiste no fato de algumas ordens de harmônicos terem característica de sequência negativa as quais podem vir a gerar componentes de torque contrárias à rotação normal da máquina prejudicando o desempenho da mesma. Há ainda o efeito dos componentes de corrente que são induzidas no rotor da máquina as quais dependem da ordem dos harmônicos do sistema.

Este conjunto de problemas tem impacto principalmente no rendimento da máquina sendo este impacto considerado entre 5 % e 10 % de redução. Além disso a operação em condições de maiores perdas, máquina mais quente, pode vir a afetar o MTBF das máquinas.

2.6.2 Transformadores

Em sistemas aeronáuticos estes itens estão presentes principalmente dentro dos conversores como TRUs, por exemplo. Os impactos neste tipo de equipamento são normalmente em função do aumento das perdas no cobre devido ao efeito pelicular associadas às perdas pelo aumento das reatâncias de dispersão pela o aumento da frequência. Juntamente com estes impactos somam-se ainda um aumento das perdas por correntes parasitas induzidas e devido às capacitâncias entre espiras e entre enrolamentos que possuem seu efeito mais pronunciado para frequências maiores.

2.6.3 Equipamentos eletrônicos

O principal efeito para equipamentos eletrônicos diz respeito às interferências que podem ser causadas em seu sistema de controle devido à presença de componentes de alta frequência na tensão de alimentação visto que causa ruído não esperado na tensão assim como modificação no cruzamento da curva por zero.

2.6.4 Proteções

Outro impacto no sistema consiste nos efeitos sobre as proteções às quais irão sofrer com o sobreaquecimento devido à presença de correntes harmônicas no sistema. Isso pode significar problemas de vida útil de componentes como fusíveis e relés assim com atuação inadvertida dos mesmos ou mesmo a não atuação.

Para o caso de proteções baseadas em sistemas eletrônicos vale atentar para as técnicas de monitoramento do sistema visto que a presença de harmônicos pode levar a uma medição errada das grandezas elétricas.

2.6.5 Outros casos

Outras influências devem ser também observadas como, por exemplo, a modificação de impedância dos cabos da distribuição devido aos componentes de alta frequência e o consequente aumento da reatância dos condutores. Há também questões no que diz respeito à possibilidade de se atingir a frequência de ressonância de capacitores ou outros equipamentos

eletrônicos o que, além de outros problemas, leva a um aumento na corrente circulando no sistema e consequente aumento de perdas.

3 Modelo do Sistema Elétrico

3.1 Modelagem do sistema

A construção de modelos para descrever o funcionamento de sistemas apresenta-se como importante ferramenta para auxílio no desenvolvimento dos mesmos, entendimento de seu comportamento assim como a localização e investigação de falhas. Entretanto, é importante atentar-se para a forma de construção do modelo de forma que o mesmo seja capaz de representar os fenômenos desejados o que irá definir a escolha da ferramenta de simulação, características dos componentes que serão representadas, interação entre as subpartes do modelo e grandezas a serem observadas.

O modelo a ser proposto neste trabalho tem como finalidade possibilitar o estudo dos efeitos dos componentes harmônicos geradas pelos diferentes tipos de carga sobre o sistema elétrico de uma aeronave especialmente no que diz respeito aos impactos no gerador e na qualidade da energia observada pelas demais cargas ligadas ao sistema. A seguir serão detalhados os passos e decisões tomadas na construção deste modelo.

3.2 Premissas

Neste item serão descritas algumas premissas e referências utilizadas para modelagem do funcionamento de um sistema de geração e distribuição.

3.2.1 Dimensionamento

Para a construção deste modelo, será utilizado como referência aeronaves na categoria de 100 a 150 passageiros visto o grande número de modelos que se enquadram na categoria como, por exemplo, o Boeing 737, Airbus A319/320 e a família de E-Jets da Embraer. Outro motivo para escolha dessas aeronaves consiste no fato de utilizarem sistemas baseados em geração AC e frequência constante o que concorda com a proposta do modelo.

A Tabela 3.1 apresenta informações sobre a capacidade de geração das aeronaves supracitadas baseado em informações de MOIR e SEABRIDGE (2008) e JACKSON (2004).

TABELA 3.1 – Capacidade de geração das aeronaves.

Modelo	Tecnologia	Capacidade da Geração
Boeing 737	Frequência Constante (IDG)	90 kVA
Airbus 319/320	Frequência Constante (IDG)	90 kVA
Embraer E-Jets	Frequência Constante (IDG)	40 kVA

Outra característica a ser considerada das aeronaves citadas acima consiste na dimensão das mesmas. Essa informação será de grande importância no dimensionamento dos cabos de alimentação a serem considerados nos modelos. As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam as dimensões principais de cada uma das aeronaves.

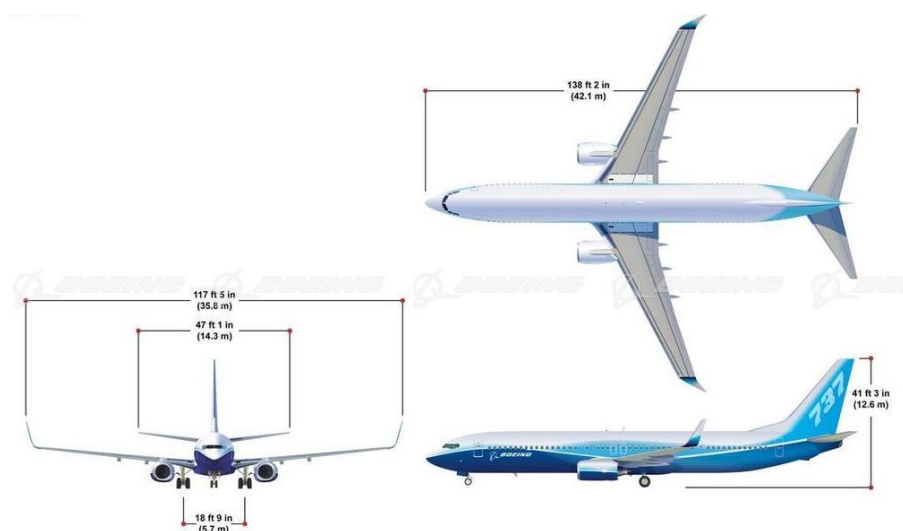


FIGURA 3.1 – Dimensões do Boeing 737 (BOEING, 2015).

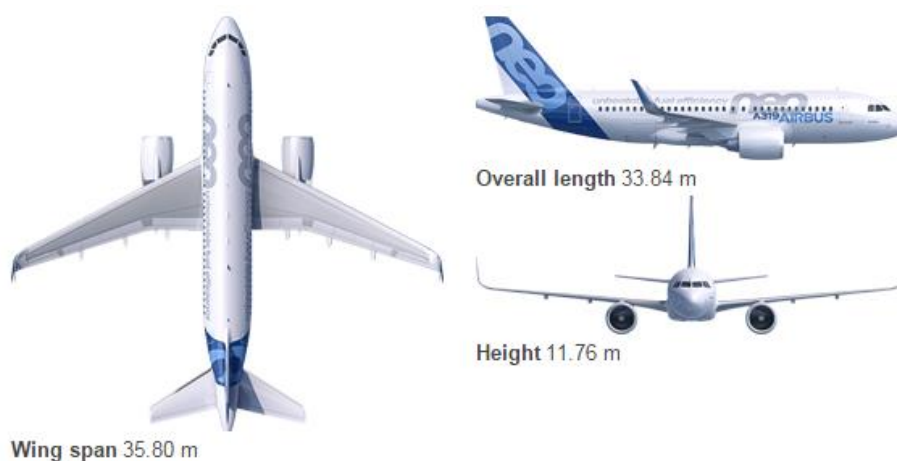


FIGURA 3.2 – Dimensões do Airbus 319 (AIRBUS, 2015).

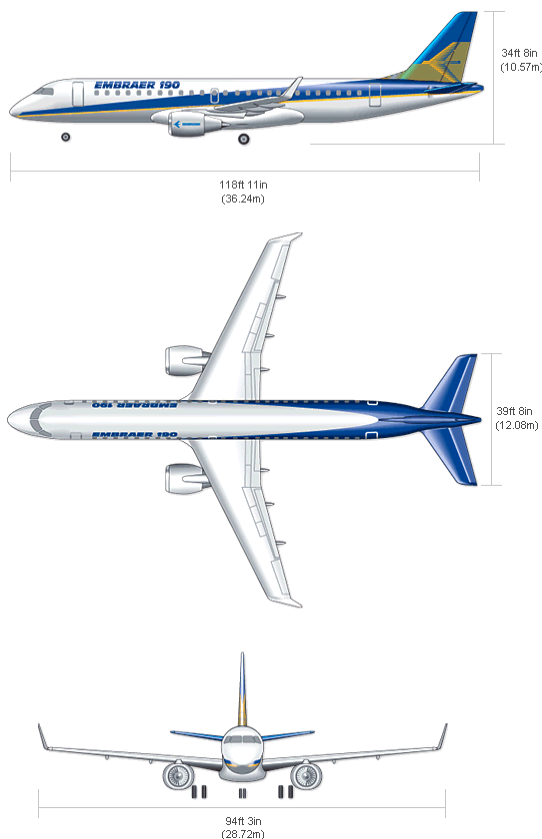


FIGURA 3.3 – Dimensões do Embraer 190 (EMBRAER, 2015).

3.2.2 Listagem de cargas elétricas

Outro ponto a se definir consiste na listagem de cargas a serem incluídas na simulação. Como apresentado por MOIR e SEABRIDGE (2008), as cargas elétricas instaladas em aeronaves são usualmente divididas nos seguintes tipos: motores e atuadores, iluminação, aquecedores assim como controladores de subsistemas e sistemas aviônicos.

Na categoria de motores e atuadores encontram-se todas as cargas cujo funcionamento baseia-se em motores como bombas de combustível e hidráulica, ventiladores e acionamentos rotativos como também contempla válvulas presentes em vários sistemas e atuadores elétricos lineares. Dentro da designação de iluminação estão as luzes sejam externas, da cabine de passageiros ou do *cockpit*. Os aquecedores contemplam principalmente sistemas de proteção contra gelo como em *probes* e nos para-brisas, assim como podem também incluir os equipamentos presentes nas *galleys* para preparação de refeições como fornos e aquecedores de água. Por fim, na categoria de controladores e aviônicos podem ser englobadas todas as cargas eletrônicas presentes na aeronave desde os computadores, rádios e equipamentos de

interface englobados pelo sistema aviônico como outros controladores de sistemas ou mesmo sistemas de entretenimento a bordo.

Neste modelo não há a intenção de se considerar cada equipamento individualmente instalado no avião, mas sim o efeito dos diferentes tipos de cargas independente de sua finalidade. A Tabela 3.2 apresenta um resumo de como cada um destes tipos de carga será abordado no modelo.

TABELA 3.2 – Modelos para as cargas.

Tipo de Carga	Modelo
Motores e Atuadores	Máquina de indução
Iluminação	Conversor estático
Aquecedores	Carga resistiva
Controladores e Aviônicos	Conversor estático

Como observado na tabela, a decisão pelo modelo do sistema de iluminação ser feito por conversor estático se deu pela utilização cada vez maior de sistemas de iluminação baseados em lâmpadas LED por apresentarem melhor MTBF e consumo energético ficando dessa forma implícita a presença de conversores no sistema. O conversor estático será considerado apenas uma vez no modelo de forma que seu comportamento represente os equipamentos que possuem conversão internamente assim como os alimentados pela distribuição DC do avião (TRU).

3.2.3 Arquitetura do sistema de distribuição

O trabalho de ABDELHAFEZ e FORSYTH (2009) apresenta propostas para arquiteturas de sistemas de distribuição. Para este estudo foi selecionado o modelo de distribuição centralizada (*Centralized EPDS*) por se tratar de uma arquitetura tradicional de sistema elétrico e pela faixa de potência a ser distribuída poder ainda ser considerada baixa. Esta arquitetura, como apresentada na Figura 3.4, consiste nos geradores enviando energia diretamente para um centro de distribuição, tradicionalmente localizado em um compartimento eletrônico da aeronave de onde partem as alimentações para as cargas ao longo da aeronave.

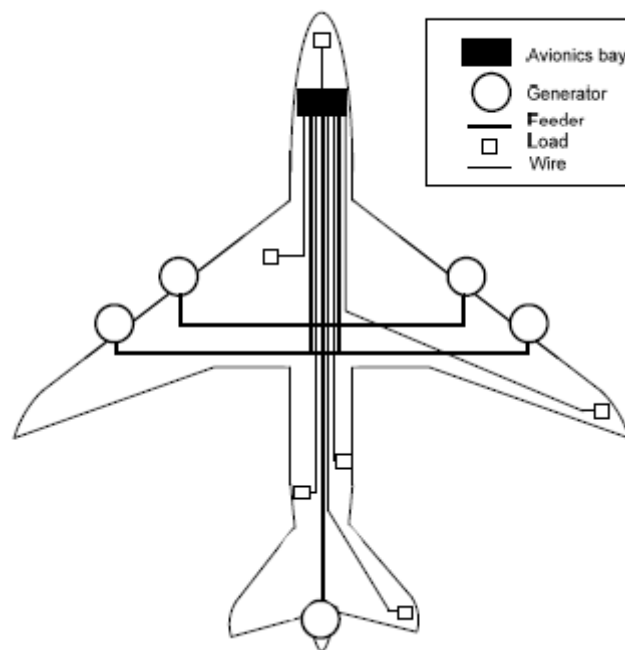


FIGURA 3.4 – Sistema de distribuição centralizada (ABDELHAFEZ; FORSYTH, 2009).

A Figura 3.5 apresenta a proposta de distribuição das cargas na aeronave. Na figura, a geração primária é representada pelos geradores instalados no motor assim como pelos cabos que os ligam à distribuição. O POR (*point of regulation*) para os geradores será considerado como sendo localizado na entrada da distribuição primária de forma que a geração englobe tanto os geradores como os cabos. O sistema de distribuição será modelado como uma queda de tensão proporcional à corrente no POR de forma a considerar as quedas referentes aos elementos de proteção e controle do sistema (contactores, fusíveis, disjuntores, e outros). A queda de tensão nos cabos que alimentam as cargas será modelada individualmente com vistas à localização das cargas e características do condutor utilizado. Detalhes sobre os cabos serão apresentados nos próximos itens.

Na representação também são encontradas referências à localização de cargas no avião. A “CARGA 1” representa as cargas encontradas comumente na região do *cockpit* e em baias eletrônicas na região frontal da aeronave, a “CARGA 2” representa por sua vez as cargas localizadas na região traseira da aeronave e a representação “MOTOR” indica provável posição de motores como bombas elétricas, por exemplo.

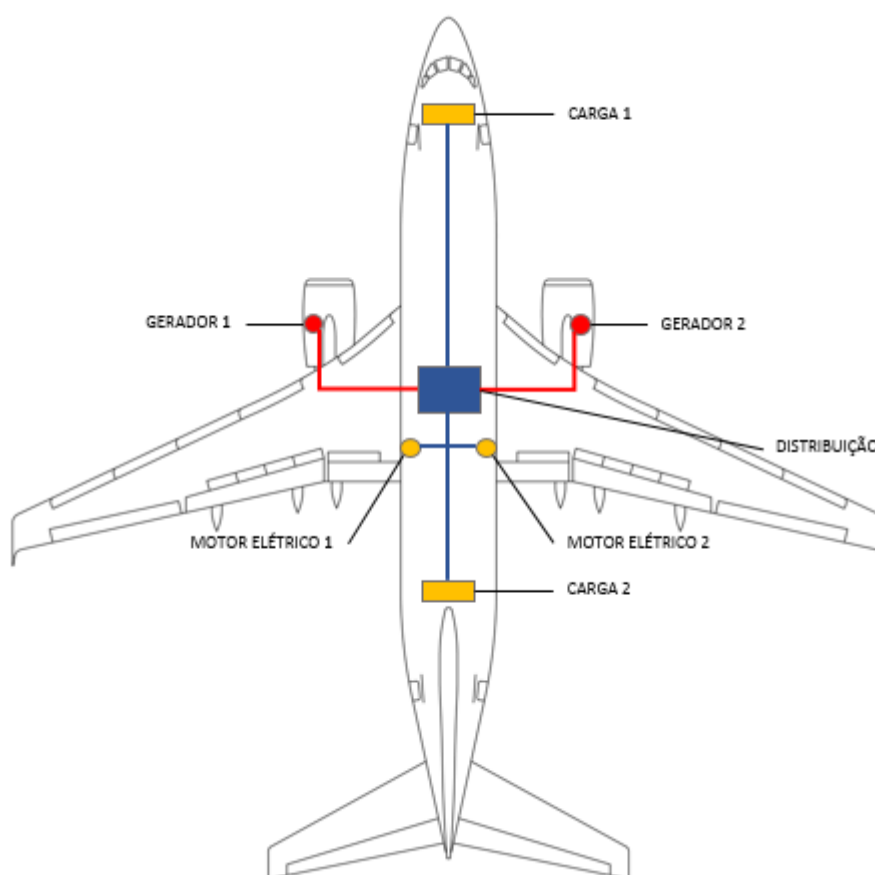


FIGURA 3.5 – Sistema de distribuição para o modelo de sistema elétrico.

3.3 Plataforma para simulação

A escolha da plataforma mais adequada para a simulação resulta de sua capacidade de atender os requisitos do estudo no que diz respeito ao detalhamento dos modelos e capacidade de fornecer as saídas desejadas.

Neste caso foram analisadas as possibilidades de utilização da plataforma AMESIM, EMTP e Simulink-MATLAB sendo esta a adotada. A escolha baseou-se no fato de se tratar de uma plataforma que juntamente com o módulo SimPower oferece uma grande variedade de modelos de máquinas e componentes lineares e não lineares. Também foi considerada a integração com o MATLAB facilita a automação das simulações e o tratamento dos dados de saída assim como o fato da plataforma possuir uma utilização mais variada e ampla no meio da engenharia o que facilitaria sua utilização em ambiente de projeto (licenças, treinamentos e outros) e a obtenção de modelos dos fornecedores dos equipamentos com objetivo de aprimorar a representatividade do modelo.

3.4 Representação dos componentes

3.4.1 Gerador

No âmbito da proposta deste modelo de exprimir os impactos dos componentes harmônicos sobre o sistema elétrico, o modelo do gerador apresenta-se como ponto de grande importância nesta construção visto que grande parte dos impactos das correntes drenadas sobre a tensão no sistema se deve à interação destas com as características do gerador.

Na Figura 3.6 é mostrada uma representação do funcionamento interno de um gerador aeronáutico AC moderno. Estes geradores utilizados como referência para este trabalho podem ter sua saída de potência modelada como uma máquina síncrona. A Figura 3.7 apresenta o circuito equivalente usualmente utilizado para descrever o comportamento desse tipo de máquina do qual é possível retirar as equações que representam seu funcionamento. A modelagem do gerador baseada nas informações citadas acima não é muito prática devido ao fato das indutâncias características da máquina variar com a posição do rotor e assim com o tempo. Para tal é adotada a transformação conhecida como $dq0$ a qual foi proposta inicialmente por PARKER (1929) e que é capaz de transformar as grandezas AC em duas grandezas invariantes no tempo proporcionando assim a descrição do funcionamento da máquina em equações onde as equações de fluxo concatenado não contenham mais indutâncias que dependam da posição do rotor.

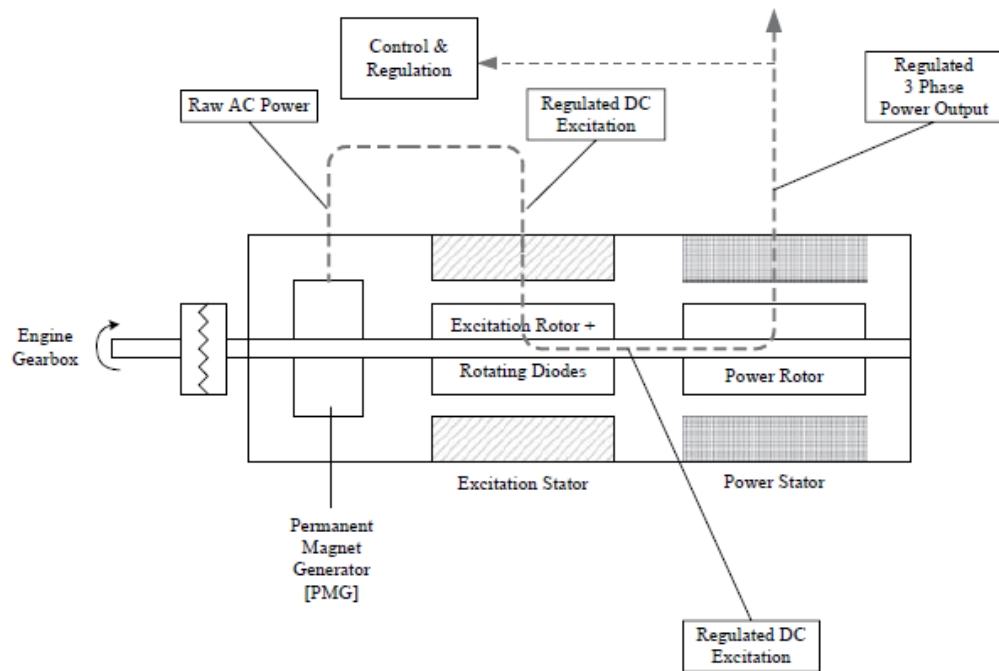


FIGURA 3.6 – Representação de gerador elétrico aeronáutico (MOIR; SEABRIDGE, 2008).

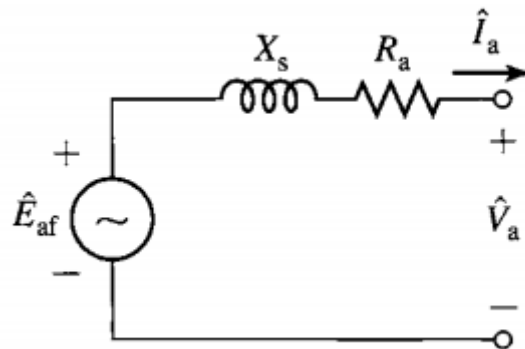


FIGURA 3.7 – Circuito equivalente de uma máquina síncrona (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).

O modelo definido acima descreve o equipamento por meio das impedâncias observadas para a frequência fundamental da máquina, no entanto, o campo magnético gerado no estator pelos harmônicos ali presentes possui uma rotação muito maior que a velocidade real do rotor levando a impedância observada por esses componentes a se aproximar da impedância de sequência negativa como apresentado em TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION (1996).

Como proposto por ARRILLAGA e WATSON (2003) a admitância que representa o fluxo de harmônicos pelo gerador pode ser descrita pela Equação 3.1 onde R representa as

perdas na máquina, X_d'' é a reatância sub-síncrona de eixo direto e h é um fator dependente da frequência de forma a contabilizar o efeito pelicular.

$$Y_{gh} = \frac{1}{R\sqrt{h} + jX_d''h} \quad (3.1)$$

Para fins de simulação foi adotado o modelo de um gerador de 60 kVA encontrado na literatura e que se apresenta dentro do intervalo de capacidades compatível com o avião proposto. Estes parâmetros são descritos no trabalho de HOLLOWAY (1954) os quais são apresentados na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Parâmetros do gerador de 60 kVA.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	60 kVA
Tensão Nominal	115/200 VAC
Frequência	400 Hz
X_d	3,17 pu
X_d'	0,486 pu
X_d''	0,23 pu
X_q	1,73 pu
X_q''	0,253 pu
X_l	0,153 pu
T_d'	0,0034 s
T_d''	0,0013 s
T_q''	0,0017 s
R_s	0,029 pu

3.4.2 Conversores AC/DC

Em aeronaves nas quais o sistema elétrico é baseado em geração AC, a necessidade de fornecimento de alimentação DC para sistemas eletrônicos, acionamento de válvulas e outros equipamentos é normalmente provida por conversores estáticos conhecidos como TRU (*Transformer Rectifier Unit*) as quais podem se caracterizar como retificadores controlados ou não controlados.

TRUs tipicamente consistem em conversores com uma retificação em 12 pulsos com a utilização de um transformador com primário em estrela e dois secundários como saída, um em estrela outro em delta como apresentado por MOIR e SEABRIDGE (2008). Há ainda diversos trabalhos na literatura que propõem a utilização de conversores com ainda mais pulsos com vistas a reduzir a emissão de harmônicos assim como melhorar a qualidade do sinal de saída das mesmas.

Para a realização destes estudos, a TRU foi modelada como um conversor de 12 pulsos como na Figura 3.8 apresentada em SANGLIKAR e JOHN (2006). As duas pontes de diodo presentes no modelo foram interconectadas por meio de indutores que representam as características de filtro da saída do equipamento. O valor destas indutâncias foi definido como o suficiente para manter o *ripple* na corrente da saída abaixo de 10 % como apresentado em MONROY, LE-HUY e LAVOIE (2012).

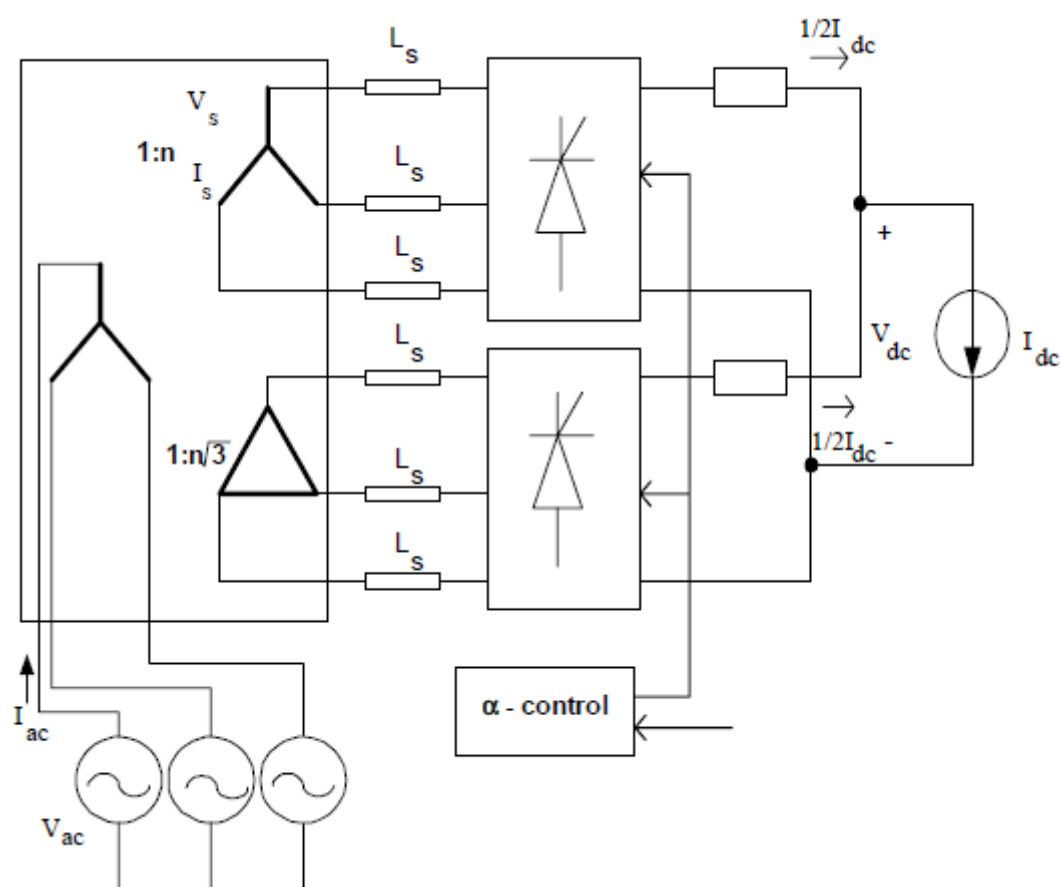


FIGURA 3.8 – Arquitetura de um conversor de 12 pulsos (SANGLIKAR; JOHN, 2006).

A carga observada na saída da TRU foi modelada como uma resistência a qual é proporcional à potência nominal de saída definida para o equipamento. Para este trabalho, foi escolhida uma TRU com capacidade nominal de 300 A de forma a ser coerente com os recentes desenvolvimentos da indústria que, mesmo que em quantidade diferente, tem aplicado conversores desta capacidade como mostrado na Tabela 3.4 baseada nos dados de MOIR e SEABRIDGE (2008).

TABELA 3.4 – Conversores em aeronaves recentes.

Aeronaves	Conversores
Airbus 380	3 x 300A BCRU e 1 x 300A TRU
A400M	3 x 300A BCRU e 1 x 300A TRU

Em alguns casos, há ainda a possibilidade de encontrarmos conversores que se utilizam de pontes retificadoras de 6 pulsos para conversão da energia devido à sua simplicidade construtiva, menor peso pela ausência de transformador principalmente quando

se tem interesse em uma tensão de saída elevada. De forma a incorporar os efeitos deste tipo de conversor no sistema, o mesmo também foi modelado de forma similar ao conversor citado anteriormente como apresentado na Figura 3.9.

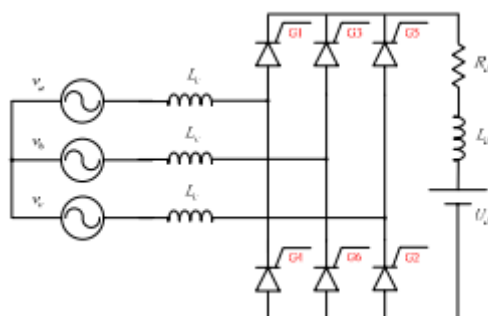


FIGURA 3.9 – Arquitetura de um conversor de 6 pulsos (CHANG; CHIN; LEE, 2006).

Uma possibilidade de encontro deste tipo de conversor consiste nas PDU's (*power drive units*) utilizados no acionamento de motores que necessitam de controle e muitas vezes sua atuação é intermitente, a previsão da demanda elétrica destes equipamentos torna-se mais complexa. Para fins de simulação será considerada para o conversor de 6 pulsos presente no modelo a mesma carga atribuída à TRU de forma que se possa capturar seus efeitos além de possibilitar uma melhor comparação entre a utilização destes dois tipos de conversor.

3.4.3 Motor

Outro comportamento a ser modelado de forma a obter uma visão do comportamento do sistema elétrico neste tipo de estudo diz respeito às máquinas elétricas rotativas presentes nos sistemas da aeronave mais comumente encontrados nos ventiladores, na geração de potência hidráulica assim como no sistema de combustível na alimentação do motor e transferência entre tanques.

O modelo destes componentes será considerado como sendo um motor de indução trifásico de potência coerente com as dimensões da aeronave a ser modelada de forma a ser possível a observação dos efeitos.

O circuito equivalente de um motor de indução é apresentado na Figura 3.10 em que R_s representa a resistência de estator, L_s a indutância do estator, L_m a indutância de magnetização, L_r a indutância do rotor, R_r a resistência do rotor e s o escorregamento.

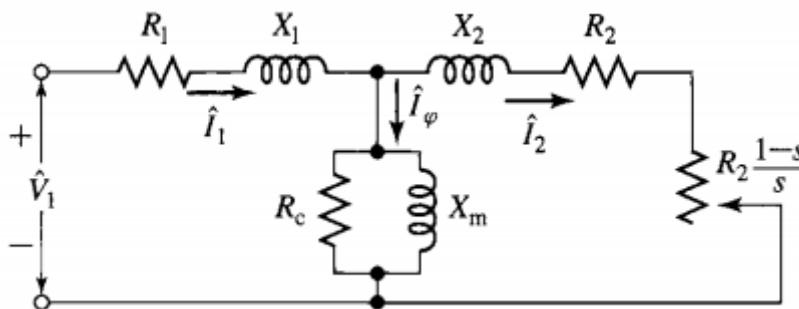


FIGURA 3.10 – Circuito equivalente de um motor de indução (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).

Similarmente como descrito na modelagem da máquina síncrona, para um motor de indução a impedância observada pelos harmônicos presentes na alimentação do equipamento se aproxima da impedância de sequencia negativa. Para o motor de indução a indutância neste caso é usualmente tomada pela condição de rotor travado enquanto a resistência permanece como uma característica da máquina dependente da ordem do harmônico. A indutância de rotor travado pode ser obtida neste tipo de modelamento considerando um escorregamento unitário para a máquina ($s = 1$).

Para dimensionamento da demanda de potência do motor presente no modelo foi considerada uma máquina compatível com as dimensões da aeronave em modelagem. Neste caso foi considerada a bomba hidráulica instalada no A320 cujas curvas características são apresentadas na Figura 3.11.

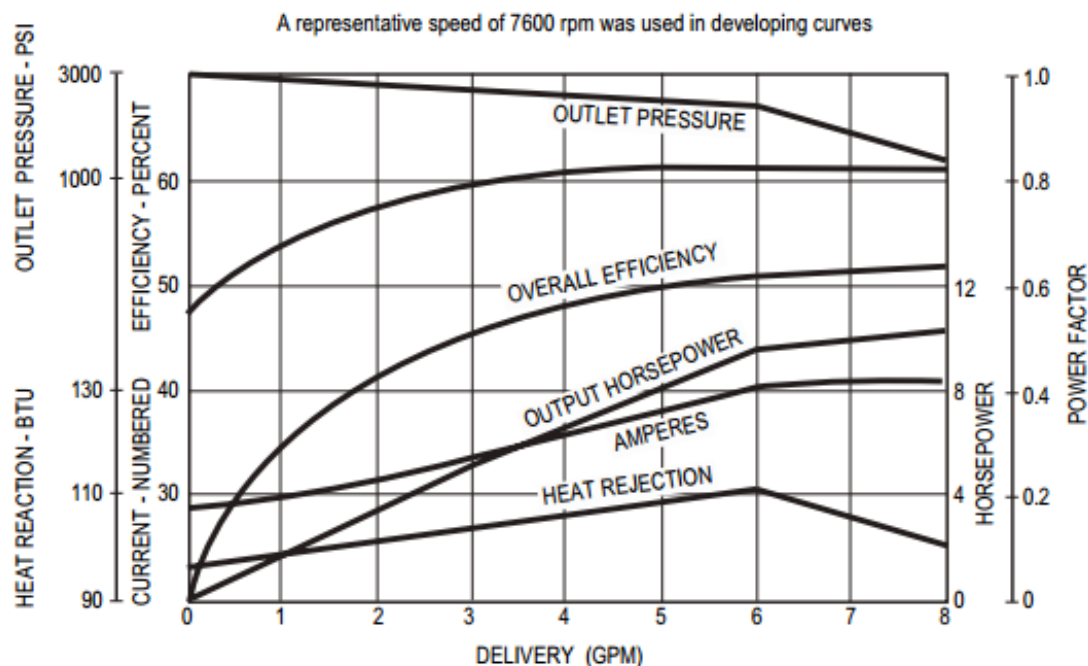


FIGURA 3.11 – Curvas de performance da bomba hidráulica (EATON AEROSPACE GROUP, 2013).

3.4.4 Fonte de corrente harmônica

Outro item incorporado ao modelo do sistema elétrico consiste em uma fonte controlada de correntes harmônicas na qual é possível se definir o conteúdo exato de harmônicos contidos e a amplitude desta corrente de forma a se estudar a resposta do sistema elétrico para uma condição específica de distorção.

No caso deste estudo, o objetivo principal consiste em se modelar os limites exatos de distorção definidos nas normas de forma a testá-los em diferentes situações no sistema elétrico. Esta fonte de corrente é trifásica e é possível a definição até do 40º harmônico.

3.4.5 Cargas resistivas

A modelagem das cargas resistivas da aeronave como aquecedores em geral incluindo itens de *galley* como fornos e cafeteiras foram feita baseado em uma carga trifásica puramente resistiva a qual teve seu valor baseado no valor equivalente à aeronave de referência apresentada anteriormente.

No modelo do sistema foram incluídos também elementos capazes de representar cargas não balanceadas monofásicas que possam vir a estar presentes no avião de forma a

permitir uma análise dos impactos deste desbalanceamento nos harmônicos gerados pelos demais elementos do sistema. Estes casos são modelados como cargas resistivas ligadas entre fase A.

Há várias possibilidades de cargas que podem vir a ser alimentadas nesta topologia destacando-se pequenos aquecimentos, luzes e equipamentos eletrônicos com conversores dedicados.

Como estas cargas possuem variados níveis de consumo de potência, torna-se difícil a definição de valor para inclusão no modelo. Desta forma, para fins de estudo dos efeitos destas cargas na propagação de harmônicos no sistema, será considerada uma inserção de cargas desbalanceadas equivalentes a 10% da capacidade total do sistema.

3.4.6 Feeders

A influência dos cabos de alimentação das cargas no desempenho do sistema foi descrita como um modelo de parâmetros concentrados o qual representa a resistência e indutância dos condutores utilizados.

A opção por uma abordagem por parâmetros concentrados deve-se a uma análise sobre a possibilidade da propagação da onda vir a afetar o resultado. Para tal foi comparado o menor comprimento de onda presente entre os componentes de frequência a serem estudadas ao comprimento dos *feeders* com base na Equação 3.2 na qual corresponde à velocidade de propagação do sinal, f é a frequência e λ o comprimento de onda.

$$v = \lambda \cdot f \quad (3.2)$$

Com base neste método é possível se verificar que o menor comprimento de onda que no caso corresponde à 40ª harmônica de 400 Hz ainda é de cerca de 1000 vezes podendo ser considerado que cada ponto do sistema é energizado simultaneamente não justificando assim a implementação de modelos com parâmetros distribuídos para fins de estudo de harmônicos.

Os comprimentos e características consideradas para cada *feeder* no presente modelo podem ser observadas na Tabela 3.5. Para o cálculo da impedância, foram considerados os dados presentes em EXNER e SINGER (1953) para alimentadores de cobre sem distanciamento entre os mesmos.

TABELA 3.5 – Características dos condutores utilizados no modelo

Linha de alimentação	Comprimento	Impedância
Distribuição – Carga 1	16 m	$0,0367 + j0,0139$
Distribuição – Carga 2	16 m	$0,0367 + j0,0139$
Distribuição – Motor	5 m	$0,0115 + j0,0044$

Os comprimentos apresentados foram baseados nas referências apresentadas no início deste capítulo como sendo um valor coerente com a categoria da aeronave. Para a simulação todas as cargas serão consideradas como localizadas nas posições 1 ou 2 exceto pelos motores os quais foram considerados em uma posição distinta na aeronave.

3.5 Modelo do sistema elétrico

A Figura 3.12 mostra o modelo proposto para o sistema elétrico a ser utilizado nas simulações em sua representação no Simulink.

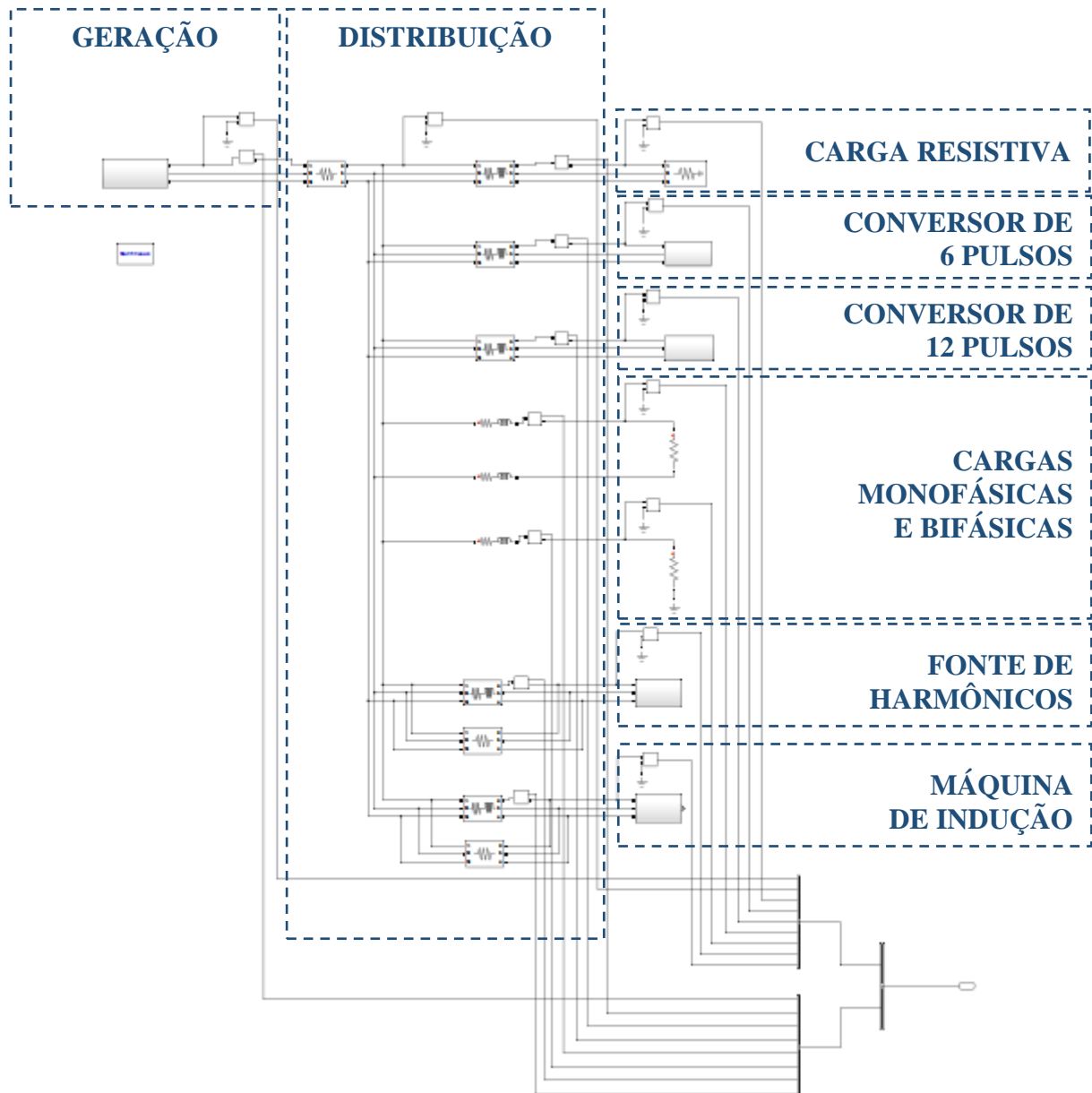


FIGURA 3.12 – Modelo do sistema elétrico em Simulink.

4 Simulações do sistema elétrico

Neste item serão apresentados os resultados das simulações computacionais realizadas a partir do modelo de sistema elétrico descrito no item anterior.

Para estes estudos são levantados alguns cenários com combinações comuns dos diferentes tipos de cargas elétricas em uma aeronave e com diferentes parcelas de contribuição de cada elemento.

Os itens a seguir descrevem os resultados incluindo gráficos referentes à composição harmônica das ondas de tensão e corrente presentes no POR assim como informações como THD de ambas as grandezas, e informações sobre a amplitude do valor da corrente.

4.1 Efeito do tipo de conversor

Para este item, será considerada uma configuração básica do sistema composto por uma carga resistiva trifásica (potência de 10 kVA), um conversor estático (TRU de 300 A em 28 VDC) e um motor de indução nas condições descritas no capítulo anterior.

Com o objetivo de avaliar o impacto no sistema dos diferentes tipos de conversor, serão simuladas uma arquitetura de 6 pulsos, uma de 12 pulsos e outra com o espectro de distorção correspondente ao limite permitido pela DO-160G como apresentado no item 2.4.2.

4.1.1 Caso 1 - Conversor de 6 pulsos

As Figuras 4.1 a 4.3 juntamente com a Tabela 4.1 apresentam os resultados das simulações utilizando um conversor de 6 pulsos.

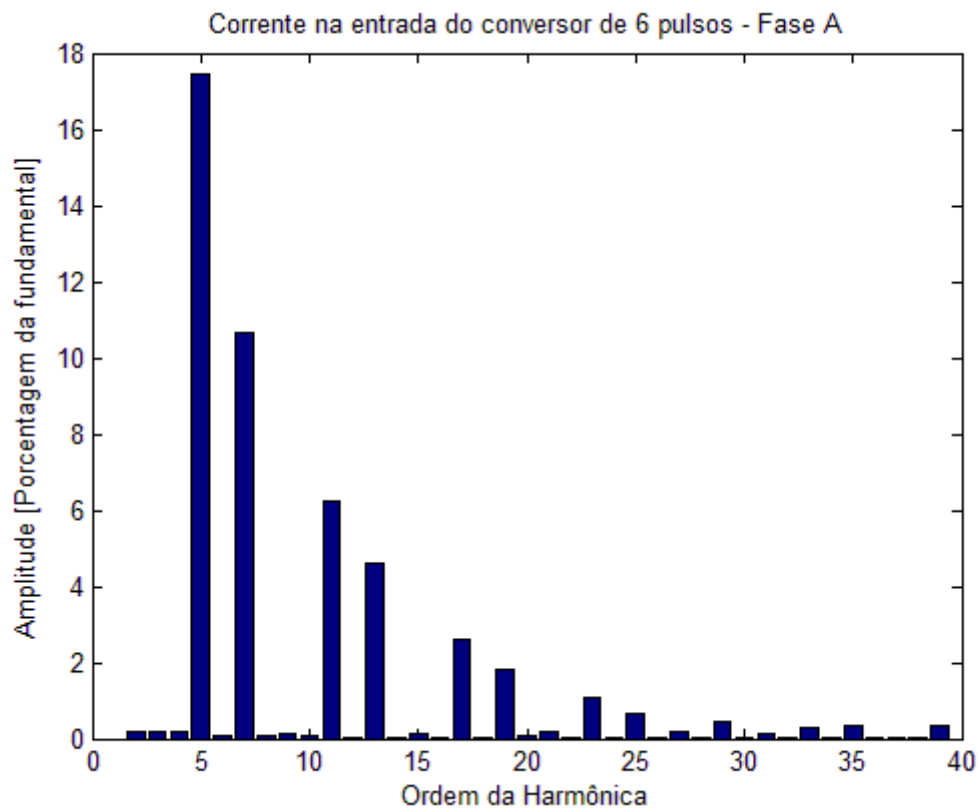


FIGURA 4.1 – Espectro da corrente na entrada do conversor (Caso 1).

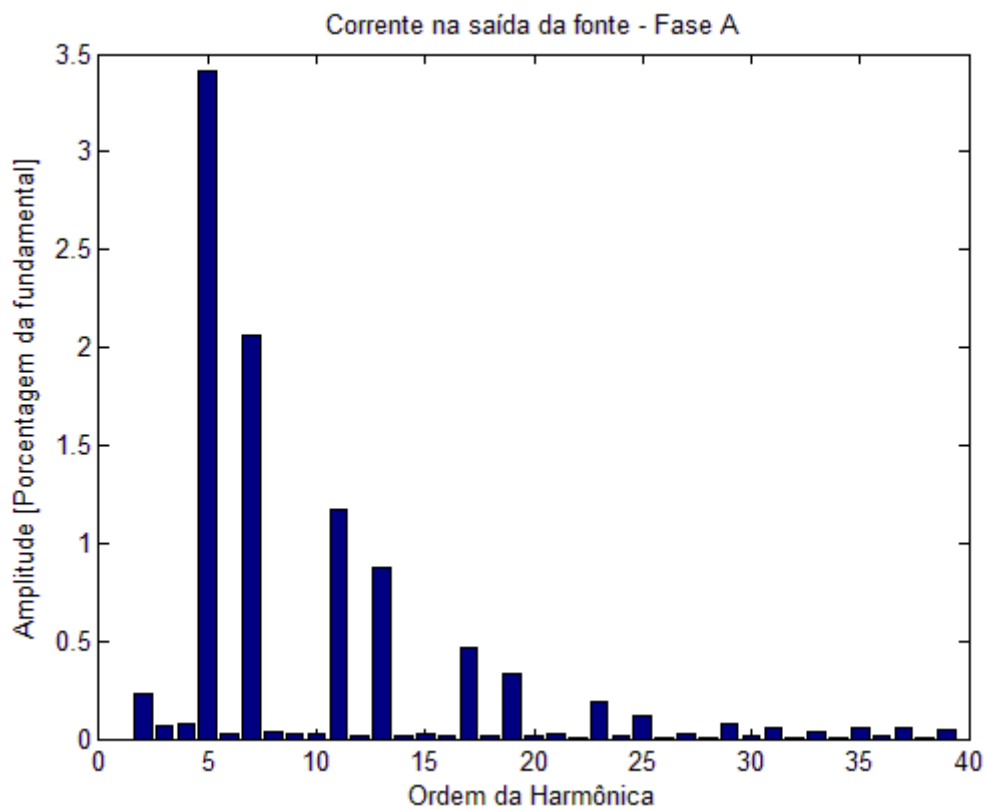


FIGURA 4.2 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 1).

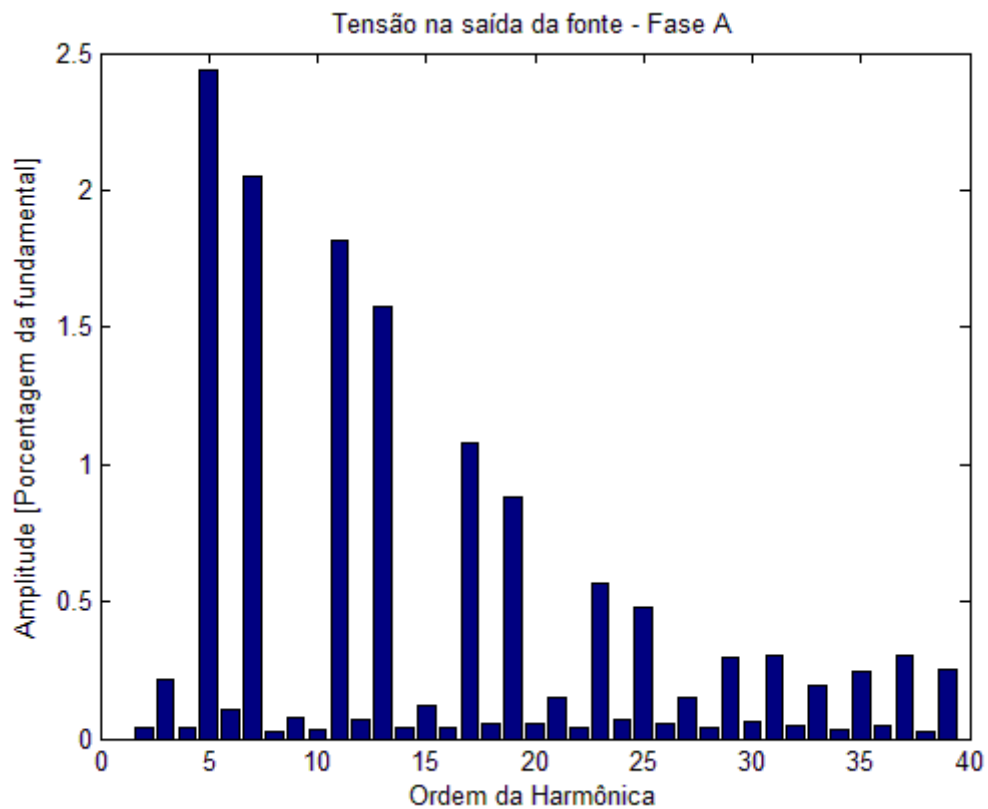


FIGURA 4.3 – Espectro da tensão na fonte (Caso 1).

TABELA 4.1 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 1).

Grandeza	Valor
I_t (GERADOR)	100,7 A
I_1 (GERADOR)	100,6 A
THD_i	4,29 %
THD_v	4,36 %

4.1.2 Caso 2 - Conversor de 12 pulsos

As Figuras 4.4 a 4.6 juntamente com a Tabela 4.2 apresentam os resultados das simulações utilizando um conversor de 12 pulsos.

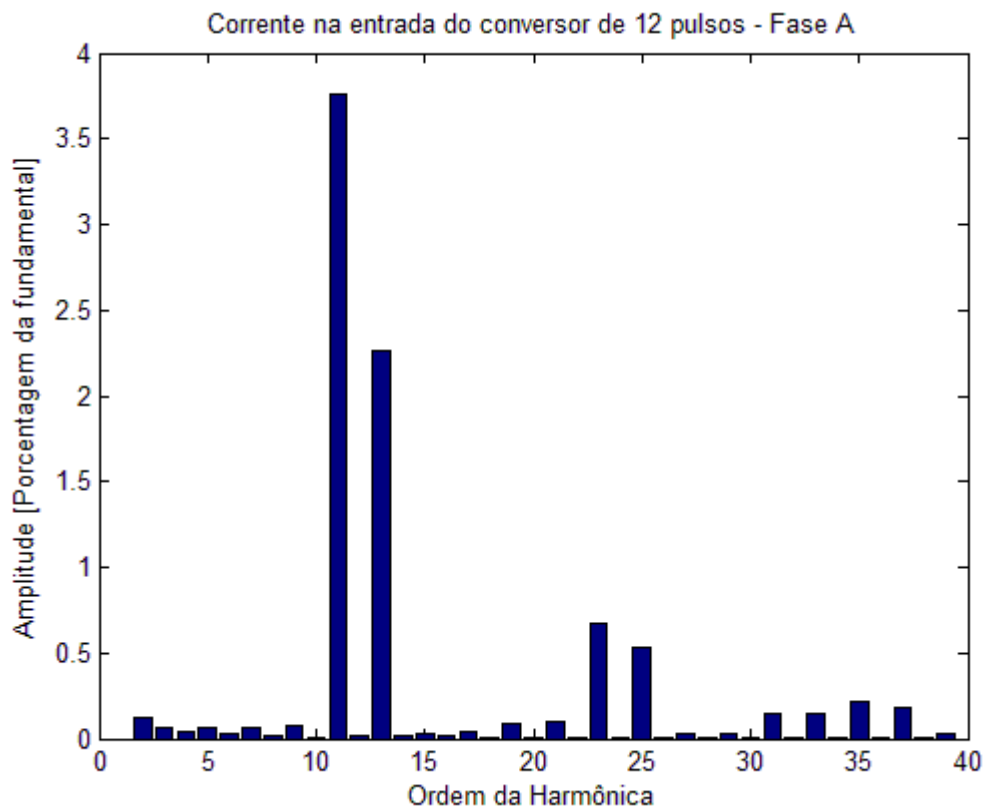


FIGURA 4.4 – Espectro da corrente na entrada do conversor (Caso 2).

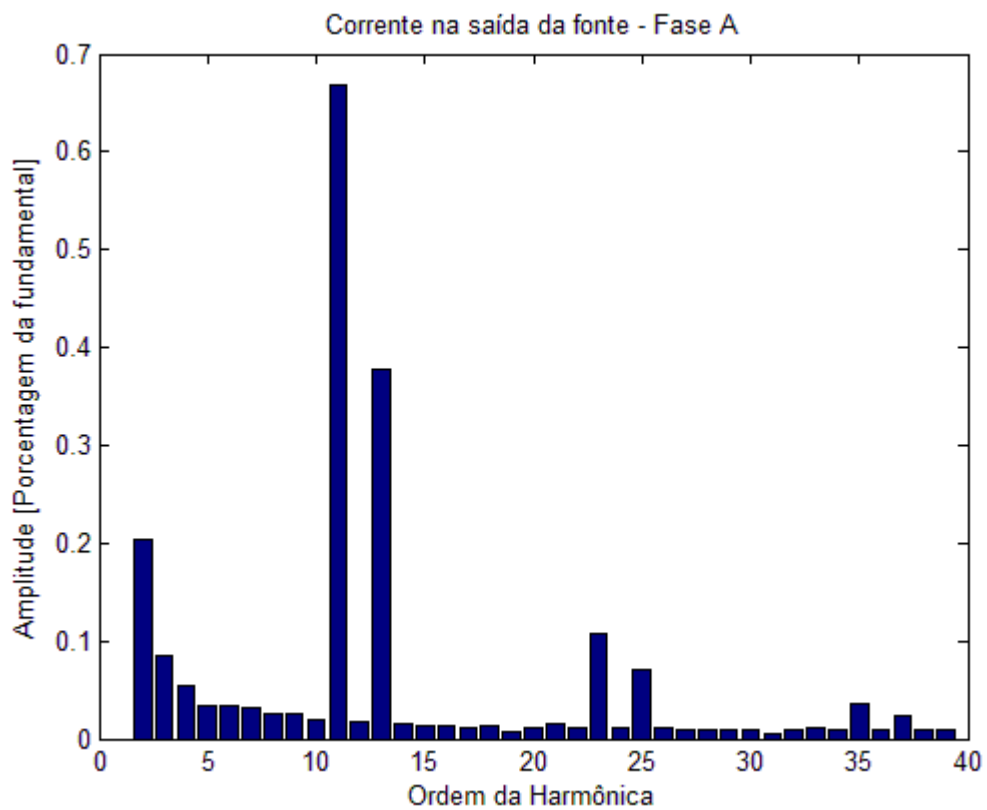


FIGURA 4.5 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 2).

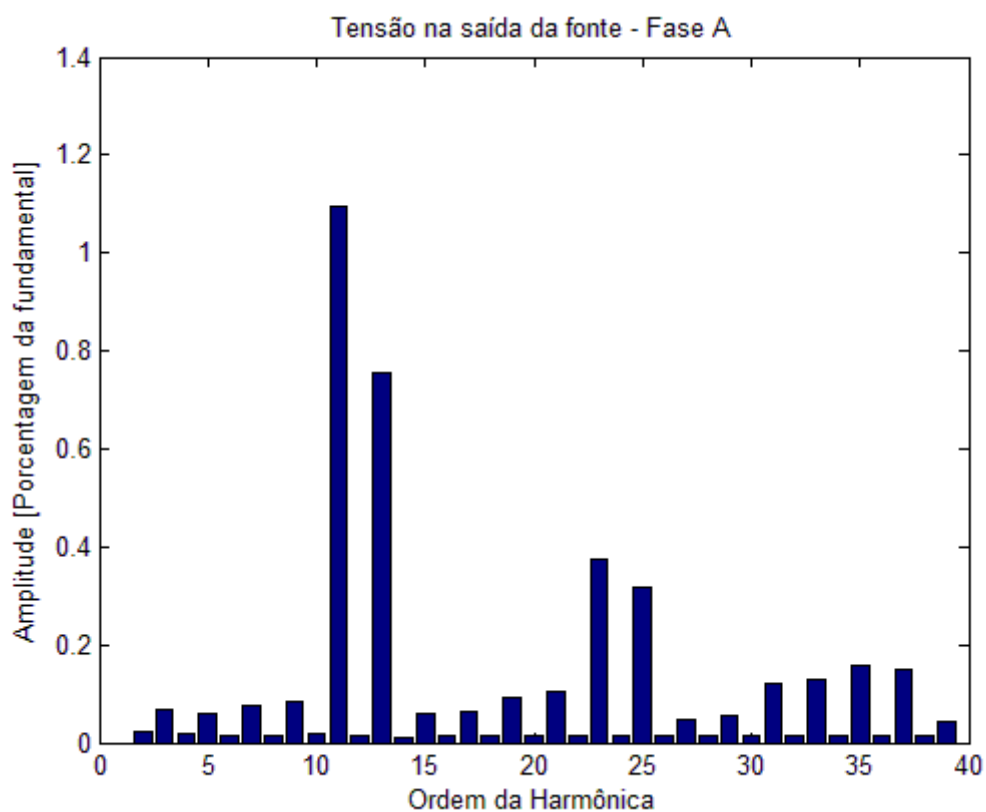


FIGURA 4.6 – Espectro da tensão na fonte (Caso 2).

TABELA 4.2 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 2).

Grandeza	Valor
I_t (GERADOR)	99,0 A
I_1 (GERADOR)	99,0 A
THD_i	0,82 %
THD_v	1,47 %

4.1.3 Caso 3 - Conversor com a distorção limite da DO-160G

As Figuras 4.7 a 4.9 juntamente com a Tabela 4.3 apresentam os resultados das simulações utilizando um conversor apresentando um conteúdo harmônico nos limites da DO-160G.

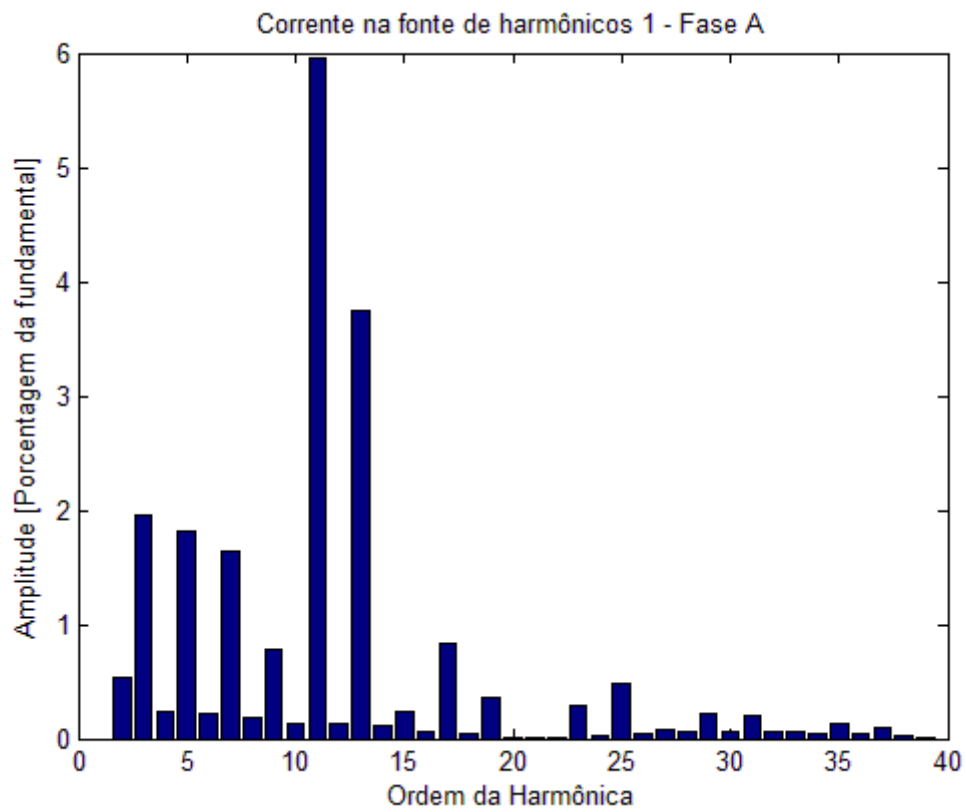


FIGURA 4.7 – Espectro da corrente na entrada do conversor (Caso 3).

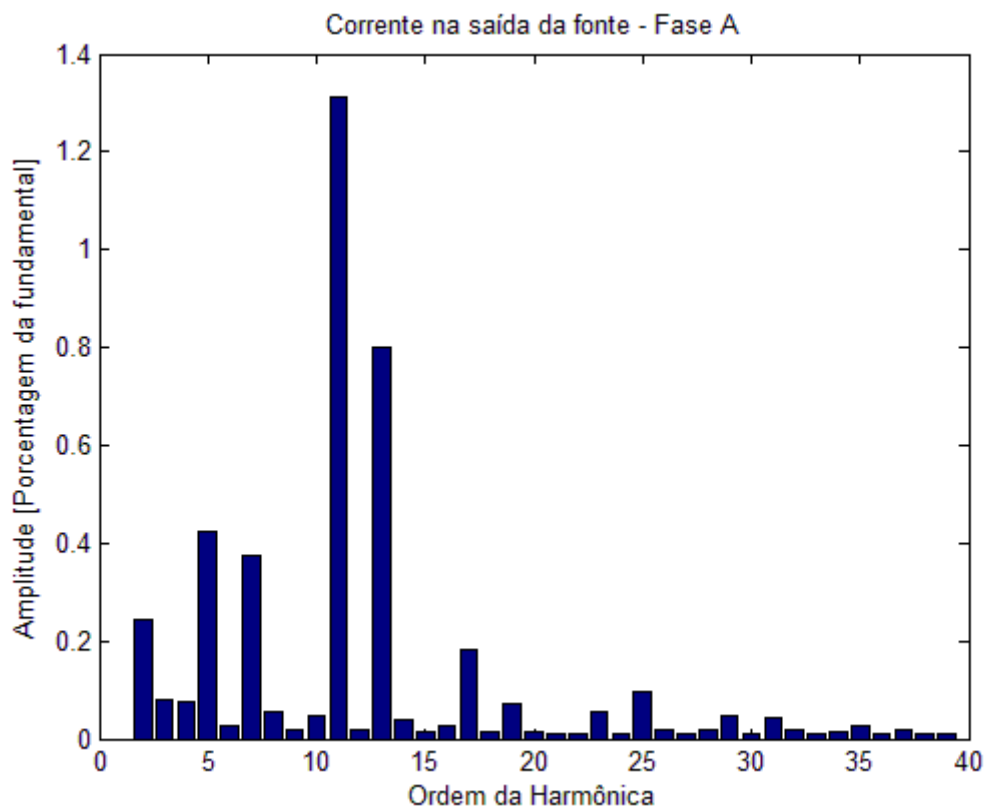


FIGURA 4.8 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 3).

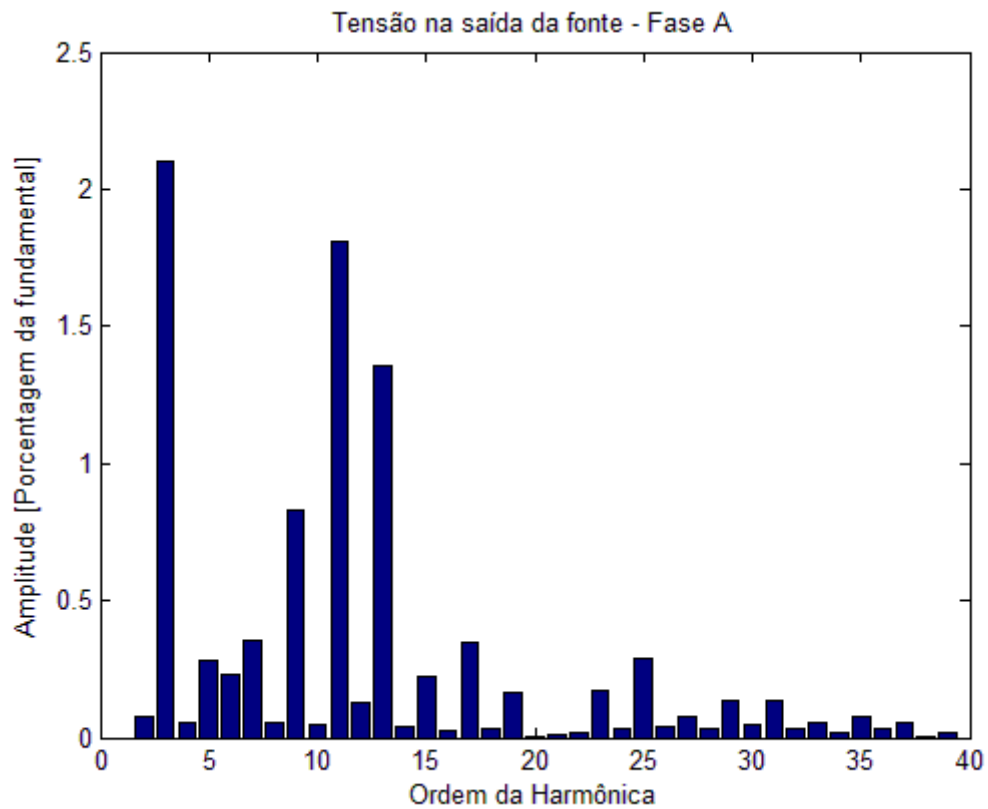


FIGURA 4.9 – Espectro da tensão na fonte (Caso 3).

TABELA 4.3 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 3).

Grandeza	Valor
I_t (GERADOR)	88,5 A
I_1 (GERADOR)	88,4 A
THD_i	1,68 %
THD_v	3,30 %

4.1.4 Análise dos resultados

A Tabela 4.4 apresenta uma comparação entre os casos apresentados neste item.

TABELA 4.4 – Resumo das simulações para diferentes conversores.

Tipo de Conversor	THD_i	THD_v
6 Pulsos	4,29 %	4,36 %
12 Pulsos	0,82 %	1,47 %
Limite da DO-160G	1,68 %	3,30 %

Nos resultados das simulações apresentados nos itens anteriores foi possível observar o comportamento de um sistema com arquitetura próxima de um sistema elétrico tradicional onde se buscou contemplar todos os diferentes tipos de cargas comumente encontradas.

Com base nestas informações, uma primeira análise a ser realizada consiste no impacto dos diferentes tipos de conversores estáticos utilizados nos sistemas. Estes se apresentaram como os responsáveis pela maior contribuição para a presença de distorção na fonte.

No primeiro caso simulado, tem-se o conversor baseado em uma retificação de 6 pulsos a qual introduz grande quantidade de harmônicos no sistema. Quando comparado o espectro de corrente de entrada no conversor, com os níveis estabelecidos na DO-160G, fica clara o distanciamento desta solução para os requisitos a qual se dá em todos os harmônicos característicos deste tipo de retificação. Devido à ordem de grandeza da amplitude dos harmônicos, é possível se identificar na composição da onda de tensão espectro muito similar ao da corrente no conversor mesmo que este represente apenas pequena parte do carregamento total do sistema.

Na simulação que envolve o conversor de 12 pulsos, uma primeira observação do espectro de distorção mostra uma considerável diminuição em relação ao apresentado no caso anterior. Apesar do destaque para a amplitude do 11º e 13º harmônicos, ambos estão dentro dos limites recomendados pela norma para esta ordem de harmônicos. Por meio desta comparação, verifica-se que a norma apresenta limites relativamente mais elevados para os harmônicos característicos dos conversores de 12 pulsos sugerindo que uma atenção especial foi dada a este último na elaboração da norma.

No terceiro caso, foi realizado, para fins de comparação, teste considerando os limites recomendados pela DO-160G para o espectro de corrente da carga. Neste caso não houve surpresas sendo as tensões e correntes identificadas no sistema compatível com as características da carga.

Com relação à distorção harmônica total no sistema nessas condições, foi verificado o THD da tensão na fonte variou entre 1,47 % e 4,36 % deixando destacada a diferença entre as soluções de conversores, porém mesmo para o conversor de 6 pulsos, este valor não ultrapassa a qualificação das cargas que consiste em um nível de distorção de 8 % segundo a DO-160G ou mesmo a recomendação da MIL-STD-704F que é de 5 %.

4.2 Efeito da dimensão ou número de conversores

Esta parte do estudo visa verificar o impacto da magnitude da carga geradora de harmônicos no total de carga do sistema. Dessa forma a simulação irá se basear no gerador carregado com uma parcela de carga resistiva e outra composta por um conversor de 6 pulsos. O gerador será carregado com um limite de 80 % de carga de forma a representar uma condição de operação possível além de evitar efeitos do carregamento excessivo do mesmo.

4.2.1 Caso 4 – Conversor de 6 pulsos com 20 % do nominal do sistema

As Figuras 4.10 a 4.11 juntamente com a Tabela 4.5 apresentam os resultados das simulações do caso 4

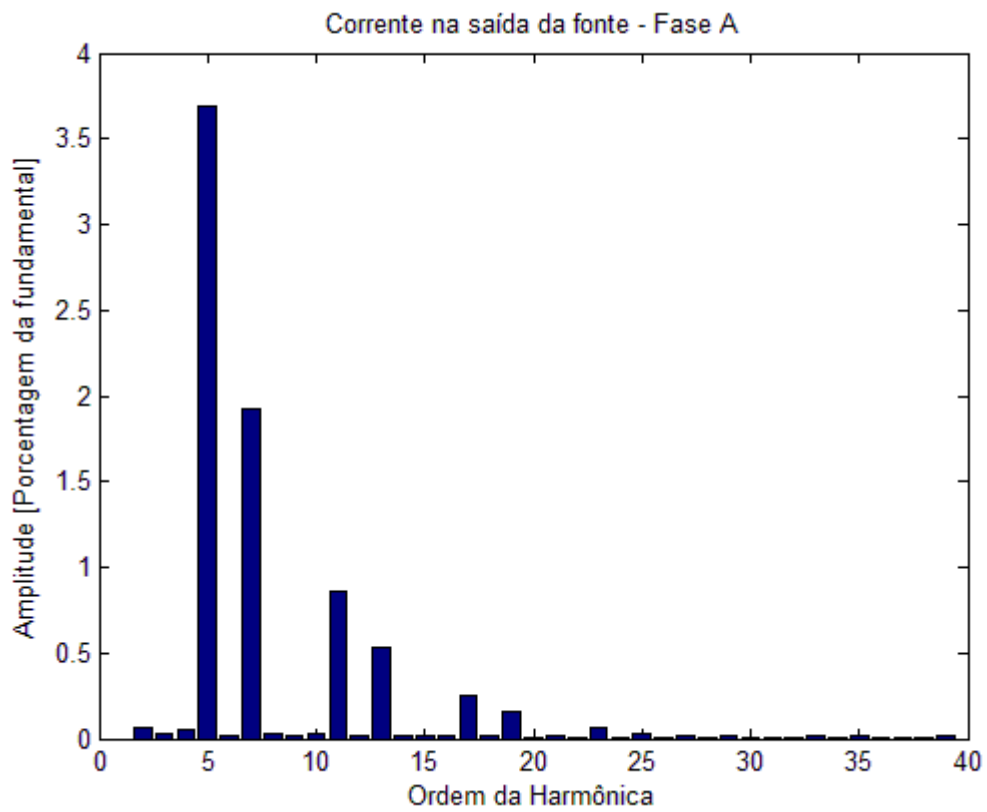


FIGURA 4.10 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 4).

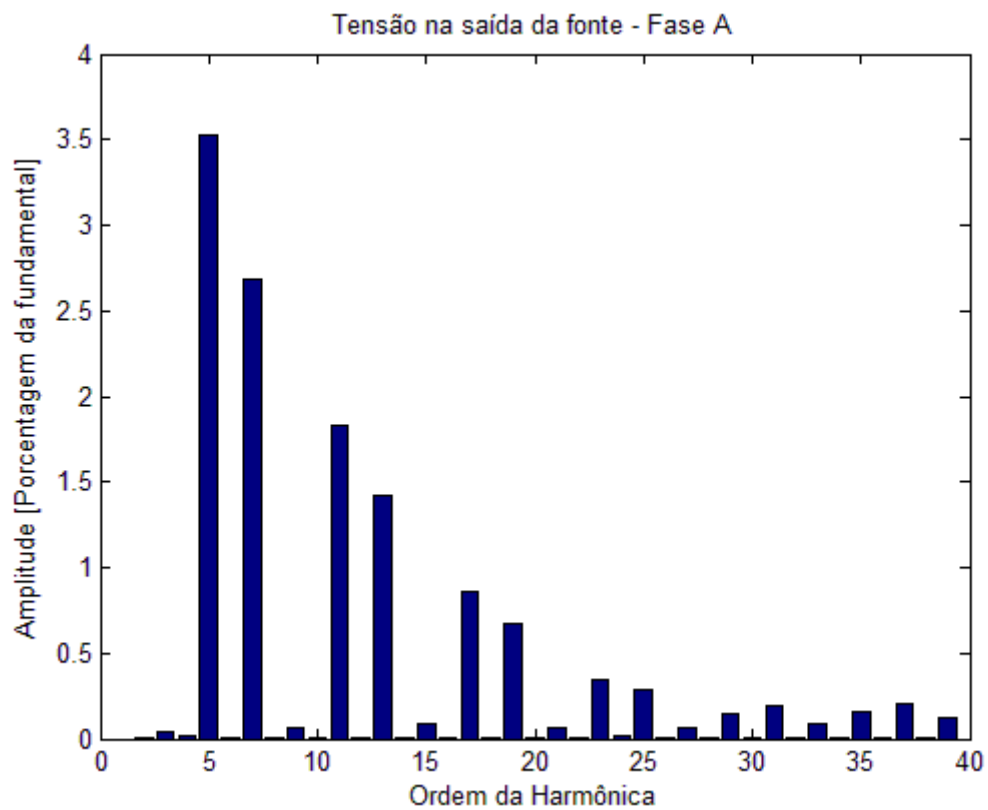


FIGURA 4.11 – Espectro da tensão na fonte (Caso 4).

TABELA 4.5 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 4).

Grandeza	Valor
I_t (GERADOR)	131,6 A
I_1 (GERADOR)	131,5 A
THD_i	4,29 %
THD_v	5,15 %

4.2.2 Caso 5 – Conversor de 6 pulsos com 60 % do nominal do sistema

As Figuras 4.12 a 4.14 juntamente com a Tabela 4.6 apresentam os resultados das simulações do caso 5.

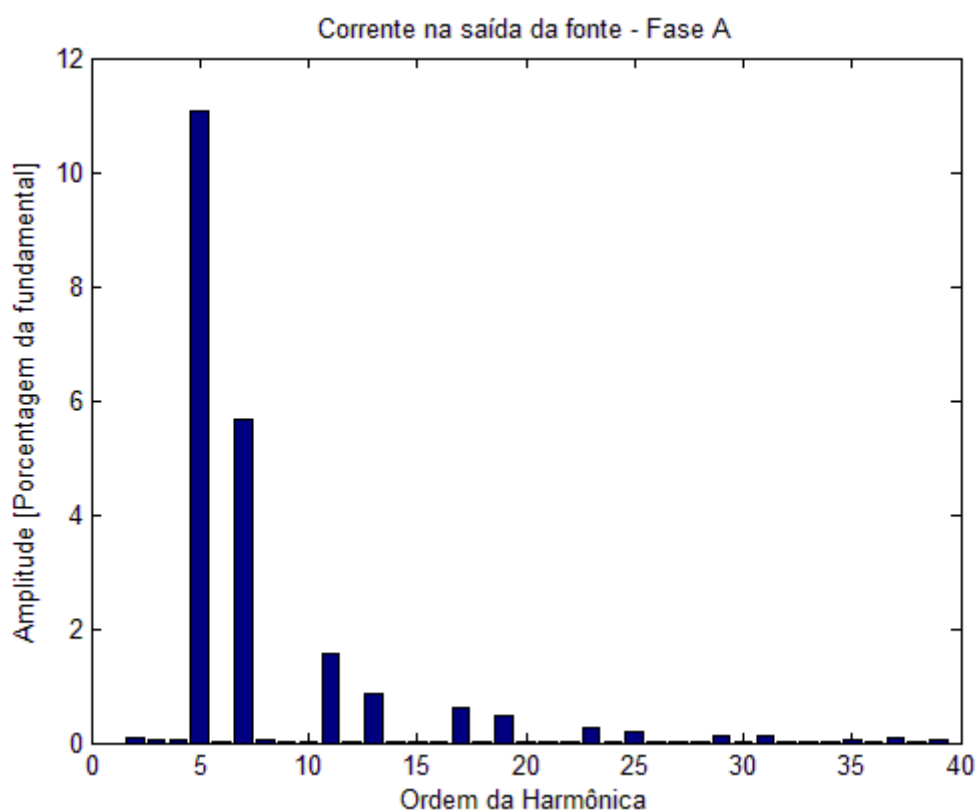


FIGURA 4.12 – Espectro da corrente na saída da fonte (Caso 5).

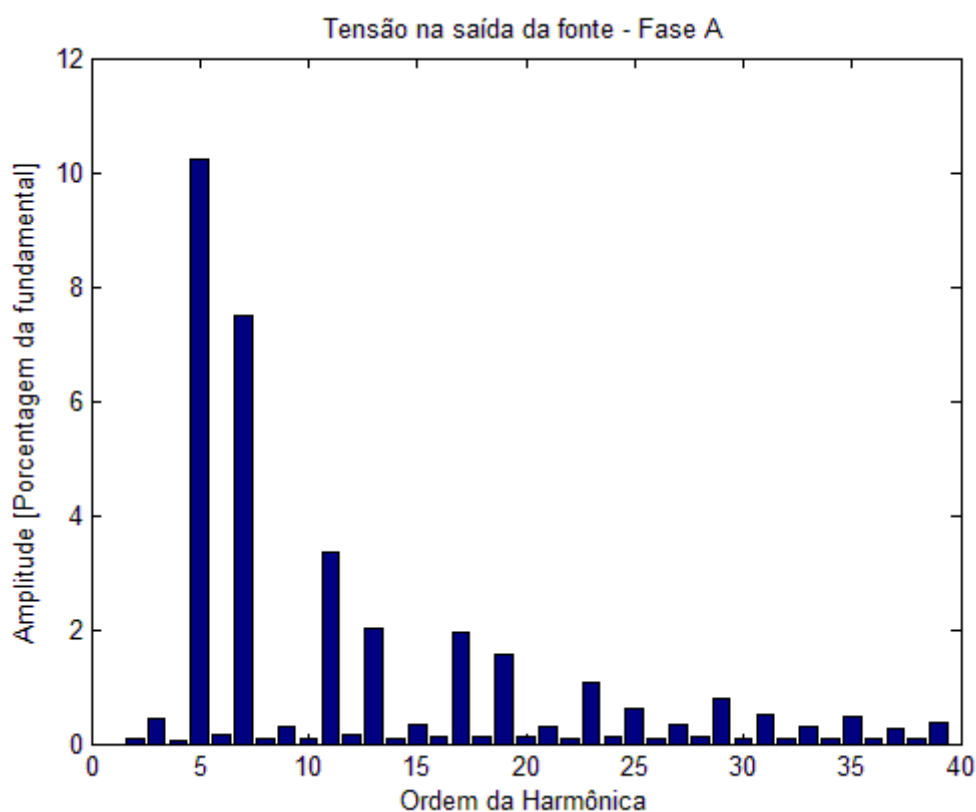


FIGURA 4.13 – Espectro da tensão na fonte (Caso 5).

TABELA 4.6 – Corrente e distorção harmônica total na saída do gerador (Caso 5).

Grandeza	Valor
I_t (GERADOR)	128,6 A
I_1 (GERADOR)	127,5 A
THD_i	12,59%
THD_v	13,65%

4.2.3 Distorção em função da potência do conversor de 6 pulsos

Na Tabela 4.7 é apresentado um resumo com a distorção harmônica total em função da potência do conversor para os pontos apresentados nos Casos 4 e 5 além de outros valores intermediários. O carregamento do gerador foi completado até 80 % de sua capacidade com uma carga resistiva trifásica equilibrada.

TABELA 4.7 – Distorção harmônica total em função da potência do conversor.

Capacidade do conversor	THD_i	THD_v
20 % do nominal (12 kVA) - Caso 4	4,29 %	5,15 %
30 % do nominal (18 kVA) - Caso 6	6,42 %	7,36 %
40 % do nominal (24 kVA) - Caso 7	8,50 %	9,56 %
50 % do nominal (30 kVA) - Caso 8	10,57 %	11,42 %
60 % do nominal (36 kVA) - Caso 5	12,59 %	13,65 %

4.2.4 Análise dos resultados

Assim como as análises do primeiro item deste capítulo apresentaram as maiores fontes de distorção harmônica do sistema, o presente teste visa identificar a influência deste equipamento em função da sua capacidade proporcionalmente a todo sistema elétrico.

Iniciando com a análise do espectro, verifica-se a distribuição dos harmônicos permanece proporcionalmente inalterada independente de qual a contribuição da carga não linear sobre o sistema.

Quando analisados os valores da distorção, verifica-se o crescimento da contribuição individual de cada harmônica com o crescimento da capacidade do conversor dados que são resumidos na Tabela 4.7. A partir dessa é possível verificar que a partir de determinado nível de potência, no caso 40 % da nominal, a distorção harmônica total da tensão no ponto de regulação já se apresenta acima das recomendações da DO-160G.

Por esta análise temos que, mesmo que proporcionalmente a carga possua um conteúdo harmônico grande, a potência nominal da mesma tem vital influência no impacto da mesma sobre o sistema. Esta questão justifica também o critério da DO-160G para definir as cargas a serem submetidas aos testes.

4.3 Efeito de cargas desbalanceadas no conteúdo harmônico

Nos testes anteriores foram considerados sistemas compostos por fontes e cargas equilibradas e assim este item tem por objetivo mapear a possível influência de desequilíbrios entre as fases no comportamento do sistema frente aos harmônicos.

As Figuras 4.14 a 4.16 e a Tabela 4.8 apresenta os resultados das simulações considerando carga monofásica igual a 10 % da capacidade do gerador instalada na fase A.

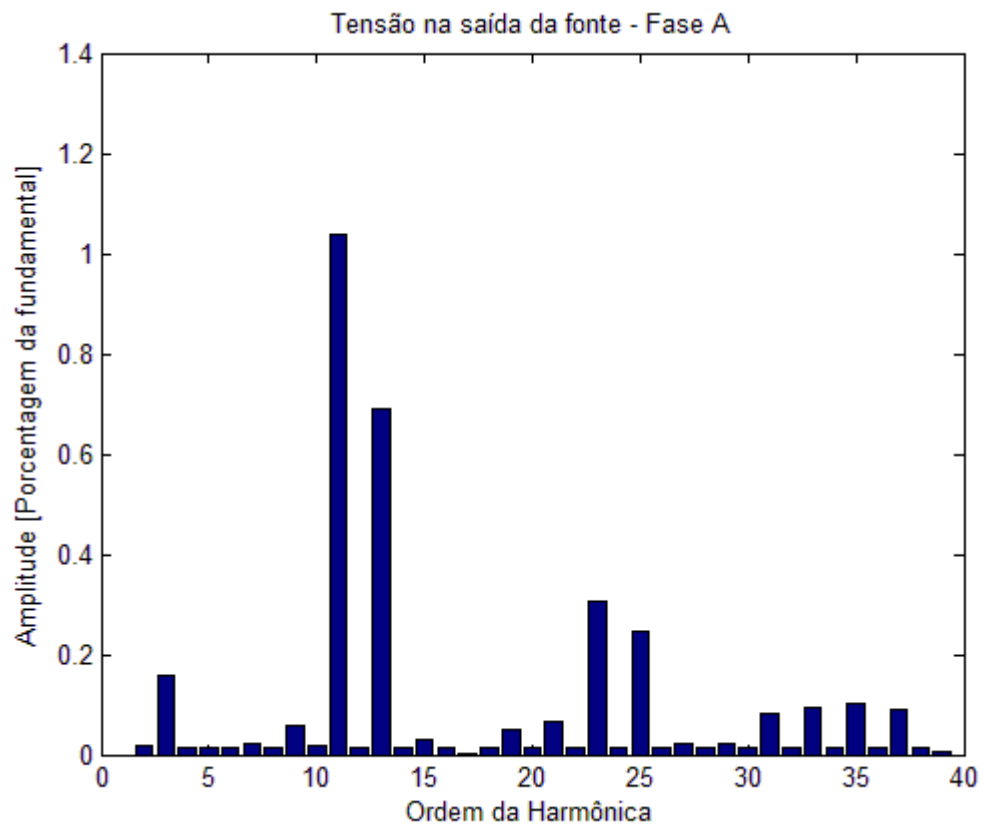


FIGURA 4.14 – Espectro de tensão na saída da fonte (Fase A) com sistema desbalanceado.

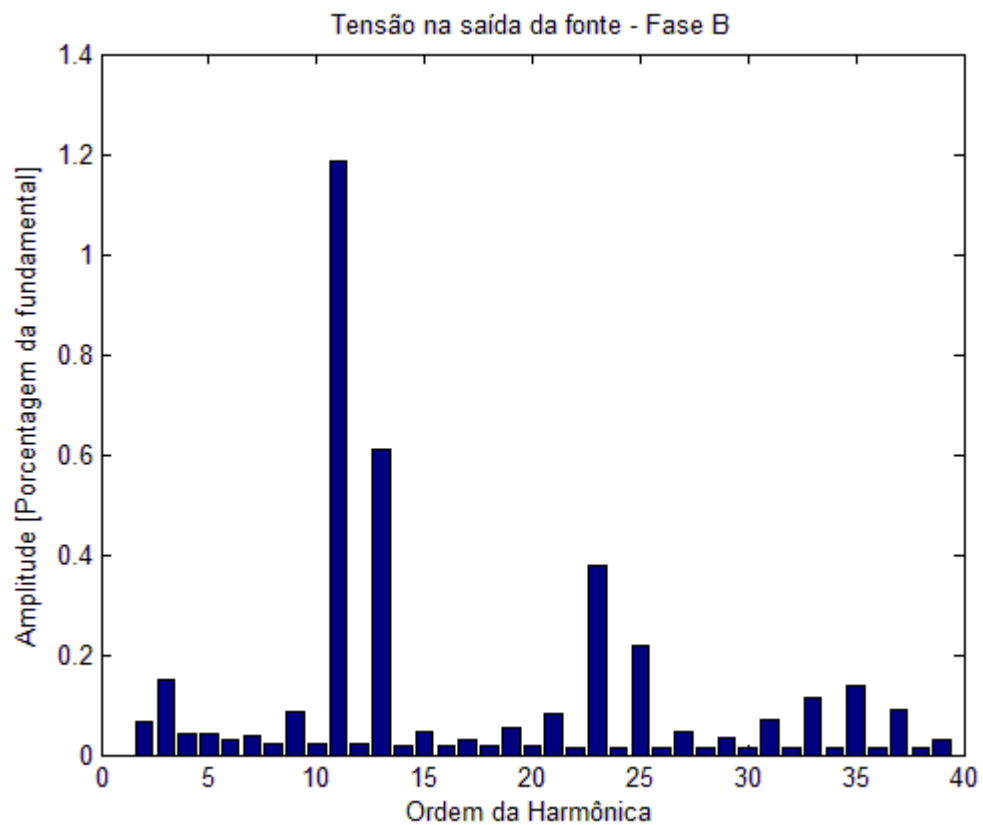


FIGURA 4.15 – Espectro de tensão na saída da fonte (Fase B) com sistema desbalanceado.

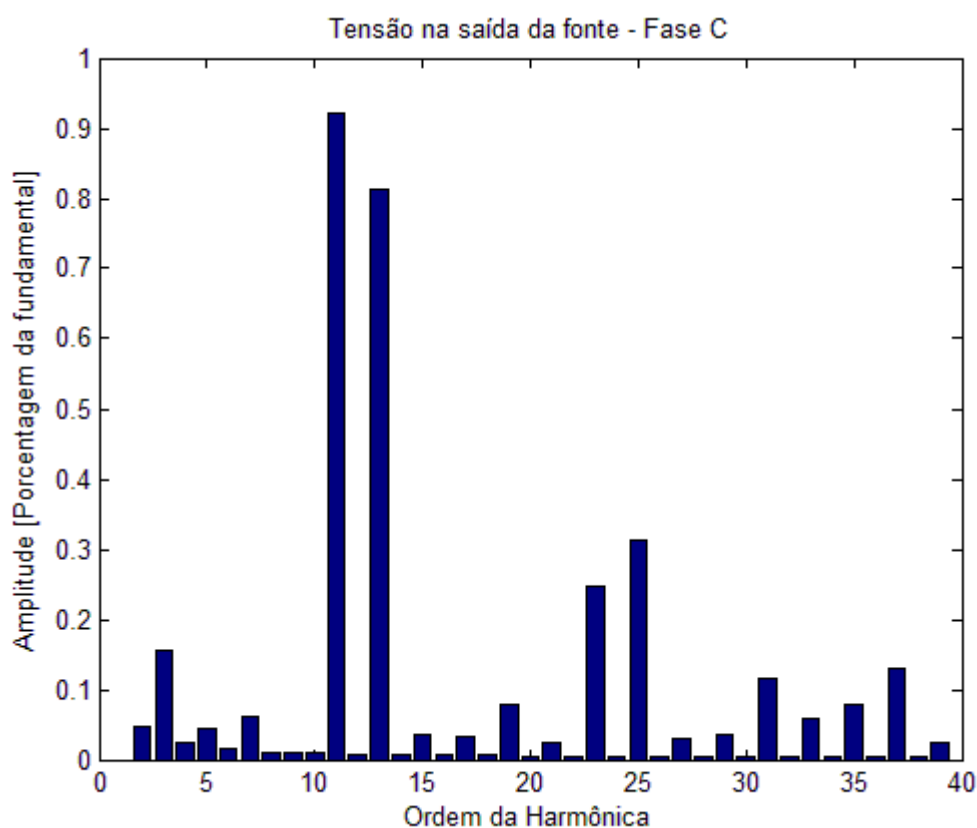


FIGURA 4.16 – Espectro de tensão na saída da fonte (Fase C) com sistema desbalanceado.

TABELA 4.8 – Distorção harmônica total nas fases com carga desbalanceada.

Ponto de medição	THD _i	THD _v
Fase A	0,71 %	1,33 %
Fase B	0,82 %	1,44 %
Fase C	0,74 %	1,32 %

4.3.1 Análise dos resultados

O último teste realizado consistiu na avaliação do efeito do desbalanceamento no sistema sobre o comportamento do mesmo. Pela análise dos gráficos apresentando o espectro de distorção das ondas e comparando com os ensaios realizados anteriormente, é possível notar que a principal diferença consiste no destaque um pouco maior do componente de terceira ordem no espectro de tensão de todas as fases.

Apesar de a carga monofásica resistiva se encontrar ligada à fase A, como pode ser observado na Tabela 4.8, a fase B do sistema é a que apresenta maior distorção tanto na forma

de onda de tensão como na corrente, porém os valores permanecem ainda próximos das demais fases.

5 Conclusão

Este trabalho teve por objetivo o estudo dos efeitos dos componentes harmônicos nos sistemas de geração e distribuição de energia elétrica com o objetivo de melhorar o entendimento de tais fenômenos assim como de seus efeitos.

A motivação deste tipo de estudo deve-se ao aumento nos últimos tempos da preocupação com a qualidade da alimentação que chega aos equipamentos de forma a se evitar comportamentos inesperados assim como poder aplicar tecnologias vantajosas porém mais sensíveis ou mesmo a otimização de performance do sistema.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, tanto na revisão bibliográfica como no desenvolvimento e exercício do modelo construído para o sistema elétrico, puderam ser observados as causas e efeitos da presença de harmônicos no sistema.

Em um sistema elétrico aeronáutico, cuja descrição dos tipos mais comuns de cargas foi feita durante a especificação do modelo, os impactos da presença de harmônicos podem ser notados principalmente nos seus efeitos sobre equipamentos eletrônicos e nas perdas de eficiência do sistema devido à presença destas frequências indesejadas.

5.1 Considerações de projeto para mitigação de harmônicos

Como apresentado em CSANYI (2011), a presença de harmônicos em amplitudes elevadas em sistemas elétricos pode ser atribuída a efeitos como a influência do comprimento do caminho percorrido por este componente ou mesmo pela possibilidade de amplificação destas devido a efeitos de ressonância, no entanto, um dos principais motivos destes efeitos consiste na grande injeção destes componentes no sistema pela presença de cargas com alto nível de distorção. Analisando este cenário com vistas a sistemas elétricos de aeronaves, podemos afirmar que a última das razões aparece como principal candidata a ser tratada visto que, diferentemente de sistemas que alimentam indústrias e residências, o caminho elétrico dentro de um sistema embarcado é relativamente curto e as questões relacionadas à ressonância podem ser abordadas na qualificação de cada equipamento. O tratamento dos harmônicos emitidos pelas fontes presentes no sistema passa por duas abordagens mais comuns, sendo elas a aplicação de filtros ou a utilização de tecnologias ou topologias que mitiguem a geração de harmônicos pelos equipamentos

O projeto de filtros para tratamento de harmônicos consiste em tema de vários trabalhos no meio de qualidade de energia como em PESENTE (2009). A aplicação de filtros em sistemas elétricos pode ser feita por meio de filtros passivos em paralelo ou série com a entrada de alimentação da carga o qual irá se comportar como um curto-circuito para as correntes de alta frequência para as quais for sintonizado ou funcionar como uma alta impedância para estas, respectivamente, além da possibilidade de inserção de uma filtragem ativa no sistema de forma a controlar a circulação destas correntes. Por outro lado, na aplicação específica de aeronaves, a utilização de filtros para estes fins é evitada devido aos indesejáveis impactos em peso e complexidade do sistema visto, por exemplo, a dimensão dos componentes necessários para implementação de filtros para harmônicos de baixa ordem.

Com base na discussão anterior, a atuação sobre as tecnologias e topologias empregadas nos equipamentos ligados no sistema se apresenta como ponto principal de atuação no que diz respeito à gestão de harmônicos no sistema. Como observado nos resultados das simulações apresentadas no capítulo 4, os conversores estáticos devem ser o principal foco de atenção da engenharia no que diz respeito à qualidade de energia no sistema elétrico. Com base nos resultados e nas análises, cabe dizer que a presença de conversores baseados em uma retificação de 6 pulsos deverá ter sua aplicação evitada na aeronave visto os níveis de distorção na tensão do sistema que são capazes de gerar sendo que em alguns casos chega a ultrapassar o valor para o qual as cargas são usualmente qualificadas. Desta forma, a utilização de conversores de 12 pulsos ou mais deve ser observado nas principais aplicações como geração de energia para barramentos DC da aeronave, *motor controllers* para acionamento de superfícies ou alimentação de sistemas de entretenimento os quais consomem quantidade considerável de energia. Quanto à utilização de tecnologias capazes de mitigar estes harmônicos, recomenda-se a realização de estudo detalhado com vistas à análise da resposta do sistema, principalmente geração, ao conteúdo harmônico ao qual será submetido de forma a garantir qualidade de energia adequada para as cargas, sendo nestes casos importante se levar em conta a duração da exposição dos componentes do sistema a estas condições.

Além dos conversores citados acima, deve-se atentar para a presença de cargas monofásicas principalmente conversores de pequenos equipamentos que possam vir a introduzir componentes de menor ordem como o terceiro harmônico. Para tais casos é recomendada observação da distribuição destas cargas entre as fases de forma a minimizar seus efeitos no total.

5.2 Considerações de projeto para qualificação dos equipamentos

No que corresponde à qualificação dos consumidores da energia, esta deve ser feita baseada em níveis compatíveis com a qualidade da energia que se espera observar nos barramentos do sistema sempre considerando uma margem de segurança capaz de cobrir incerteza nas previsões assim como condições anormais de funcionamento e evolução do sistema no que diz respeito às cargas instaladas.

Neste quesito, no entanto, a referência comumente observada é a DO-160 como descrito no capítulo 2. Esta traz os níveis recomendados para qualificação de diferentes categorias de consumidores de forma que sejam estes testados para as condições mais severas previstas para operação do sistema, desde que se observe esta norma na concepção do sistema. A qualificação para funcionamento sob presença de distorção na tensão é recomendada a todos tipos de cargas, de forma a, além da garantia de funcionamento, identificar a presença de ressonâncias com as frequências harmônicas presentes no sistema.

5.3 Propostas para continuidade do trabalho

Pelo estudo da qualidade de energia se tratar de um tema bastante amplo, algumas sugestões podem ser dadas para trabalhos futuros como:

- Refinamento e inclusão de novos modelos de componentes na plataforma de análise apresentada neste trabalho.
- Análise de harmônicos em sistemas de corrente alternada baseada em outros tipos de geração como VF e VSCF.
- Proposta de arquitetura de sistema visando minimização de distúrbios na qualidade da energia.
- Efeitos de cargas chaveadas de alta potência na capacidade de regulação do sistema de geração.
- Impactos das correntes de partida dos equipamentos em sistemas AC e DC de aeronaves.

Referências

- ABDELHAFEZ, A.; FORSYTH, A. A review of more-electric aircraft. In: 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AEROSPACE SCIENCE & AVIATION TECHNOLOGY (ASAT-13), **Paper No. ASAT-13-EP-01**. 2009.
- ABDEL-HAFEZ, A. Power Generation and Distribution System for a More Electric Aircraft: A Review. **INTECH Open Access Publisher**, 2012.
- ABU-HASHIM, R. et al. Test systems for harmonics modeling and simulation. Power Delivery, **IEEE Transactions**, v. 14, n. 2, p. 579-587, 1999.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N R.; CHEN, S. **Power system quality assessment**. Wiley, 2000.
- BONNER, A. et al. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 1, p. 452-465, 1996.
- CARRAMASCHI, I. H. C. Análise de equivalência de transitórios eletromagnéticos obtidos no domínio do tempo e da frequência. 2011.
- CHANG, G. W.; CHIN, Y. C.; LEE, S. H. Analyzing input harmonic currents of a six-pulse AC/DC converter by an efficient time-domain approach. In: **INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS**, 2006 1ST IEEE Conference on. IEEE, 2006. p. 1-5.
- CHENG, K. W. E. Comparative study of AC/DC converters for more electric aircraft. In: **Power Electronics and Variable Speed Drives**, 1998. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 456). IET, 1998. p. 299-304.
- CONVERSION, POWER. MODEL 81-084-01 TRANSFORMER-RECTIFIER UNIT. **Signal**, v. 38999, p. 20WC35PN.
- ARAÚJO, T. C. **Análise de máquina síncrona de pólos salientes sólidos**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- DEHKORDI, A. B.; GOLE, A. M.; MAGUIRE, T. L. Permanent magnet synchronous machine model for real-time simulation. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS**. 2005.
- DU, X.; WANG, D.; ZHOU, Y. Transient simulation studies of squirrel-cage induction motor directly supplied with aircraft variable frequency power. In: **ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS)**, 2013 INTERNATIONAL CONFERENCE ON. IEEE, 2013. p. 2000-2005.
- EATON. **Air Cooled Motorpump - MPEV3-032-15**, Jackson, Mississippi, 2013.

CSANYI, E. **Principles for Controlling Harmonics**. 05 de agosto de 2011. Disponível em: <<http://electrical-engineering-portal.com/principles-for-controlling-harmonics>>. Acesso em: 01 de março de 2015.

EXNER, D. W.; SINGER, G. H. Impedance data for 400-cycle aircraft distribution systems. **American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry, Transactions of the**, v. 71, n. 6, p. 410-419, 1953.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 2003.

HASNI, M. et al. Synchronous machine parameter estimation by standstill frequency response tests. **Journal of Electrical Engineering-Bratislava-**, v. 59, n. 2, p. 75, 2008.

HOLLOWAY, V. C. Transient characteristics of aircraft AC generators. **American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry, Transactions of the**, v. 73, n. 4, p. 187-190, 1954.

WU, T. et al. Electromagnetic Design of Aircraft Synchronous Generator with High Power-Density. In: 50TH AIAA AEROSPACE SCIENCES MEETING INCLUDING THE NEW HORIZONS FORUM AND AEROSPACE EXPOSITION, 2012.

JORDAN, S.; APSLEY, J. Open-circuit fault analysis of diode rectified multiphase synchronous generators for DC aircraft power systems. In: **Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International**. IEEE, 2013. p. 926-932.

LEMOES, J. R. F. **Modelagem de linhas de transmissão para estudos de transientes eletromecânicos**. 2008. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

LIANG, T. J. et al. Analysis of 12 pulse phase control AC/DC converter. In: **Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS'99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on**. IEEE, 1999. p. 779-783.

MA, X. et al. Finite Element Method modeling and analysis for aeronautic synchronous generator with damper windings on unloading and short-circuit conditions. In: **Industrial Engineering and Engineering Management, 2007 IEEE International Conference on**. IEEE, 2007. p. 1848-1852.

MOIR, I.; SEABRIDGE, A. **Aircraft systems: mechanical, electrical and avionics subsystems integration**. John Wiley & Sons, 2011.

MONROY, A. O.; LE-HUY, H.; LAVOIE, C. Modeling and simulation of a 24-pulse Transformer Rectifier Unit for more electric aircraft power system. In: **Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2012**. IEEE, 2012. p. 1-5.

UNITED STATES. Department of Defense. **Aircraft Electric Power Characteristics**. MIL-STD-704F, 2004.

PESENTE, J. R. **Condicionamento dos Problemas de Qualidade de Energia de Aeronaves Mais Elétricos Através da Alocação de Filtros Passivos Baseados na Teoria de Estruturas**. 2009. 102f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

RANADE, S. J.; XU, W. An overview of harmonics modeling and simulation. **IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation**, p. 1, 2007.

ROBOAM, X. New trends and challenges of electrical networks embedded in “more electrical aircraft”. In: **Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on**. IEEE, 2011. p. 26-31.

RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS. **Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment**, RTCA/DO-160G, Washington, DC, 2010.

SANGLIKAR, A.; JOHN, V. Novel Approach to Develop Behavioral Model Of 12-Pulse Converter. In: **Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES'06. International Conference on**. IEEE, 2006. p. 1-5.

SCHROTER, T.; SCHULZ, D. The Electrical Aircraft Network—Benefits and Drawbacks of Modifications. **Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on**, v. 49, n. 1, p. 189-200, 2013.

SCHWANDT, G. O. A 400-cycle aircraft motor. **Electrical Engineering**, v. 64, n. 7, p. 508-512, 1945.

SMART COCKPIT, **737 Flight Crew Operations Manual**, www.smartcockpit.com.

SMART COCKPIT, **Airbus A319-320-321 - Electrical**, www.smartcockpit.com.

SOUSA, M. H. **Determinação de parâmetros de máquinas síncronas pelo ensaio de resposta em frequência: proposta de metodologia com inversor de frequência**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TANTAWY, A.; KOUTSOUKOS, X.; BISWAS, G. Aircraft AC generators: Hybrid system modeling and simulation. In: **Prognostics and Health Management, 2008. PHM 2008. International Conference on**. IEEE, 2008. p. 1-11.

XU, W.; RANADE, S. J. Analysis of Unbalanced Harmonic Propagation in Multiphase Power Systems. **Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation**, 2004.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DP	2. DATA 25 de março de 2015	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/DP-016/2015	4. N° DE PÁGINAS 73
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Avaliação dos impactos dos componentes harmônicos em sistemas elétricos de aeronaves.			
6. AUTOR(ES): Fabício Lima Migliorini			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Distorção Harmônica, Qualidade da Energia Elétrica, Modelagem de Sistemas.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Fontes de alimentação de energia elétrica; Aeronaves; Qualidade; Normalização; Equipamentos elétricos; Engenharia elétrica; Engenharia aeronáutica.			
10. APRESENTAÇÃO:		X Nacional	Internacional
ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Aeronáutica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Orientador: Luiz Carlos Sandoval Góes. Defesa em 12/03/2015. Publicada em 2015.			
11. RESUMO: Na concepção e operação de sistemas de geração e distribuição elétrica um ponto de grande importância consiste na qualidade da energia que é entregue aos consumidores, visto que desta depende o bom funcionamento dos mesmos. Entre os parâmetros analisados estão as formas de onda da tensão e da corrente as quais podem sofrer distorções devido à presença de componentes harmônicas no sistema. O trabalho proposto tem como objetivo estudar a relação entre as cargas e a presença de harmônicos no sistema elétrico assim como os efeitos da distorção no restante do sistema. Para tal serão utilizadas normas e bibliografia técnica sobre o tema assim como a modelagem e simulação de diferentes tipos de carga de forma a buscar reproduzir os efeitos das mesmas sobre o sistema. Por fim busca-se comparar os resultados com os requisitos comumente utilizados de forma a possibilitar uma orientação para suporte a decisões no projeto do sistema de geração e distribuição assim como dos equipamentos dos demais sistemas.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			