



Micael Filipe de Oliveira Simões

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Estudo do Gerador Síncrono com Excitação em Enrolamentos Supercondutores

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador : João Miguel Murta Pina, Prof. Doutor, FCT/UNL
Co-orientador : David Duarte Pereira Inácio, Mestre, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Doutor Tiago Oliveira Machado de Figueiredo Cardoso

Arguente: Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto

Vogais: Doutor João Miguel Murta Pina
Mestre David Duarte Pereira Inácio



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho, 2013

Estudo do Gerador Síncrono com Excitação em Enrolamentos Supercondutores

Copyright © 2013 Micael Filipe de Oliveira Simões, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de começar esta parte da minha tese pelos agradecimentos ao meu orientador, Prof. João Murta Pina, e ao meu co-orientador, Eng. David Inácio. Ao Prof. Murta Pina tenho a agradecer o facto especial de ter aceitado orientar a minha tese e de ter suscitado em mim o interesse não só para a área das energias renováveis e da sustentabilidade energética, como também para a supercondutividade, área que descobri ao longo destes últimos anos ser de grande interesse. Ao Eng. David Inácio, muito em breve Doutor David Inácio, tenho a agradecer também o facto de ter aceitado orientar-me, especialmente numa altura tão complicada e trabalhosa do seu percurso académico e profissional. Muito boa sorte para o futuro.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia e à Universidade Nova de Lisboa pelas condições prestadas para que conseguisse concluir o meu curso. Também da faculdade, gostaria de agradecer a algumas pessoas que, mesmo sem saberem, me marcaram bastante: ao Prof. Steiger pelos discursos inspiradores no momento certo, em que me sentia mais desmotivado e incerto quanto ao curso pelo qual tinha optado; ao Prof. Leão Rodrigues pelo seu carisma bem vincado e inspirador; e ao Prof. Ventim Neves por ter suscitado em mim o interesse pela área da energia e das máquinas eléctricas.

Aos colegas que me acompanharam ao longo do meu percurso universitário. Não vou referir nomes, com medo de me esquecer de alguém. Peço desde já o meu perdão, se porventura algum de vocês ficar sentido comigo. Sem dúvida que ficarão companheiros para a vida.

Aos meus amigos de sempre - ou quase sempre - por estarem sempre presentes. Vocês sabem quem são. Obrigado por terem paciência para as minhas birras e manias, e por não se terem chateado - pelo menos muito - sempre que precisei de cancelar concertos e outros compromissos à última da hora por causa de trabalhos de universidade e assuntos afins. Agradecimento especial para o Patrick, que neste momento já está longe, no Brasil. Nunca me esquecerei de ti. Os outros sabem quem são e estão sempre perto, pelo que prefiro agradecer-lhes pessoalmente, todos os dias.

Last but not least, gostava de agradecer especialmente à minha família por terem a paciência também eles de me aturar e por me terem apoiado sempre, mesmo quando estava incerto quanto ao meu futuro.

Um obrigado sincero a vocês todos.

Resumo

A redução da dependência das civilizações modernas das energias fósseis é cada vez mais urgente, uma vez que os recursos fósseis são cada vez mais escassos e a sua utilização tem um impacto negativo no ambiente. Neste âmbito, uma das fontes energéticas em que são depositadas maiores esperanças para solucionar este problema é a energia eólica, e em especial a energia eólica *offshore*.

Nos últimos anos, a indústria da geração eólica *offshore* tem optado pela adopção de geradores síncronos, de velocidade variável, uma vez que a operação a velocidade variável permite a simplificação dos componentes mecânicos das turbinas, aumentando a sua fiabilidade e reduzindo os tempos de paragem. Contudo, estes geradores na sua forma convencional são de grande volume e massa, tornando-os inadequados à aplicação nas turbinas eólicas de amanhã, cujas gamas de potência se prevê que rondem os 8 a 10 MW. É neste contexto que a tecnologia supercondutora surge como candidato com potencial suficiente ao aumento da densidade de potência dos geradores síncronos, tornando viável a sua aplicação nas turbinas eólicas *offshore* do futuro.

Neste trabalho é feito um estudo do gerador síncrono com excitação em enrolamentos de materiais supercondutores de alta temperatura, sendo feita uma proposta para um gerador de pequena escala, para efeitos de estudo em ambiente laboratorial das vantagens obtidas por este tipo de máquinas.

Palavras Chave

Supercondutividade, Máquinas Eléctricas, Gerador Síncrono Supercondutor, Energia Eólica, Energias Renováveis, Sustentabilidade Energética.

Abstract

Reduction of modern civilization's dependence on fossil fuels is urgent, given that fossil resources are increasingly scarce and its use has a negative impact on the environment. In this context, one of the energy sources in which are deposited best hopes for solving this problem is wind energy, and particularly the offshore wind energy.

In the recent years, offshore wind power industry has opted for the adoption of variable speed synchronous generators, given that the operation at variable speed allows the simplification of the mechanical components of the turbine, which increases its reliability and thereof reduces its downtime. However, these generators in their conventional form are of large volume and mass, making them unsuitable for application in the wind turbines of tomorrow, whose power ranges are expected to stand at around 8 to 10 MW. It's in this context that the superconducting technology emerges as a candidate with enough potential to increase the power density of synchronous generators, making their application in the offshore wind turbines of the future feasible.

In this work it is done a study of the synchronous generator with high temperature superconducting field windings, and made a proposal for a small scale generator for the purpose of study in a laboratorial environment of the advantages obtained by such electrical machines.

Keywords

Superconductivity, Electrical Machinery, Superconducting Synchronous Generator, Wind Energy, Renewable Energy, Sustainable Energy.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objectivos	5
1.3	Principais Contribuições	5
1.4	Organização da Dissertação	5
2	Estado da Arte	7
2.1	Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela Siemens	10
2.1.1	Máquina Modelo de 380 kW (1999-2002)	10
2.1.1.1	Enrolamentos de Excitação (ou de Campo)	11
2.1.1.2	Tubo de Transmissão de Binário (<i>Torque Tube</i>)	12
2.1.1.3	Sistema de Refrigeração	13
2.1.1.4	Estator	14
2.1.1.5	Testes, Resultados e Conclusões	15
2.1.2	Gerador de Demonstração de 4 MVA (2002-2005)	16
2.1.2.1	Construção do Gerador SAT de 4 MVA	16
2.1.2.2	Testes e Determinação dos Parâmetros da Máquina	17
2.1.3	Motor de Propulsão de 4 MW (2005-2012)	18
2.1.3.1	Construção do Motor de Propulsão de 4 MW SAT de 4 MW	19
2.1.3.2	Testes, Resultados e Conclusões	20
2.2	Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela AmSC	21
2.2.1	Protótipo de um Motor de Propulsão Naval de 5 MW da AmSC	22
2.2.1.1	Construção do Protótipo do Motor de Propulsão SAT com 5 MW	22
2.2.1.2	Testes, Resultados e Conclusões	23
2.2.2	Motor de Propulsão Naval de 36,5 MW da AmSC	25
2.2.3	Condensador Síncrono SAT (SuperVAR™)	26
2.2.3.1	Características dos Condensadores Síncronos SAT desenvolvidos pela AmSC	27
2.2.3.2	Aplicação do SuperVAR™ a Parques Eólicos	28
2.3	Desenvolvimentos de Máquinas Eléctricas SAT no Japão	28

2.3.1	Motor Síncrono SAT de Fluxo Axial com 12,5 kW	29
2.3.2	Motores Síncronos SAT 2G desenvolvidos pelo grupo NEDO.	31
2.3.2.1	Motor Síncrono de 15 kW	31
2.3.2.2	Motor Síncrono de 7,5 kW (REBCO)	33
2.3.3	Motor de indução SAT desenvolvido na KU	33
2.4	Conclusões	36
3	Gerador Síncrono SAT	37
3.1	Princípios Electromagnéticos	38
3.1.1	Leis de Maxwell	39
3.1.2	Lei de Faraday e Lei de Ampère	39
3.1.3	Relação entre \vec{E} , \vec{B} , \vec{H} e \vec{J}	40
3.2	Supercondutividade de Alta Temperatura	41
3.2.1	Enquadramento Histórico	42
3.2.2	Propriedades Macroscópicas da Supercondutividade	43
3.2.2.1	Resistividade Perfeita	43
3.2.2.2	Efeito Meissner e Comparação com o Condutor Perfeito	44
3.2.2.3	Supercondutores tipo I e II	46
3.2.3	Aplicação de Materiais SAT a Accionamentos de Potência	46
3.3	Máquina Síncrona Supercondutora Clássica	47
3.3.1	Constituição da Máquina Síncrona Supercondutora Clássica	48
3.3.2	Estator da Máquina Supercondutora Clássica	48
3.3.3	Rotor da Máquina Supercondutora Clássica	49
3.3.3.1	Bobinas Supercondutoras de Excitação de Campo	50
3.3.3.2	Escudo Electromagnético	51
3.3.3.3	Crióstato	52
3.3.3.4	Tubo de Transmissão de Binário ou <i>Torque tube</i>	53
3.3.4	Sistema de Refrigeração	53
3.3.5	Sistema de Excitação de Campo ou Excitatriz	55
3.3.6	Conclusões	56
4	Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos	57
4.1	Máquina Síncrona Convencional	58
4.2	Máquina Síncrona SAT Proposta	59
4.2.1	Configuração do Modelo Flux2D	59
4.2.1.1	Geometria dos Pólos	59
4.2.1.2	Enrolamentos SAT de Excitação de Campo	60
4.2.1.3	Escudo EM e Crióstato	61

4.2.1.4	Enrolamentos Estatóricos	61
4.2.2	Malha de Elementos Finitos	63
4.2.3	Definição das Propriedades Físicas dos Materiais Utilizados	63
4.2.3.1	Material Ferromagnético	63
4.2.3.2	Cobre	66
4.2.3.3	Material SAT	66
4.2.4	Circuitos Utilizados na Simulação da Máquina	67
4.2.4.1	Ensaio em Vazio e em Carga	67
4.2.4.2	Ensaio em Curto-Circuito	68
4.2.4.3	Curto-Circuitos Repentinos	68
4.2.4.4	Ensaio da Máquina com Carga de Carácter Indutivo	70
4.3	Conclusões	71
5	Resultados e Discussão	73
5.1	Verificações Iniciais	74
5.1.1	Fluxo Magnético no Interior da Máquina - Densidade e Distribuição das Linhas Fluxo Magnético	75
5.1.2	Verificação do Equilíbrio das Fases	75
5.1.3	Comparação entre as Densidades de Fluxo Magnético no Entreferro da Máquina SAT e da Máquina Convencional	77
5.2	Característica em Vazio	78
5.2.1	Característica em Vazio da Máquina SAT Clássica	78
5.2.2	Característica em Vazio da Máquina com Rotor Ferromagnético	80
5.3	Característica de Curto-Circuito	82
5.4	Reactância Síncrona	83
5.5	Ensaio de Curto-Circuito Repentino	85
5.5.1	Curto-circuito de uma Fase	85
5.5.2	Curto-circuito das Três Fases	87
5.6	Influência do Escudo EM no Desempenho da Máquina	88
5.7	Ensaio da Máquina com Cargas de Diferentes Carácteres	90
5.7.1	Ensaio da Máquina com Carga Resistiva	90
5.7.2	Ensaio da Máquina com Carga de Carácter Indutivo	91
5.8	Análise Espectral da Energia Produzida	94
5.9	Conclusões	97
6	Conclusões	99
6.1	Conclusões	100
6.2	Trabalho Futuro	101

Conteúdo

A	Brochura da fita AmSC SAT 2G com Estabilizador de Cobre	107
B	Escalas da Densidade de Fluxo Magnético e das Linhas de Fluxo Magnético da Máquina <i>Air-core</i>	111
C	Escalas da Densidade de Fluxo Magnético e das Linhas de Fluxo Magnético da Máquina SAT com Rotor Ferromagnético	113

Lista de Figuras

2.1	Máquina modelo de 380 kW desenvolvida pela Siemens. Retirado de (Nick et al., 2002).	10
2.2	Enrolamentos de excitação da máquina modelo Siemens de 380 kW. Retirado de (Nick et al., 2002).	11
2.3	Rotor da máquina modelo Siemens de 380 kW. Retirado de (Nick et al., 2002). . .	12
2.4	<i>Torque tubes</i> testados na Siemens. Retirado de (Kummeth et al., 2005).	13
2.5	Sistema de refrigeração da máquina modelo Siemens de 380 kW.	14
2.6	Construção do estator da máquina modelo SAT Siemens de 380 kW	14
2.7	Gerador SAT Siemens de 4 MVA no banco de ensaios. Retirado de www.siemens.com	16
2.8	Construção e ensaio do gerador Siemens de 4 MVA. Retirado de (Nick et al., 2007).	18
2.9	Motor de propulsão de 4 MW no banco de ensaio, acoplado a máquina de carga. Retirado de (Nick et al., 2012).	19
2.10	Rotor do motor de propulsão SAT Siemens de 4MW. Retirado de (Nick et al., 2010).	20
2.11	Características em vazio (a rosa) e de curto-circuito (a verde) do motor de propulsão SAT de baixa velocidade Siemens.	20
2.12	Máquina protótipo de 5 MW desenvolvida pela AmSC (fonte: www.amsc.com).	23
2.13	Resultados dos testes efectuados ao motor de propulsão SAT de 5 MW desenvolvido pela AmSC. Adaptado de (Eckels and Snitchler, 2004)	24
2.14	Construção do motor de propulsão de 36,5 MW para aplicações navais desenvolvido pela AmSC. Retirado de (Gieras, 2008).	25
2.15	Protótipo do SuperVAR™, um DSC SAT desenvolvido pela AmSC. Retirado de (Kalsi et al., 2007)	27
2.16	Comparação entre o desempenho de um DSC SAT e um DSC convencional, aplicados ao barramento de um parque eólico de 80 MW (resultados obtidos por simulação). Adaptado de (Kalsi et al., 2007).	29
2.17	Motor síncrono japonês em forma de disco com enrolamentos de excitação SAT 1G.	31
2.18	Motor síncrono japonês de 15 kW com enrolamentos de excitação SAT 2G desenvolvido por Iwakuma et al.. Retirado de (Iwakuma et al., 2007).	32

Lista de Figuras

2.19	Motor síncrono japonês de 15 kW com excitação SAT 2G, desenvolvido por Iwakuma et al., sob teste nos estaleiros de Nagasaki, da Mitsubishi Heavy Industry Ltd. Retirado de (Iwakuma et al., 2007).	32
2.20	Construção do rotor do motor síncrono japonês de 7,5 kW com excitação SAT 2G desenvolvido pelo grupo NEDO. Retirado de (Iwakuma et al., 2009).	34
2.21	Construção e ensaio do motor síncrono japonês de 7,5 kW com excitação SAT 2G desenvolvido pelo grupo NEDO. Retirado de (Iwakuma et al., 2009).	34
2.22	Motor de indução SAT desenvolvido por Nakamura et al. na Universidade de Quioto.	35
2.23	Comparação entre as curvas de binário-velocidade da MI SAT e da MI convencional.	35
3.1	Força de Lorentz $d\vec{F}$ que actua num fio condutor de comprimento $d\vec{l}$, a transportar uma corrente eléctrica i inserido campo de indução magnética \vec{B} . Adaptado de (Pyrhönen et al., 2008).	38
3.2	Ilustração da lei da indução de Faraday. A linha l delimita a superfície S de uma das N espiras atravessadas pelo fluxo magnético Φ , sendo $d\vec{S}$ o vector normal a esta. Adaptado de (Pyrhönen et al., 2008).	40
3.3	Ilustração da lei de Ampère aplicada a um condutor que transporta a corrente i . A linha l delimita a superfície S , sendo o vector $d\vec{S}$ normal a esta. Adaptado de (Pyrhönen et al., 2008).	41
3.4	Heike Kamerlingh Onnes (21 de Setembro de 1853 - 21 de Fevereiro de 1926). Físico Holandês e prémio Nobel, que descobriu o estado de supercondutividade em 1911.	42
3.5	Evolução cronológica da temperatura crítica máxima dos materiais supercondutores. Adaptado de (Gieras, 2009)	43
3.6	Diagrama $T_c - H_c - J_c$. Adaptado de (Kalsi, 2011).	44
3.7	Comparação entre o comportamento de um supercondutor e de um condutor perfeito quando arrefecidos na presença de campo (APC) e arrefecidos na presença de campo nulo (ACN). Retirado de (Pina, 2010).	45
3.8	Curvas de magnetização típicas dos supercondutores tipo I e tipo II. Adaptado de (Pina, 2010).	46
3.9	Esquemáticos da <i>máquina síncrona com enrolamentos de campo supercondutores clássica</i>	49
3.10	Pormenores do estator de uma máquina síncrona supercondutora clássica.	49
3.11	Esquemáticos da máquina síncrona supercondutora com núcleo ferromagnético. Adaptado de (Klaus et al., 2007).	50
3.12	Esquemáticos da máquina síncrona com enrolamentos de campo supercondutores clássica. Adaptado de (Luiz, 2011).	52

3.13 Arrefecimento por condução de uma bobina supercondutora. (1) Fluido refrigerante em tubos. (2) Bobina em contacto com o crio-refrigerador. Adaptado de (Kalsi, 2011).	54
3.14 Curva de capacidade do refrigerador Cryomech AL600. Adaptado de (Kalsi, 2011).	55
3.15 Sistemas de excitação da máquina síncrona. Adaptado de (Boldea, 2005).	56
4.1 Máquina convencional que serviu de base ao projecto da máquina SAT proposta.	58
4.2 Vista geral da geometria do modelo EF da máquina SAT desenvolvida.	59
4.3 Estrutura de suporte dos enrolamentos SAT (núcleo do rotor), a verde.	60
4.4 Geometria de modelos alternativos para a máquina síncrona SAT que foram desenvolvidos.	61
4.5 Configuração dos enrolamentos SAT de excitação de campo (a verde na figura). .	62
4.6 Crióstato e escudo EM da máquina SAT em pormenor (a verde).	63
4.7 Configuração das três fases do estator.	64
4.8 Malha de elementos finitos (EF) definida para a simulação da máquina SAT.	65
4.9 Curva B-H do material ferromagnético utilizado na simulação da máquina SAT. . .	65
4.10 Circuito utilizado para realizar os ensaios da máquina em vazio e com carga resistiva.	67
4.11 Circuito utilizado para realizar o ensaio da máquina em curto-circuito.	68
4.12 Circuitos utilizados para realizar os curto-circuitos repentinos.	69
4.13 Circuito utilizado para realizar o ensaio da máquina sob carga indutiva.	70
5.1 Esquema equivalente do gerador síncrono. e_0 é a força electromotriz induzida nos enrolamentos estatóricos, r_1 a resistência dos enrolamentos, L_Δ a indutância síncrona e u_1 é a tensão disponibilizada à carga Z_u . Retirado de (Rodrigues, 2008).	74
5.2 Fluxo magnético no interior da máquina. Escalas do modelo EF da máquina de rotor <i>air-core</i> no anexo B.	75
5.3 Tensões nas três fases da máquina disponibilizadas à carga, obtidas com uma corrente de excitação $I_f = 80$ A.	76
5.4 Comparação entre as densidades de fluxo magnético B_m no entreferro da máquina convencional e da máquina SAT.	77
5.5 Característica em vazio da máquina síncrona SAT.	78
5.6 Densidade de fluxo magnético no entreferro, B_m , e tensões induzidas aos terminais do estator, e_0 , para vários valores de corrente de excitação.	79
5.7 Fluxo magnético no interior da máquina SAT com rotor ferromagnético. Escalas do modelo EF da máquina com rotor ferromagnético no anexo C.	80
5.8 Característica em vazio da máquina síncrona SAT com rotor ferromagnético. . . .	80

Lista de Figuras

5.9	Força electromotriz e_0 induzida aos terminais do estator da máquina SAT com rotor ferromagnético obtida para vários valores de corrente de excitação I_f (ensaio realizado em vazio).	81
5.10	Característica de curto-circuito da máquina síncrona SAT.	82
5.11	Densidade de fluxo magnético no entreferro B_m em curto-circuito.	84
5.12	Reactância síncrona da máquina SAT.	85
5.13	Curto-circuito na fase 1 entre os 200 e os 400 ms. Correntes nas três fases. . . .	86
5.14	Curto-circuito da fase 1 aos 20,4 s. Corrente na fase da máquina convencional em que ocorre o curto-circuito. Retirado de (Cedrat, 2006).	86
5.15	Curto-circuito da fase 1 entre os 200 e os 400 ms. Tensões nas três fases.	87
5.16	Curto-circuito da fase 1 entre os 200 e os 400 ms. Tensão da fase 1 em pormenor. . . .	88
5.17	Curto-circuito das três fases entre os 200 e os 400 ms. Corrente nas três fases. . . .	89
5.18	Curto-circuito das três fases entre os 200 e os 400 ms. Tensão nas três fases. . . .	89
5.19	Influência do escudo na densidade de fluxo magnético no entreferro.	90
5.20	Influência do escudo no fluxo magnético na fita SAT.	91
5.21	Tensões e correntes registadas na carga resistiva.	92
5.22	Binário registado no ensaio com carga resistiva.	93
5.23	Diagrama de Behn-Eschenburg para cargas de carácter indutivo. Retirado de (Rodrigues, 2008).	93
5.24	Fem 's, tensões e correntes registadas no ensaio com carga RL.	95
5.25	Desfasamento entre a tensão U e corrente I na carga RL.	96
5.26	Comparação entre os espectros das ondas produzidas pela máquina síncrona convencional e pela máquina síncrona SAT	96

Lista de Tabelas

2.1	Projecção temporal para o início da comercialização de produtos com aplicação de materiais SAT, segundo a Navigant.	9
2.2	Parâmetros da máquina modelo Siemens de 380 kW.	11
2.3	Comparação entre as especificações do gerador síncrono supercondutor de demonstração de 4 MVA desenvolvido pela Siemens e um gerador convencional. Retirado de (Gieras, 2009).	17
2.4	Especificações do motor de propulsão Siemens de 4 MW. Adaptado de (Nick et al., 2010).	19
2.5	Perdas do rotor da máquina Siemens de 4 MW, medidas segundo o método calorimétrico. Retirado de (Nick et al., 2012).	21
2.6	Motores síncronos de alta velocidade desenvolvidos pela AmSC. Retirado de (Pina, 2010)	22
2.7	Especificações do motor de propulsão protótipo de 5 MW desenvolvido pela AmSC. Retirado de (Eckels and Snitchler, 2004)	23
2.8	Comparação entre as especificações dos motor protótipo de 5 MW e do motor de propulsão de 36,5 MW. Retirado de (Gieras, 2008)	26
2.9	Especificações do motor em disco japonês de 12,5 kW. Retirado de (Gieras, 2009).	30
2.10	Parâmetros de projecto do motor japonês de 7,5 kW desenvolvido pelo NEDO. Retirado de (Iwakuma et al., 2008).	33
3.1	Propriedades dos fluidos considerados mais interessantes ao arrefecimento de materiais supercondutores. Valores obtidos à pressão de 1 atm. Retirado de (Iwasa, 2009).	53
4.1	Dimensões da máquina síncrona convencional. Retirado de (Cedrat, 2006)	58
4.2	Especificações dos enrolamentos da máquina síncrona convencional e da máquina SAT desenvolvida. Dados da máquina convencional retirados de (Cedrat, 2006)	62
4.3	Propriedades eléctricas da fita SAT 2G da AmSC com estabilizador de cobre. Dados retirados de (AmSC, 2012)	66
4.4	Características geométricas da fita SAT 2G da AmSC com laminação de cobre. Dados retirados de (AmSC, 2012)	67

Lista de Tabelas

4.5	Valores padrão dos vários componentes do circuito de ensaio em vazio.	68
4.6	Valores padrão dos vários componentes do circuito de ensaio em curto-circuito. .	69
4.7	Valores padrão dos vários componentes do circuito de ensaio de curto-circuito repentino.	69
4.8	Valores padrão dos vários componentes do circuito de ensaio sob carga de carác- ter de indutivo.	70

Notações

AC	<i>alternating current</i>	48
AmSC	American Superconductor Corporation	9
BMBF	<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung</i>	10
BMWi	<i>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie</i>	16
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>	23
CAPS	<i>Center for Advanced Power Systems</i>	23
CEE	Conversores de Energia Eólica	2
DC	<i>direct current</i>	8
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>	8
DD	<i>direct-drive</i>	3
DEE	Departamento de Engenharia Electrotécnica	101
DoE	<i>Department of Energy</i>	8
DSC	<i>Dynamic Synchronous Condenser</i>	26
EM	electromagnético	22
EF	elementos finitos	58
EWEA	<i>European Wind Energy Agency</i>	2
EUA	Estados Unidos da América	9
FSU	<i>Florida State University</i>	23
FCL	<i>Fault Current Limiter</i>	47
GI	Gerador de Indução	3
GIDA	Gerador de Indução Duplamente Alimentado	3
G-FRP	<i>Glass-Fiber Reinforced Plastic</i> - Plástico Reforçado com Fibra de Vidro	12
GS	Gerador Síncrono	3
GSMP	Gerador Síncrono de Magnetos Permanentes	4
GSSC	Gerador Síncrono Supercondutor	4

Notações

GSMP	Gerador Síncrono de Magnetos Permanentes.....	4
I&D	investigação e desenvolvimento	8
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	2
MI	máquina de indução.....	33
KU	Kyoto University	8
LHI	lineares, homogéneos e isotrópicos	41
MMM	material magnético macio	30
MRI	<i>Magnetic Resonance Imaging</i>	43
MS	máquina síncrona.....	47
NEDO	<i>New Energy and Industrial Technology Development Organization</i>	8
NST	Nordic Superconductor Technologies.....	11
ONR	<i>Office of Naval Research</i>	21
SAT	supercondutores de alta temperatura	4
SBT	supercondutores de baixa temperatura	43
SEI	Sumitomo <i>Electric Industries</i>	29
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>	47
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>	15
TVA	<i>Tennessee Valley Authority</i>	27
UE	União Europeia.....	2
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>	2
USA	<i>United States of America</i>	8
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>	2
1G	fita supercondutora de primeira geração.....	11
2G	fita supercondutora de segunda geração.....	4
2D	bidimensional	58

1

Introdução

Conteúdo

1.1	Motivação	2
1.2	Objectivos	5
1.3	Principais Contribuições	5
1.4	Organização da Dissertação	5

1.1 Motivação

Muitos indicadores sugerem que a nossa dependência das energias fósseis deverá ser solucionada nas próximas décadas, sendo fundamental a obtenção de soluções para diversos problemas emergentes, como a escassez de recursos e o impacto negativo que estas têm sobre o clima (Abrahamsen et al., 2010). Neste contexto, têm surgido diversas discussões de ordem política acerca da regulação da libertação de CO₂, resultando em acordos como o protocolo de Quioto e os objectivos 20-20-20.

O protocolo de Quioto é um acordo internacional, ligado à Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas - *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) -, onde ficaram estabelecidas uma série de medidas que os governos dos países participantes na convenção deveriam cumprir, com o objectivo de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera (UN, 1998). Numa perspectiva europeia, foram estabelecidos os chamados objectivos 20/20/20, no qual os países pertencentes à União Europeia (UE) se comprometeram a atingir os seguintes objectivos até ao ano de 2020 (EU, 2012):

- Reduzir a emissão de gases de efeito de estufa em 20%;
- Aumentar a quota de energia proveniente de fontes renováveis para 20%;
- Aumentar a eficiência energética em 20%.

Adicionalmente, o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) -, da Organização Mundial de Meteorologia - *World Meteorological Organization* (WMO) -, recomenda a diminuição da emissão de CO₂ em 30% até 2030, relativamente aos valores registados em 1990. O crescimento anual médio do consumo energético na UE ronda os 2 a 3%. Este facto, aliado aos objectivos acordados internacionalmente anteriormente enumerados, resultam num dos desafios mais difíceis de sempre a atingir pela UE: a necessidade de instalar 650 GW de geração eléctrica livre de CO₂ até 2030. Tendo em conta que soluções como a energia nuclear são bastante controversas e que os procedimentos de instalação de centrais são, se permitidos, bastante demorados; que a tecnologia de captura de carbono ainda está sob desenvolvimento e a existência de outras - inúmeras - restrições de ordem política, é expectável que o maior impacto venha do sector das energias renováveis: biomassa, solar e eólica (Lesser and Müller, 2009).

A agência europeia para a energia eólica - *European Wind Energy Agency* (EWEA) - prevê que 300 dos 650 GW a instalar provenham de origem eólica (EWEA, 2012). Este foco especial da UE na energia eólica obriga ao crescimento contínuo da capacidade dos Conversores de Energia Eólica (CEE), as ditas turbinas eólicas. Contudo, a expansão da energia eólica em terra

(*onshore*) já se encontra bastante limitada, não só pelo tamanho máximo imposto às turbinas, como pela baixa disponibilidade de áreas onde há abundância do recurso eólico com qualidade e/ou a sua proximidade com zonas habitacionais. É expectável, por isso, que a maior expansão se dê no sector das turbinas *offshore* (EWEA, 2012). As turbinas colocadas em *offshore* têm ainda a vantagem de apresentarem maior produção energética, operando até ao dobro das horas à capacidade máxima que uma turbina *onshore*. Este facto torna, no longo prazo, os custos adicionais de instalação, logística e operação deste tipo de turbinas diluíveis nos lucros que geram (Abrahamsen et al., 2010).

As empresas líderes de mercado do sector dos CEEs são aquelas que demonstraram possuir a tecnologia mais fiável, tornando a fiabilidade no factor competitivo dominante do sector da geração eólica. Nos anos iniciais da tecnologia eólica *offshore*, a escolha do tipo de gerador recaiu sobre o Gerador de Indução (GI), familiar à indústria, bastante fiável e relativamente barato (Lesser and Müller, 2009). Contudo, estes geradores operam a velocidade fixa (ligados directamente à rede), tendo forçosamente de ser utilizados em conjunto com multiplicadores de velocidade para levar a velocidade de rotação do rotor da turbina, na ordem das poucas dezenas de rpm, para valores próximos da velocidade de rotação síncrona do gerador, várias centenas de rpm. O sistema mecânico de transmissão das turbinas, onde se insere o multiplicador de velocidade, é a principal origem de problemas que levam à sua paragem. Estes tornaram-se, por isso, num componente crítico à fiabilidade - e conseqüente sucesso - da energia eólica *offshore*. O caminho adoptado pela indústria para aumentar a fiabilidade das turbinas tem sido fundamentalmente o da simplificação dos sistemas mecânicos de transmissão, tendo nos últimos anos sido feito um esforço para tornar os multiplicadores de velocidade mais simples (com menos andares) e, se possível, eliminá-los totalmente do sistema de transmissão das turbinas.

A adopção do Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA) permitiu a simplificação, mas não eliminação total, dos multiplicadores de velocidade. Estes vieram fornecer alguma da flexibilidade que era desejada, permitindo tipicamente uma variação da velocidade de rotação de até $\pm 30\%$ relativamente à velocidade de síncronismo do gerador, um passo enorme em relação aos 2 a 5% permitidos pelos geradores assíncronos de rotor bobinado. Esta variação foi, em muitos casos, suficiente para simplificar os multiplicadores de velocidade, aumentando a fiabilidade das turbinas. Como resultado, o GIDA é, hoje em dia, o tipo de gerador mais utilizado na indústria eólica. Outra das estratégias adoptadas, como já foi referido, passou pela eliminação total dos multiplicadores de velocidade dos sistemas de transmissão das turbinas, ou seja, a adopção de sistemas de transmissão directa, ou sistemas *direct-drive* (DD). É neste contexto que o Gerador Síncrono (GS) surge como solução. Os GSs são geradores capazes de operar a velocidade variável, estando ligados à rede por intermédio de um conversor de frequência. Estes são co-

1. Introdução

nhecidos por produzirem energia com elevada qualidade, i.e., muito baixo conteúdo harmónico e estão disponíveis, ou sob desenvolvimento, três conceitos de geradores síncronos: o convencional, com enrolamentos de excitação em cobre; com excitação de magnetos permanentes; e com excitação realizada por materiais supercondutores de alta temperatura (SAT).

É esperado que o tamanho das turbinas continue a aumentar, uma vez que os custos das turbinas em si perfazem somente cerca de metade do preço total de instalação de um parque eólico *offshore*. Os outros grandes custos de instalação são, principalmente, com as fundações das turbinas e com elementos de conexão com a rede. A UpWind, projecto europeu cujo objectivo era estudar o futuro da energia eólica, determinou que seriam altamente desejáveis turbinas *offshore* com capacidade na gama dos 8 a 10 MW (UpWind, 2011).

A principal desvantagem dos geradores síncronos convencionais, que começa a tornar-se num impeditivo à sua implementação, é o seu grande tamanho (diâmetro) e peso, que sujeitam as torres destas turbinas a grandes esforços mecânicos (Ohsaki et al., 2010). Isto obriga à utilização de sistemas estruturais cada vez maiores, mais pesados e mais caros para suportar o tamanho crescente destas cabinas¹. Têm sido desenvolvidas paralelamente duas tecnologias capazes de produzir geradores suficientemente compactos e leves na gama dos 10 MW: o Gerador Síncrono de Magnetos Permanentes (GSMP) e o Gerador Síncrono Supercondutor (GSSC).

Desde o seu descobrimento, em 1986, que os materiais SAT têm atingido desempenhos que os tornam cada vez mais relevantes à aplicação em maquinaria eléctrica rotativa. A característica mais interessante destes materiais é a sua capacidade de transportar elevadas densidades de corrente praticamente sem perdas, potenciando a fabricação de máquinas eléctricas com rendimentos mais elevados, mais compactas e mais leves. Neste contexto, a fita supercondutora de segunda geração (2G) YBCO surge como o candidato principal ao cumprimento dos requisitos de preço/desempenho necessários a que estes geradores supercondutores atinjam a fase de comercialização. Um estudo conduzido por Lesser and Müller (2009), da empresa produtora de turbinas eólicas Zenergy Power, prevê que os GSSCs se tornem mais baratos que os GSMPs para gamas de potência superiores a 5 MW. De momento decorre uma corrida tecnológica entre vários projectos de desenvolvimento de geradores síncronos supercondutores, para tentar fornecer o primeiro gerador eólico *offshore* na gama dos 10 MW. Entraram nesta corrida a aliança Converteam - Zenergy Power, da Europa, e a Teco Westington e a American Superconductor, dos EUA.

¹Ou *nacelle*, elemento da turbina onde se insere o gerador e o sistema de transmissão.

1.2 Objectivos

Os principais objectivos desta dissertação são:

- A realização de uma revisão dos geradores síncronos convencionais;
- Revisão da literatura existente sobre os geradores síncronos supercondutores;
- Projecto de um gerador síncrono supercondutor com base em simulações por elementos finitos;
- Dimensionamento do gerador supercondutor, com base num estator de uma máquina convencional;
- Ensaio do gerador supercondutor.

1.3 Principais Contribuições

A principal contribuição desta dissertação foi o projecto de um gerador síncrono que emprega materiais supercondutores de alta temperatura na excitação de campo. Foi elaborado um modelo de elementos finitos descritivo da dinâmica do gerador síncrono supercondutor que, sob simulação, revelou uma dinâmica muito idêntica à dos geradores descritos na literatura existente sobre a máquina síncrona supercondutora. Contudo, devido a restrições financeiras, não foi possível de realizar a construção e ensaio do gerador, ficando estes pontos da lista de objectivos como sugestão para trabalho futuro.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada nos seguintes seis capítulos:

1. Introdução.
2. Estado da Arte.
3. Gerador Síncrono SAT.
4. Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos.
5. Resultados e Discussão.
6. Conclusões.

1. Introdução

O Capítulo 1 inclui a introdução ao projecto, assim como os seus objectivos, contribuições do trabalho desenvolvido e a presente explicação da organização da dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se o estado da arte da máquina síncrona com excitação feita por materiais supercondutores de alta temperatura. São abordados diversos projectos de desenvolvimento e construção de máquinas eléctricas supercondutoras, dando-se um foco especial aos projectos da American Superconductor Corporation e da Siemens.

No Capítulo 3 apresenta-se o gerador síncrono supercondutor na sua forma mais clássica, assim como algumas topologias alternativas. É também feita uma breve revisão à máquina síncrona convencional e à supercondutividade de alta temperatura.

No Capítulo 4 apresenta-se a metodologia utilizada no projecto do gerador síncrono supercondutor, explicando-se a implementação do modelo de elementos finitos no software Flux2D. São ainda demonstrados e explicados os circuitos eléctricos utilizados nos testes realizados por simulação.

No Capítulo 5 são demonstrados e analisados os resultados obtidos por simulação. São discutidas as características da máquina síncrona supercondutora clássica, e é feita a comparação com a máquina síncrona convencional ou com a máquina síncrona supercondutora de rotor ferromagnético sempre que o realce de alguma característica se achar conveniente.

Finalmente, no Capítulo 6 são tiradas as conclusões do trabalho efectuado, fazendo-se também referências ao trabalho futuro que pode ser feito sobre o apresentado nesta dissertação.

2

Estado da Arte

Conteúdo

2.1	Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela Siemens	10
2.1.1	Máquina Modelo de 380 kW (1999-2002)	10
2.1.2	Gerador de Demonstração de 4 MVA (2002-2005)	16
2.1.3	Motor de Propulsão de 4 MW (2005-2012)	18
2.2	Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela AmSC	21
2.2.1	Protótipo de um Motor de Propulsão Naval de 5 MW da AmSC	22
2.2.2	Motor de Propulsão Naval de 36,5 MW da AmSC	25
2.2.3	Condensador Síncrono SAT (SuperVAR™)	26
2.3	Desenvolvimentos de Máquinas Eléctricas SAT no Japão	28
2.3.1	Motor Síncrono SAT de Fluxo Axial com 12,5 kW	29
2.3.2	Motores Síncronos SAT 2G desenvolvidos pelo grupo NEDO.	31
2.3.3	Motor de indução SAT desenvolvido na KU	33
2.4	Conclusões	36

2. Estado da Arte

Com o advento dos materiais SAT ressurgiu o interesse na aplicação destes materiais às mais variadas áreas do sector da energia. Por todo o mundo têm sido analisadas as áreas mais atractivas à aplicação deste tipo de materiais, desde motores e geradores eléctricos, a limitadores de corrente de curto-circuito, transformadores e cabos de transmissão de energia eléctrica (Gieras, 2009). Nomeadamente, nos Estados Unidos da América - *United States of America* (USA) -, o departamento da energia americano - *Department of Energy* (DoE) - e a agência de projectos de investigação avançados para a defesa - *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), tomaram a dianteira na investigação e desenvolvimento (I&D) de aplicação de materiais SAT a accionamentos de potência. Na Europa, um dos grandes impulsionadores tem sido a empresa Siemens, com o desenvolvimento de uma série de projectos de geradores e motores síncronos com excitação supercondutora de alta temperatura. No Japão também existem alguns grupos de estudos, pertencentes principalmente à faculdade de Quioto - *Kyoto University* (KU) - e à Organização de Desenvolvimento de Novas Energias e Tecnologia Industrial do Japão - *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO).

Para o caso particular das máquinas eléctricas rotativas, a aplicação de materiais supercondutores é especialmente interessante na excitação da máquina síncrona, devido à não-existência de perdas Óhmicas nos materiais supercondutores em *direct current* (DC) - corrente contínua - e da capacidade de se obterem maiores densidades de fluxo magnético (B), quando comparadas com as densidades de fluxo magnético obtidas nas máquinas convencionais. As principais características das grandes máquinas que empregam materiais SAT, demonstradas laboratorialmente por uma série de equipas concorrentes, são (Frauenhofer et al., 2008, Nick et al., 2002):

- Menor volume e peso: quando comparadas com máquinas convencionais de potência equivalente;
- Elevado rendimento: a melhoria do rendimento pode ser de até alguns pontos percentuais, devido à redução das perdas Óhmicas nos enrolamentos de excitação e das perdas por atrito, mesmo contabilizando o consumo energético adicional do sistema de refrigeração criogénico;
- Elevada capacidade de operação em sobrecarga: resultante da baixa reactância síncrona destas máquinas, que se deve essencialmente ao seu grande entreferro;
- Comportamento operacional rígido: baixa variância das características operacionais durante variações de carga repentinas; e
- Ruído e vibrações reduzidas: devido ao reduzido conteúdo harmónico do campo do entreferro (ausência de dentes ferromagnéticos no estator).

Os mercados com maior potencial à aplicação de materiais SAT tratam-se de mercados pertencentes ao sector da energia, nomeadamente, os mercados dos cabos de transmissão de potência, motores de potência elevada para aplicações navais e industriais, grandes geradores para produção de energia para a rede pública, condensadores síncronos, limitadores de corrente de curto-circuito e transformadores. Outras áreas de aplicação para os materiais supercondutores passam por máquinas homopolares, sistemas de armazenamento de energia magnética, motores síncronos lineares e levitação magnética, como no caso do Maglev. Na tabela 2.1 está uma previsão temporal para o início da comercialização de produtos com aplicação de materiais SAT feita pela Navigant, Dispute Consulting & Business Advisory Consulting Firm (USA).

Tabela 2.1: Projecção temporal para o início da comercialização de produtos com aplicação de materiais SAT, segundo a Navigant.

Aplicação	Protótipos iniciais	Protótipos refinados	Protótipos comerciais	Entrada no mercado	Penetração no mercado
Motores industriais	2004	2006	2011	2016	2019
Geradores de grandes dimensões	2008	2012	2016	2020	2023
Condensadores síncronos	2004	2006	2009	2011	2014
Geradores eólicos	2008	2010	2012	2014	2017
Transformadores	2003	2008	2011	2014	2017
Limitadores de corrente de curto-circuito	2007	2010	2012	2014	2017
Cabos de potência	2006	2008	2011	2014	2017

Nas secções seguintes realiza-se um breve levantamento bibliográfico de alguns projectos dos vários grupos de I&D espalhados pelo mundo, assim como dos resultados obtidos por cada um deles. Na 2.1 - Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela Siemens, abordam-se os projectos desenvolvidos pela Siemens, na Europa, de construção de geradores eléctricos e, mais recentemente, de um motor de propulsão tendo em vista o mercado naval. Na secção 2.2 - Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela AmSC, abordam-se os principais projectos desenvolvidos pela American Superconductor Corporation (AmSC) nos Estados Unidos da América (EUA), incluindo o do condensador síncrono SAT SuperVARTM que, de resto, já se encontra em comercialização. Na secção 2.3 - Desenvolvimentos de Máquinas Eléctricas SAT no Japão, abordam-se alguns projectos, de máquinas mais pequenas, desenvolvidas no Japão. Finalmente, na secção 2.4 faz-se uma pequena síntese dos resultados obtidos nos vários projectos que foram apresentados no capítulo.

2.1 Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela Siemens

A Siemens iniciou, em 1999, uma série de programas de I&D de máquinas síncronas que empregam materiais supercondutores de alta temperatura (SAT) na excitação de campo. Os objectivos principais da empresa com estes projectos eram demonstrar não só a exequibilidade de vários componentes básicos integrantes deste tipo de máquinas, como também a possibilidade de escalamento para gamas de potência de aplicação real (Gieras, 2009). Um ponto comum a todos os projectos Siemens, que difere da abordagem clássica à máquina síncrona supercondutora, é a utilização de materiais ferromagnéticos no rotor. Nas subsecções seguintes faz-se uma descrição mais pormenorizada dos objectivos específicos de cada projecto, assim como dos resultados obtidos em cada um deles.

2.1.1 Máquina Modelo de 380 kW (1999-2002)

Este projecto inicial tratou-se de uma parceria entre vários departamentos da Siemens e o Ministério Federal para a Educação e Desenvolvimento Alemão - *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMBF). O objectivo principal era construir uma máquina modelo de 4 pólos e 380 kW que empregava materiais SAT na sua excitação, para demonstração das características, vantagens e, principalmente, da exequibilidade de uma máquina eléctrica rotativa supercondutora. O projecto foi iniciado no ano de 1999 tendo o desenvolvimento, construção e ensaio da máquina decorrido até 2002. A máquina modelo está demonstrada na figura 2.1, assim como a sua equipa de desenvolvimento.



Figura 2.1: Máquina modelo de 380 kW desenvolvida pela Siemens. Retirado de (Nick et al., 2002).

As dimensões da máquina foram mantidas relativamente reduzidas, para limitar os custos do projecto, mas grandes o suficiente para validar os resultados obtidos e viabilizar projectos futuros. Os parâmetros de projecto da máquina modelo estão na tabela 2.2 (Nick et al., 2002).

2.1 Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela Siemens

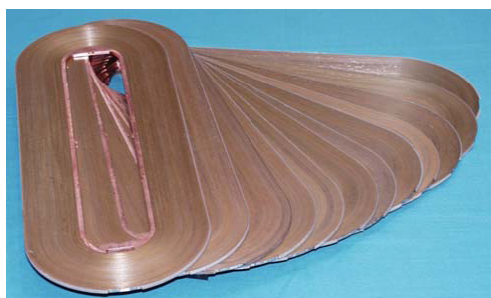
Tabela 2.2: Parâmetros da máquina modelo Siemens de 380 kW.

Parâmetros da máquina modelo	
Potência / velocidade	380 kW / 1500 rpm
Armadura	400 V / 560 A / arrefecimento a ar
Dimensões da carcaça (diâmetro / comprimento)	700 mm / 1100 mm
Enrolamentos de campo	49 A / 25-30 K / Ne- <i>termosiphon</i>
Indução máxima nos enrolamentos de campo / superfície do crióstato	2,5 T / 1,1 T

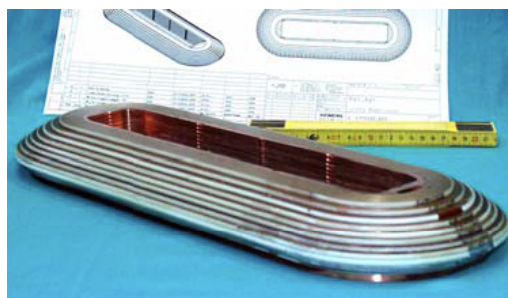
Nos pontos seguintes faz-se uma descrição mais detalhada dos elementos da máquina que tiveram foco especial, nomeadamente, as bobinas *racetrack* em fita supercondutora de primeira geração (1G) Bi-2223, o tubo de transmissão de binário (ou *torque tube*), o crióstato rotativo que envolve o rotor e o sistema de refrigeração.

2.1.1.1 Enrolamentos de Excitação (ou de Campo)

A principal questão que a Siemens queria ver respondida relativamente aos enrolamentos SAT era se estes seriam passíveis de aplicação numa máquina rotativa, sujeita forças centrífugas reais e aperfeiçoar um método de produção para estas. Os enrolamentos de excitação foram construídos utilizando fita de primeira geração (1G) Bi-2223 fabricada pela Nordic Superconductor Technologies (NST). Foram utilizados 9,5 km de fita para produzir 48 bobinas individuais sob a forma de *racetrack* (ou panqueca). Na figura 2.2(a) podem ver-se as bobinas *racetrack* correspondentes a um dos quatro pólos magnéticos da máquina e na figura 2.2(b) essas bobinas já ligadas, formando um dos pólos magnéticos da máquina.



(a) Bobinas de fita 1G (Bi-2223) fabricada pela NST.

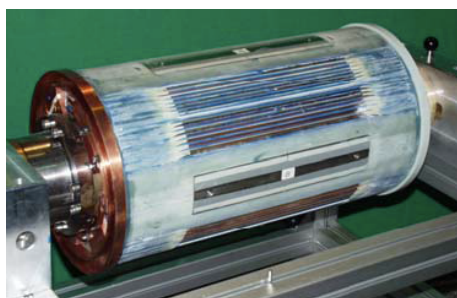


(b) Um dos quatro pólos magnéticos da máquina modelo.

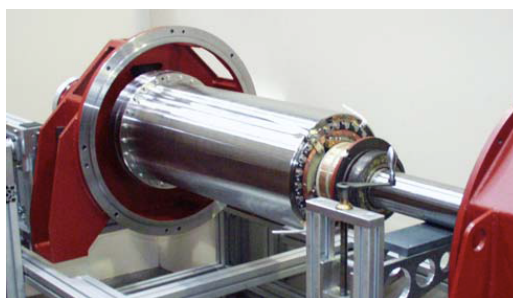
Figura 2.2: Enrolamentos de excitação da máquina modelo Siemens de 380 kW. Retirado de (Nick et al., 2002).

2. Estado da Arte

No núcleo do rotor foi utilizado material ferromagnético, quando a abordagem clássica à máquina supercondutora é a utilização de um material não-magnético no rotor (*rotor air-core*). Isto foi feito com o objectivo de diminuir a quantidade de material supercondutor necessário para atingir os valores de B projectados (na tabela 2.2). As bobinas foram posteriormente montadas em quatro pólos ferromagnéticos, tendo sido reforçadas com um compósito de fibra de vidro. Na figura 2.3(a) é possível ver-se o rotor da máquina modelo ainda sob construção, e na figura 2.3(b) é possível ver-se o rotor já finalizado.



(a) Construção do rotor magnético da máquina modelo.



(b) Rotor magnético da máquina modelo finalizado.

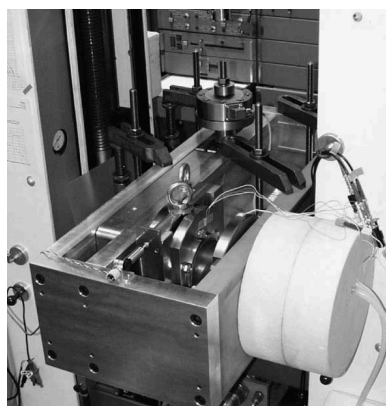
Figura 2.3: Rotor da máquina modelo Siemens de 380 kW. Retirado de (Nick et al., 2002).

Para garantir a qualidade e desempenho dos enrolamentos foi elaborado um programa de qualidade que garantia continuamente as dimensões da fita, assim como o valor da corrente crítica (I_c) e de densidade de fluxo magnético crítico (B_c) para diferentes condições de temperatura e densidades de fluxo magnético.

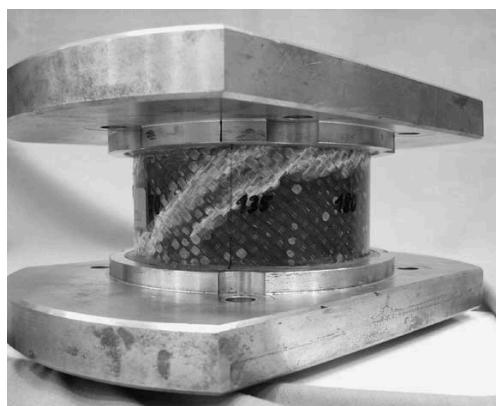
2.1.1.2 Tubo de Transmissão de Binário (*Torque Tube*)

O tubo de transmissão de binário (*torque tube*) é um elemento crítico do sistema, responsável pela extração do binário do interior da máquina (a temperaturas criogénicas) para o exterior, minimizando a condução de calor do exterior para o interior da máquina. O *torque tube* é, portanto, um componente fundamental à eficiência e até viabilidade deste tipo de máquinas, uma vez que os sistemas de crio-refrigeração conseguem extrair uma quantidade muito reduzida de calor a temperaturas tão baixas.

Foram produzidos uma série de *torque tubes* em *Glass-Fiber Reinforced Plastic* - Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (G-FRP) -, que foram testados nas instalações da Siemens, com recurso a uma máquina de testes de torção, capaz de sujeitar os *torque tubes* às mesmas condições de binário e temperatura do interior da máquina (figura 2.4(a)). Na figura 2.4(b) pode ver-se um destes *torque tubes* destruído, na sequência de um ensaio (Kummeth et al., 2005).



(a) Montagem experimental utilizada para testar os *torque tubes*



(b) *Torque tube* destruído após ensaio.

Figura 2.4: *Torque tubes* testados na Siemens. Retirado de (Kummeth et al., 2005).

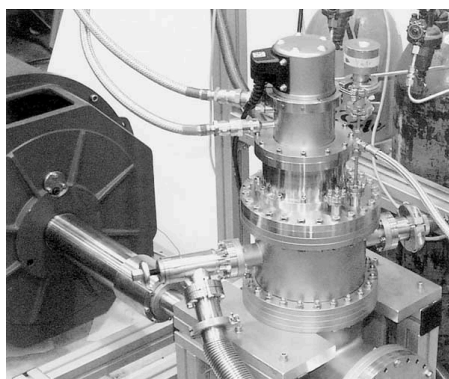
2.1.1.3 Sistema de Refrigeração

O sistema de arrefecimento das bobinas SAT é um dos pontos críticos de uma máquina supercondutora. Este que tem de ser o mais robusto e fiável que for possível, de forma a evitar-se fenómenos de *quenching* que possam danificar o material supercondutor e retirar a máquina de operação. Foram desenvolvidos dois sistemas de refrigeração: um, inicial, baseado em vapor de Hélio (GHe) arrefecido e outro, baseado em Neon líquido (LNe). O primeiro sistema, baseado num sifão que forçava o fluxo de GHe pelo veio oco, foi rapidamente abandonado por não fornecer as características de operação desejadas (Nick et al., 2002). O segundo sistema de refrigeração desenvolvido, baseado num refrigerador criogénico comercial Gifford-McMahon, apresentou características de operação melhores que o sistema anterior, levando ao abandono do mesmo.

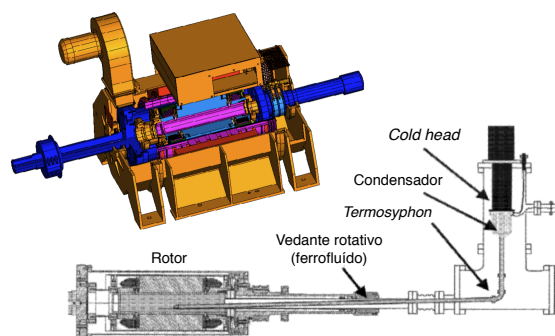
Neste sistema fechado, a cabeça fria² do refrigerador criogénico encontra-se em contacto com o tubo de escoamento de calor onde circula o Ne, arrefecendo-o. O Ne líquido circula para o interior da máquina, através do veio oco, circulando por uma série de tubos de cobre que arrefecem bobinas SAT por condução térmica e evaporam o Ne. O Ne sob a forma de gás circula novamente para o exterior até ao crio-refrigerador, onde é recondensado. Na figura 2.5(a) pode ser visto o refrigerador criogénico Gifford-McMahon ligado ao veio da máquina modelo Siemens (à esquerda) e na figura 2.5(b) os esquemáticos do sistema de refrigeração (Kummeth et al., 2005, Frank et al., 2004).

²Do termo inglês *cold head*

2. Estado da Arte



(a) Refrigerador tipo Gifford-McMahon, ligado à máquina modelo. Retirado de (Nick et al., 2002).

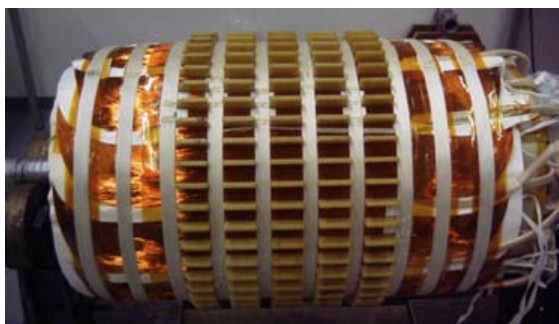


(b) Esquemáticos do sistema de refrigeração. Adaptado de (Frank et al., 2004)

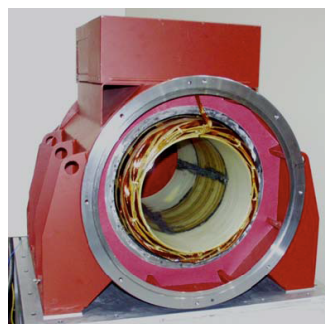
Figura 2.5: Sistema de refrigeração da máquina modelo Siemens de 380 kW.

2.1.1.4 Estator

O estator foi construído sem dentes ferromagnéticos de suporte aos enrolamentos (*air-core winding*). Os dentes magnéticos foram excluídos devido à possibilidade de ocorrência de saturação magnética nestes, uma vez que os valores de densidade de campo magnético (B) produzidos pelos enrolamentos de campo supercondutores são superiores aos dos enrolamentos de cobre convencionais. Além disso, a exclusão dos dentes também reduz as harmônicas de dentadura. O material utilizado para suporte foi G-FRP (ver figura 2.6(a)), em conjunto com uma culatra ferromagnética exterior convencional que fornece além de estrutura mecânica, um caminho de baixa relutância para as linhas de fluxo magnético se poderem fechar. Na figura 2.6(b) é possível ver-se o estator finalizado, com os enrolamentos já instalados na carcaça da máquina.



(a) Estruturas em G-FRP de suporte dos enrolamentos estatóricos.



(b) Enrolamentos estatóricos instalados na culatra exterior da máquina modelo

Figura 2.6: Construção do estator da máquina modelo SAT Siemens de 380 kW

Os enrolamentos estatóricos foram projectados de forma a que a máquina pudesse operar com os 400 V de tensão composta da rede e feitos de condutores de *Litz* (Nick et al., 2002), para limitar as perdas por correntes de *Foucault* no estator. Além disso, as densidades de corrente do estator foram projectadas de forma a que o sistema de refrigeração a ar convencional fosse capaz de compensar os vários tipos de perdas do estator (perdas resistivas e magnéticas no ferro).

2.1.1.5 Testes, Resultados e Conclusões

Os testes iniciais incidiram sobre as bobinas SAT. Depois de verificados os valores de indução projectados, o rotor foi instalado na carcaça da máquina e esta foi ensaiada nos modos de gerador e motor. Como carga foram utilizados um banco de resistores e uma máquina DC.

As perdas térmicas do rotor, com a máquina a rodar à velocidade nominal, foram entre 20 e 30 W. Estes valores encontram-se dentro do alcance do crio-refrigerador utilizado, capaz de extrair até 40 W de calor a 25 K. Isto demonstrou que a construção de um rotor SAT, incluindo um crióstato rotativo e um sistema de transmissão de binário sem perdas térmicas excessivas, é viável. Este sistema de refrigeração também se mostrou bastante fiável, tendo operado por mais de três anos sem problemas. As tensões em vazio geradas no estator (modo gerador) são sinusóides quase perfeitas, com uma distorção harmónica total - *Total Harmonic Distortion* (THD) - inferior a 0,15%, uma melhoria em relação às máquinas síncronas convencionais que possuem THDs que podem atingir os 3%. O rendimento desta máquina modelo alcançou os 96,8%, valor superior ao de uma máquina convencional comparável (~96%). A reactância síncrona obtida foi $X_{\Delta} = 0,15 \text{ p.u.}$, o que resulta numa operação em regime nominal com um ângulo de carga muito baixo ($\delta = 8^{\circ}$) e numa capacidade de operação em sobrecarga de até 700%, quando os valores típicos de uma máquina convencional rodam os 50° para o ângulo de carga e 130% para a capacidade operação em sobrecarga.

Apesar do objectivo principal do projecto ser demonstrar que a construção de uma máquina eléctrica que emprega materiais SAT é possível, e desta não ter sido optimizada, a máquina modelo apresentou diversas vantagens relativamente às máquinas síncronas convencionais. Entre estas estão a melhoria do rendimento, maior capacidade de operação em sobrecarga e um comportamento muito rígido, insensível a variações súbitas de carga. Este projecto abriu assim portas ao desenvolvimento de uma nova geração de máquinas eléctricas mais compactas, leves e eficientes que as máquinas actuais, que podem ser interessantes às mais diversas áreas, desde aplicações de baixa velocidade (geração eólica e propulsão marítima), à alta velocidade (turboalternadores) (Kummeth et al., 2005).

2.1.2 Gerador de Demonstração de 4 MVA (2002-2005)

O projecto do gerador síncrono SAT de 4 MVA tratou-se, basicamente, do escalamento da máquina modelo de 380 kW anteriormente desenvolvida para uma gama de potência susceptível de aplicação real. O objectivo era verificar se as vantagens operacionais obtidas no projecto anterior se mantinham nesta escala. Outro ponto fundamental do projecto foi a introdução de redundância no sistema de refrigeração, através da inclusão de crio-refrigeradores adicionais, com o objectivo de aumentar a fiabilidade da máquina, assim como permitir intervenções no sistema de refrigeração sem necessidade de paragem da mesma.

A escolha da máquina a desenvolver incidiu sobre um gerador de 4 MVA de dois pólos e 3600 rpm, para integração num sistema de geração de energia de alto rendimento de um navio. O gerador síncrono supercondutor foi desenvolvido e testado entre os anos de 2002 e 2005 e foi parcialmente financiado pelo Ministério Federal da Economia e Tecnologia Alemão - *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie* (BMW) (ver figura 2.7).



Figura 2.7: Gerador SAT Siemens de 4 MVA no banco de ensaios. Retirado de www.siemens.com.

2.1.2.1 Construção do Gerador SAT de 4 MVA

O conceito do gerador SAT de 4 MVA é basicamente o da máquina anterior: rotor ferromagnético com enrolamentos de excitação de fita SAT 1G e um estator *air-core*. O estator é de média tensão, o seu sistema de ventilação é misto (ar e água) e pode ser operado ligado a um variador de velocidade (3~60 Hz). Na tabela 2.3 é feita uma comparação³ entre as especificações deste gerador e de um gerador convencional de 4 MVA (Nick et al., 2007, Gieras, 2009).

³Comparação realizada com um gerador de 4 pólos, por não existirem geradores de 2 pólos para estes níveis de tensão e potência

2.1 Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela Siemens

Tabela 2.3: Comparação entre as especificações do gerador síncrono supercondutor de demonstração de 4 MVA desenvolvido pela Siemens e um gerador convencional. Retirado de (Gieras, 2009).

Especificações	Gerador SAT	Gerador convencional
Número de fases	3	3
Potência nominal, kW	4000	4000
Tensão nominal a 60 Hz, kV	6,6 (3,3)	6,6
Binário nominal, kNm	10,6	21
Velocidade nominal, rpm	3600	1800
Número de pólos	2	4
Reactância síncrona, p.u.	0,41	2.22
Corrente nominal, A	350 (700)	350
Dimensões (Comprimento x Largura x Altura), m	3,3 x 1,9 x 1,8	2,6 x 2,2 x 2,7
Peso, t	7	11
Rendimento, incluindo sistema de refrigeração ($\cos\phi = 1$), %	98,7	97,0

2.1.2.2 Testes e Determinação dos Parâmetros da Máquina

O gerador foi testado nas instalações da Siemens, em Nuremberg, Alemanha. A carga era constituída por duas máquinas de indução de 2,5 MW que podem ser vistas na figura 2.7, à esquerda, encapsuladas num compartimento de diminuição para diminuição de ruído. Não foram encontrados problemas nos componentes do rotor derivados das elevadas acelerações centrífugas que actuam sobre estes, isto é, tanto estes, como o sistema de refrigeração das bobinas supercondutoras operaram de acordo com o projecto. O gerador de 4 MVA, quando comparado com um gerador convencional da mesma gama de potência, apresentou uma melhoria de rendimento superior a 2%, de 96,1% para 98,4%⁴, como se pode ver na tabela 2.3 (Nick et al., 2007). Na figura 2.8(a) é possível ver-se o rotor da máquina sob testes, e na figura 2.8(b) a máquina com o rotor já instalado no seu interior.

A Siemens conseguiu, com este projecto, demonstrar que é possível construir máquinas eléctricas rotativas SAT com potências susceptíveis de aplicação real, menor volume, menor peso e maiores níveis de rendimento. Pela experiência adquirida com estes projectos, a fiabilidade e robustez também não são aspectos preocupantes, uma vez que as máquinas operaram durante vários anos sem falhas nos elementos que suscitavam maior preocupação - as bobinas SAT, o sistema de refrigeração e o sistema de transmissão de binário *torque tube*. Uma das aplicações mais prometedoras para este tipo de máquinas é como motor de propulsão de alto binário e alto rendimento, para utilização em navios totalmente eléctricos. Tendo isto em conta, a máquina também foi ensaiada ligada a um variador de frequência sob o modo de motor, com o objectivo de determinar as suas características comportamentais sob este regime de operação.

⁴medido segundo o EN 60034-2

2. Estado da Arte



(a) Rotor do gerador de demonstração de 4 MVA sob ensaio.



(b) Instalação do rotor SAT na carcaça da máquina de 4 MVA

Figura 2.8: Construção e ensaio do gerador Siemens de 4 MVA. Retirado de (Nick et al., 2007).

A Siemens tornou-se assim numa das primeiras empresas a desenvolver um protótipo de um gerador eléctrico SAT com potência susceptível de aplicação real. Contudo, e apesar de ter desenvolvido um conceito baseado num rotor ferromagnético (que diminui a quantidade de material SAT necessário), a Siemens apurou que para tornar estas máquinas viáveis e comercialmente competitivas seria necessário um aumento de desempenho das fitas e que o seu preço específico diminuísse pelo menos uma ordem de grandeza. Apontou ainda a tecnologia da fita 2G como um dos candidatos com maior potencial ao alcance destes objectivos.

2.1.3 Motor de Propulsão de 4 MW (2005-2012)

Com os projectos Siemens anteriormente desenvolvidos (máquina modelo de 380 kW e o gerador de 4 MVA) concluiu-se que uma das áreas das máquinas eléctricas mais atractivas à aplicação de materiais SAT seriam os motores para aplicação em propulsão naval. Assim, neste projecto, pretendia-se a especialização da tecnologia das máquinas SAT, criando uma máquina supercondutora de baixa velocidade e alto binário para aplicação no sistema de propulsão de um navio. O projecto foi novamente parcialmente financiado pelo BMWi e a máquina desenvolvida pode ser vista, ligada a uma máquina de carga, na figura 2.9.

De forma a conseguir atrair futuros clientes e mercados para a tecnologia das máquinas eléctricas SAT foram respeitados os requerimentos de classificação naval. Além disto, a máquina teve de ser projectada de forma a poder operada sob condições adversas, semelhantes às condições de aplicação reais, que se encontram longe das condições laboratoriais (Nick et al., 2010).

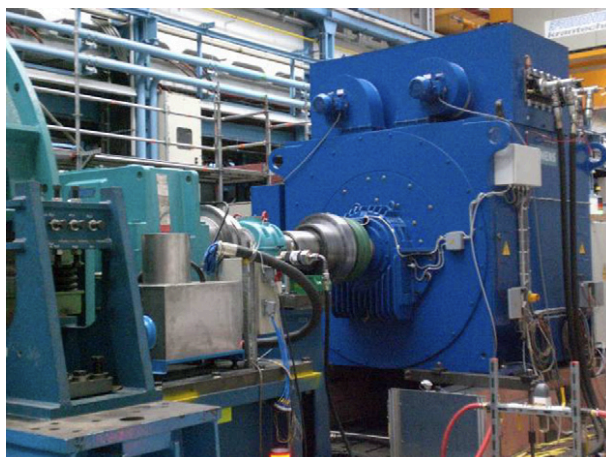


Figura 2.9: Motor de propulsão de 4 MW no banco de ensaio, acoplado a máquina de carga. Retirado de (Nick et al., 2012).

2.1.3.1 Construção do Motor de Propulsão de 4 MW SAT de 4 MW

O conceito da máquina escolhido é o mesmo que nos projectos precedentes: uma máquina síncrona de fluxo radial, com enrolamentos de campo SAT suportados por um rotor ferromagnético. A fita SAT utilizada é de Bi-2223, fornecida pela Bruker HTS. Os parâmetros principais da máquina encontram-se listados na tabela 2.9 (Nick et al., 2010).

Tabela 2.4: Especificações do motor de propulsão Siemens de 4 MW. Adaptado de (Nick et al., 2010).

Especificações	
Potência nominal, MW	4
Velocidade nominal, rpm	120
Gama de velocidades, rpm	30 - 190
Binário Nominal, kNm	320
Número de pólos	8
Excitação	Excitatriz electrónica sem escovas
Refrigeração do rotor	Crio-refrigeradores Gifford-McMahon
Refrigeração do estator	Ar com permutador de calor ar-água

O rotor desta máquina teve de obedecer a critérios especialmente exigentes para assegurar não só o seu desempenho, como a própria integridade estrutural da máquina. Na figura 2.10(a) pode ver-se o rotor do motor de propulsão sob construção e na figura 2.10(b) o rotor terminado. À direita, montada no veio, é possível ver-se a excitatriz sem escovas da máquina (Nick et al., 2010).

2. Estado da Arte



(a) Construção do rotor do motor de propulsão Siemens de 4MW.



(b) Rotor do motor de propulsão concluído. À direita, montada no veio, pode ver-se a excitatriz da máquina.

Figura 2.10: Rotor do motor de propulsão SAT Siemens de 4MW. Retirado de (Nick et al., 2010).

2.1.3.2 Testes, Resultados e Conclusões

O peso total da máquina, incluindo os compressores dos crio-refrigeradores, cumpriu o objectivo inicial da equipa de 40 t. De notar que este é um valor muito superior ao do gerador de 4 MVA anteriormente desenvolvido (7 t), contudo, o binário nominal da máquina é cerca de 30 vezes superior (320 kN.m, quando o gerador tinha 10,6 kN.m). As características da máquina estão na figura 2.11. A característica em vazio, a verde na figura 2.11, apresenta uma ligeira saturação que se deve ao facto do núcleo do rotor ser em material ferromagnético (Nick et al., 2012).

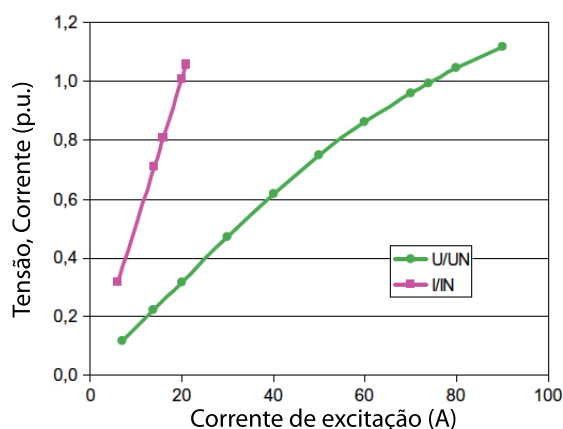


Figura 2.11: Características em vazio (a rosa) e de curto-circuito (a verde) do motor de propulsão SAT de baixa velocidade Siemens.

As perdas no rotor, incluindo perdas nas bobinas SAT, nos anéis deslizantes do sistema de excitação, perdas por radiação, por correntes de Foucault e por condução de calor no crióstato foram todas contabilizadas e correspondem apenas a 0,27% da potência da máquina. Na tabela 2.5

2.2 Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela AmSC

apresenta-se dados adicionais sobre as perdas do rotor em vários regimes de operação. Foi obtido um rendimento de 94,6%, incluindo a refrigeração do estator e do rotor, valor que é cerca de 1,5% superior ao de uma máquina convencional comparável, mas abaixo do projectado. A Siemens aponta o subdimensionamento da culatra estatórica como justificação para este resultado e estima que é possível atingir uma eficiência energética 3% acima da de uma máquina convencional, como estava projectado, sem infringir o objectivo das 40 t de massa (Nick et al., 2012). O próximo passo do projecto passa pelo re-*design* do estator.

Tabela 2.5: Perdas do rotor da máquina Siemens de 4 MW, medidas segundo o método calorimétrico. Retirado de (Nick et al., 2012).

Modo de operação	Velocidade de rotação (rpm)	Corrente de excitação (A)	Perdas do rotor (W)
Sem rotação	0	0	80
Em rotação, sem carga, ligada a um conversor	120	73	98
Em rotação, corrente nominal, ligada a um conversor	103	75	115

Com este projecto a Siemens explorou uma das áreas de motores e geradores eléctricos que tinha considerado mais interessantes à aplicação de materiais SAT: os motores de propulsão para aplicação em navios de grandes dimensões. A máquina SAT desenvolvida foi testada extensivamente, demonstrando que é possível projectar, desenvolver e construir rotores SAT não só para máquinas de média velocidade (como o gerador de 4 MVA), como também para máquinas de baixa velocidade e elevado binário, com a robustez e desempenho que são necessários para que estas se tornem realmente uma mais-valia relativamente às máquinas convencionais mais modernas.

2.2 Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela AmSC

A AmSC, uma das líderes mundiais no fabrico de fita supercondutora, desenvolveu uma série de programas de I&D de máquinas SAT em conjunto com a Marinha Norte-Americana para aplicação em propulsão naval. A primeira máquina fruto destes programas foi finalizada e entregue à Marinha Norte-Americana em inícios de 2007. Esta tratava-se de um motor síncrono de 36,5 MW e 120 rpm, com excitação SAT arrefecida através de azoto líquido (LN). O motor de 36,5 MW, assim como o protótipo de 5 MW que precedeu esse projecto, foi desenvolvido sob um programa conjunto entre a AmSC e o Escritório de Pesquisa Naval da Marinha Norte-Americana - *U.S. Navy's Office of Naval Research (ONR)* (Gieras, 2009).

2. Estado da Arte

Previamente à parceria com o ONR, a AmSC desenvolveu independentemente uma série de máquinas síncronas SAT de potência moderada, com o intuito de investigar a exequibilidade e vantagens obtidas com a aplicação de materiais SAT a uma máquina eléctrica rotativa. Nestes projectos foram testadas várias configurações para as máquinas, respeitando principalmente ao tipo de rotor a utilizar (com ou sem núcleo ferromagnético), ao tipo de estator (existência, ou não, de dentes ferromagnéticos) e ao número de pólos. Na tabela 2.6 encontram-se sumariamente especificadas as características das máquinas referidas.

Tabela 2.6: Motores síncronos de alta velocidade desenvolvidos pela AmSC. Retirado de (Pina, 2010)

Potência, kW	1,5	3,7	93	746	3730
Nº de pares de pólos, $2p$	1	2	2	2	2
Velocidade de sincronismo, rpm	3600	1800	1800	1800	1800
Alimentação, V	230	230		4160	6600
Temperatura de operação, K	77	77	25-30	33	35
Rendimento, %				97,1	97,7
Núcleo do rotor	Ferro	Ferro	Ar	Ar	Ar

O sucesso destes projectos levou à parceria com o ONR para desenvolvimento de um motor de propulsão SAT de 36,5 MW, para aplicação nos novos navios totalmente eléctricos da Marinha Norte-Americana. Num passo intermédio, foi desenvolvida uma máquina SAT de menores dimensões (e menores custos), que tinha como objectivo validar as tecnologias necessárias à construção do motor de propulsão SAT de 36,5 MW, assim como estabelecer processos industriais que minimizassem o tempo de desenvolvimento e reduzissem custos.

2.2.1 Protótipo de um Motor de Propulsão Naval de 5 MW da AmSC

2.2.1.1 Construção do Protótipo do Motor de Propulsão SAT com 5 MW

A escolha do protótipo a desenvolver incidiu sobre uma máquina síncrona de 5 MW, 6 pólos e 230 rpm de velocidade de rotação. Os enrolamentos de excitação da máquina foram fabricados em fita SAT 1G BSCCO, produzida pela própria AmSC. Os pólos magnéticos, e sua estrutura de suporte, encontram-se no interior de um crióstato sob vácuo, que além de fornecer e manter o ambiente criogénico necessário à operação do material SAT, minimiza a transferência de calor por radiação. Na superfície exterior do crióstato encontra-se um escudo electromagnético (EM), reponsável pela atenuação dos campos alternados (AC) produzidos pelo estator e de oscilações torcionais de baixa frequência da máquina. A temperatura de operação da máquina é 32 K,

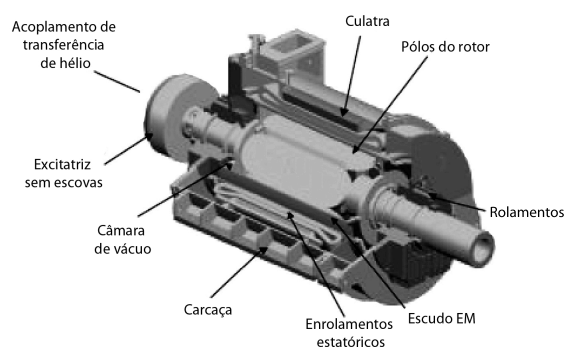
2.2 Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela AmSC

mantida por um sistema de refrigeração baseado em hélio gasoso (GHe) e num crio-refrigerador tipo Gifford-McMahon. O estator não possui dentes ferromagnéticos, e os enrolamentos são constituídos por fio de Litz. Os parâmetros da máquina encontram-se especificados na tabela 2.7 (Eckels and Snitchler, 2004).

Tabela 2.7: Especificações do motor de propulsão protótipo de 5 MW desenvolvido pela AmSC. Retirado de (Eckels and Snitchler, 2004)

Especificações	
Potência nominal, MW	5
Tensão nominal, V	2400
Corrente nominal, V	715
Número de pares de pólos, $2p$	3
Factor de potência à carga nominal	1
Velocidade nominal, rpm	120
Frequência à velocidade nominal, Hz	11,5

Na figura 2.12(a) pode ver-se um desenho técnico - *Computer-Aided Design (CAD)* - tridimensional da máquina e na figura 2.12(b) a máquina sob teste, acoplada a uma máquina de 2,5 MW que opera como carga. (Woodruff et al., 2005).



(a) CAD da máquina protótipo de 5 MW desenvolvida pela AmSC. Retirado de (Eckels and Snitchler, 2004).



(b) Protótipo de 5 MW da AmSC sob teste, acoplado a uma máquina convencional de 2,5 MW. Retirado de (Kalsi et al., 2006a)

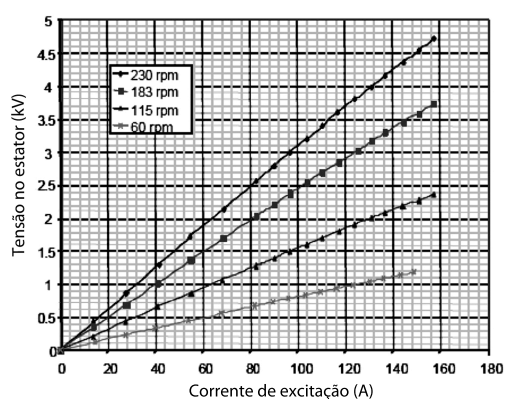
Figura 2.12: Máquina protótipo de 5 MW desenvolvida pela AmSC (fonte: www.amsc.com).

2.2.1.2 Testes, Resultados e Conclusões

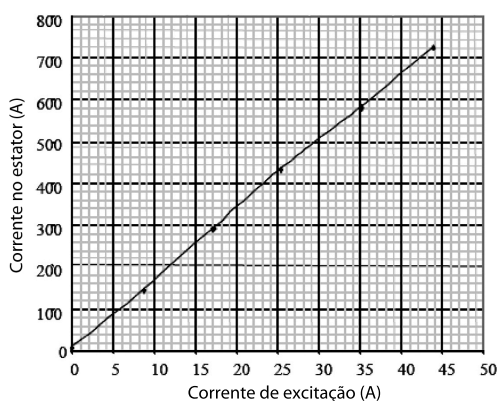
A máquina protótipo AmSC foi extensivamente testada nas instalações do Centro de Sistemas Avançados de Energia - *Center for Advanced Power Systems (CAPS)* - da Universidade do Estado da Florida, EUA - *Florida State University (FSU)* -, assim como nas instalações da Alstom, no Reino Unido Gieras (2009). Nos testes que foram efectuados foram simulados vários tipos de

2. Estado da Arte

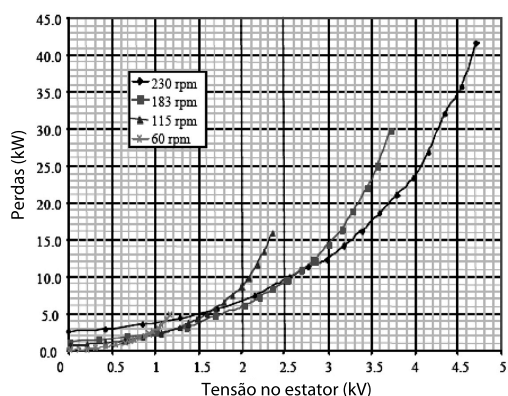
condições, incluindo a operação no mar, onde existem grandes variações, e muito repentinas, de binário no veio da máquina. Na figura 2.13 podem ver-se os resultados dos testes efectuados à máquina AmSC de 5 MW (Woodruff et al., 2005), mais concretamente: em 2.13(a), podem ver-se os gráficos correspondentes às características em vazio da máquina, obtidas para vários valores de velocidade de rotação; em 2.13(b) pode ver-se a característica de curto-circuito; em 2.13(c) as perdas medidas em vazio, em função da tensão aos terminais do estator; e na figura 2.13(d) o rendimento da máquina em função da carga.



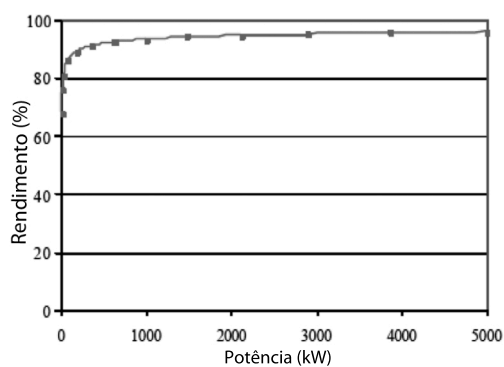
(a) Características em vazio para vários valores de velocidade de rotação.



(b) Característica de curto-circuito.



(c) Perdas da máquina para vários valores de velocidade de rotação, em função da tensão aos terminais do estator.



(d) Rendimento da máquina em função da carga.

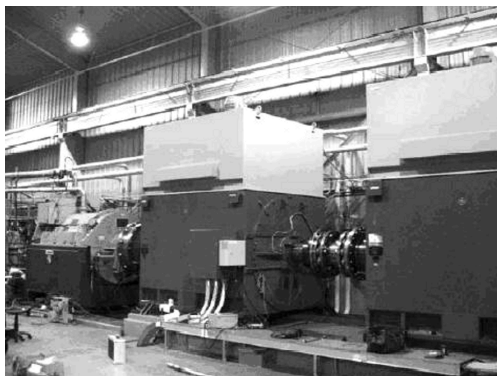
Figura 2.13: Resultados dos testes efectuados ao motor de propulsão SAT de 5 MW desenvolvido pela AmSC. Adaptado de (Eckels and Snitchler, 2004)

O tamanho reduzido do motor de propulsão de 5 MW oferece aos projectistas maior flexibilidade no projecto das embarcações, uma vantagem muito importante, pois o espaço disponível no interior das embarcações é bastante limitado. Além disso, a redução de peso facilita a instalação e

manutenção da máquina no navio e o *design air-core* do estator torna-a mais silenciosa, pois não existe ruído produzido nos dentes magnéticos. Outra característica muito atractiva deste motor é o facto de, além de possuir elevado rendimento à velocidade de rotação nominal, o manter em praticamente toda a sua gama de operação (ver figura 2.13(d)). A AmSC e o ONR referiram esperar que esta melhoria de rendimento possa conduzir a poupanças energéticas de até 10% quando comparada com uma máquina convencional de potência e binário equivalentes, (Eckels and Snitchler, 2004).

2.2.2 Motor de Propulsão Naval de 36,5 MW da AmSC

O projecto anterior da AmSC, o motor de propulsão protótipo de 5 MW, foi considerado um sucesso pelo ONR, organismo que financiou o projecto. O motor atingiu, ou excedeu, todos os objectivos estabelecidos em projecto, facto que conduziu à continuação do programa de I&D, com a construção de um motor SAT de maiores dimensões, com 36,5 MW. Na figura 2.14(a) pode ver-se o motor sob ensaio, nas instalações da CAPS da Universidade da Florida FSU, e na figura 2.14(b) pode ver-se a estator da máquina de 36,5 MW sob construção.



(a) Instalações de ensaio de motores e conversores electrónicos da CAPS, FSU.



(b) Estator do motor de propulsão de 36,5 MW.

Figura 2.14: Construção do motor de propulsão de 36,5 MW para aplicações navais desenvolvido pela AmSC. Retirado de (Gieras, 2008).

Na tabela 2.8 é feita uma comparação entre estas duas máquinas. Ambas demonstraram as seguintes características: (Kalsi et al., 2006a, Gieras, 2008, Gamble et al., 2011)

- Elevada densidade de potência: devido às maiores densidades de fluxo magnético produzidas pelos enrolamentos de excitação SAT, resultando em máquinas mais leves e compactas que as máquinas convencionais;
- Elevado rendimento a cargas parciais: resultando numa poupança de combustível que pode ser de até 10%, a baixas velocidades;

2. Estado da Arte

- Baixo ruído: os motores SAT têm emissões de ruído mais reduzidas que os motores convencionais, devido à ausência de dentes ferromagnéticos no estator;
- Baixa reactância síncrona: os motores SAT *air-core* caracterizam-se por ter uma reactância síncrona baixa, resultando numa operação a ângulos de carga muito baixos. A operação a ângulos de carga baixos providencia à máquina maior rigidez durante os transitórios, assim como grande capacidade de operação em sobrecarga;
- Elevada qualidade energética: A força electromotriz induzida nos enrolamentos do estator é praticamente livre de harmónicas elevadas (baixo THD);
- Insensibilidade aos ciclos de carga: os enrolamentos de campo dos motores SAT operam a uma temperatura praticamente constante e, por isso, não estão sujeitos a fadiga térmica;
- Compatibilidade com os variadores de velocidade comerciais: os motores SAT mantêm a compatibilidade com variadores de velocidade comerciais e da marinha, reduzindo o esforço de desenvolvimento de novos variadores;

Tabela 2.8: Comparação entre as especificações dos motor protótipo de 5 MW e do motor de propulsão de 36,5 MW. Retirado de (Gieras, 2008)

Especificações	Motor de 5 MW	Motor de 36,5 MW
Potência nominal, MW	5,0	36,5
Velocidade de rotação, rpm	230	120
Rendimento, %	96	97
Factor de potência, $\cos \varphi$	1,0	1,0
Número de fases	3	9
Número de pares de pólos, $2p$	3	8
Tensão nominal, kV	4,16	6,0
Corrente nominal, A	722	1270
Frequência, Hz	11,5	16
Fita SAT	1G BSCCO	1G BSCCO
Massa, t	23	75
Dimensões (Comprimento x Largura x Altura), m	2,5 x 1,9 x 1,9	3,4 x 4,6 x 4,1
Refrigeração dos enrolamentos estatóricos	Líquida	Líquida
Refrigerante das bobinas SAT	GHe	LN

2.2.3 Condensador Síncrono SAT (SuperVAR™)

A AmSC desenvolveu também um condensador síncrono - *Dynamic Synchronous Condenser* (DSC) - a que deu o nome de SuperVAR™. Um condensador síncrono trata-se, basicamente, de uma máquina síncrona, capaz de injectar ou consumir potência reactiva da rede, cuja principal função é fazer a compensação do factor de potência (Gieras, 2008).

2.2 Máquinas Síncronas SAT Desenvolvidas pela AmSC

A compensação do factor de potência é um aspecto muito importante para as empresas de produção e transporte de energia. A circulação de potência reactiva na rede aumenta o valor da corrente eficaz da linha, não providenciando, contudo, energia utilizável. Este aumento do valor da corrente eléctrica conduz também ao aumento das perdas na linha, limitando a quantidade de potência activa que pode ser efectivamente transportada. É, por isso, muito desejável que a linha de transporte tenha um factor de potência ($\cos \varphi$) o mais próximo de 1 que for possível, ou seja, a não-existência de potência reactiva circulante na rede. Um condensador síncrono é capaz de fazer a compensação da potência reactiva, que pode ser de carácter indutivo ou capacitivo, através da introdução na rede de uma reactância oposta. Os condensadores síncronos permitem assim que os geradores operem na sua zona óptima, produzindo energia com factores de potência muito próximos da unidade. Na figura 2.15 pode ver-se o DSC SAT protótipo de ± 8 MVAR que foi desenvolvido pela AmSC. (Kalsi et al., 2005).



Figura 2.15: Protótipo do SuperVAR™, um DSC SAT desenvolvido pela AmSC. Retirado de (Kalsi et al., 2007)

2.2.3.1 Características dos Condensadores Síncronos SAT desenvolvidos pela AmSC

O DSC SAT protótipo foi testado na rede do *Tennessee Valley Authority* (TVA) durante cerca de um ano. O sucesso destes ensaios levou a que a AmSC apostasse na comercialização deste produto, sob o nome de SuperVAR™. Estas máquinas são muito parecidas com os DSC convencionais, contudo, os enrolamentos de cobre foram substituídos por enrolamentos SAT. O rotor do SuperVAR™ da AmSC, ao contrário dos motores de propulsão desenvolvidos para a marinha, tem núcleo de ferro.

O SuperVAR™ apresenta diversas vantagens relativamente aos condensadores síncronos convencionais, como (Kalsi et al., 2005, 2006b, 2007):

- Menor área ocupada e maior transportabilidade: a maior densidade de potência das máquinas SAT tornam-nas mais compactas e leves que as máquinas convencionais comparáveis;

2. Estado da Arte

- Elevada fiabilidade: o desgaste do isolamento dos enrolamentos de uma máquina SAT é menor que o de uma máquina convencional, uma vez que estas operam a temperaturas criogénicas praticamente constantes. Isto resulta num menor número de curto-circuitos e consequente necessidade de rebobinagem;
- Maior capacidade de compensação do factor de potência: devido à baixa reactância síncrona e consequente operação a ângulos de carga muito reduzidos, os DSC SAT são mais rápidos a reagir a transitórios e têm maior capacidade de operação em sobrecarga.
- Mais económicos: são mais eficientes, consumindo menos energia. Isto deve-se principalmente à inexistência de perdas nos enrolamentos de excitação SAT.

2.2.3.2 Aplicação do SuperVAR™ a Parques Eólicos

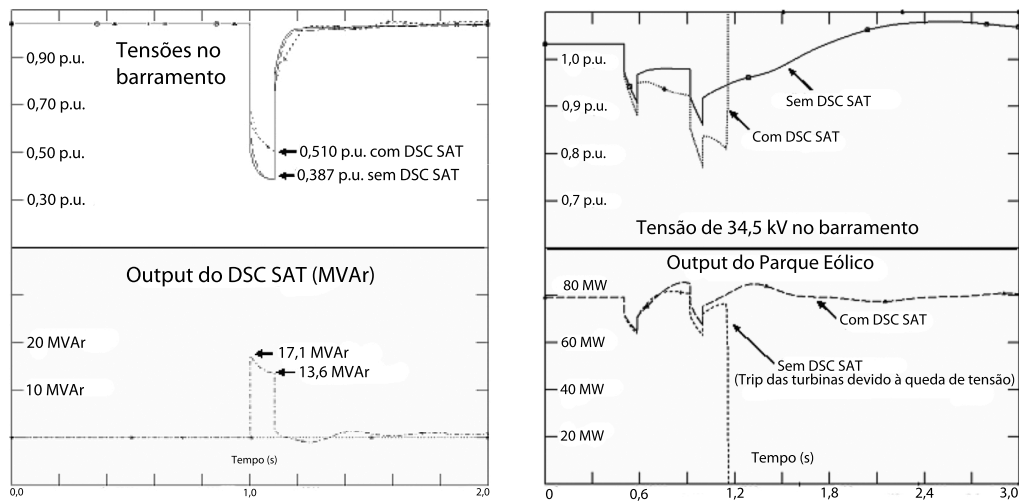
Uma das grandes desvantagens dos parques eólicos como entidade produtora de energia, relativamente a uma fonte de energia mais convencional, é o facto da potência activa disponível à saída dos parques não poder ser precisamente prevista ou controlada, devido à imprevisibilidade do recurso eólico. Ainda mais preocupante é o facto desta variação da potência activa ser, muitas vezes, acompanhada por variações da potência reactiva consumida, resultando em variações de tensão no barramento do parque eólico.

A AmSC estudou a instalação de DSC SAT num parque eólico, concluindo que estes têm maior capacidade para lidar com baixas de tensão que os seus equivalentes convencionais. Na figura 2.16 estão representados os resultados dos testes que foram realizados (obtidos por simulação), que fazem a comparação entre o desempenho do DSC SAT desenvolvido pela AmSC e o de um DSC convencional. Na figura 2.16(a), está um exemplo de ambos os DSC a reagirem a uma baixa de tensão no barramento. Verifica-se que a tensão, com o DSC convencional, baixa até 38,7% do valor nominal e que com o SuperVAR™ baixa até 51,0%. Na figura 2.16(b) pode verificar-se que, com o DSC SAT o sistema recupera mais rapidamente o valor da tensão (gráfico superior) e que, para o caso da potência (gráfico inferior), as turbinas eólicas são automaticamente desligadas devido à baixa da tensão (*trip*), quando é simulada a utilização de um DSC convencional. Com o DSC SAT o sistema consegue recuperar, sem necessidade de retirar turbinas de operação.

2.3 Desenvolvimentos de Máquinas Eléctricas SAT no Japão

Nas subsecções seguintes são apresentados alguns projectos de I&D de máquinas síncronas SAT realizados no Japão. Entre eles, incluem-se alguns que utilizam fita SAT 2G. (Gieras, 2009)

2.3 Desenvolvimentos de Máquinas Eléctricas SAT no Japão



(a) Reacção dos DSC a uma queda na tensão do barramento do parque eólico.

(b) Tensão (p.u.) e potência (MW) no barramento do parque eólico, com e sem o DSC SAT. De notar o disparo (*trip*) das turbinas para o caso do DSC convencional.

Figura 2.16: Comparação entre o desempenho de um DSC SAT e um DSC convencional, aplicados ao barramento de um parque eólico de 80 MW (resultados obtidos por simulação). Adaptado de (Kalsi et al., 2007).

2.3.1 Motor Síncrono SAT de Fluxo Axial com 12,5 kW

Um consórcio constituído por empresas e faculdades japonesas, entre elas o fabricante de fita supercondutora Sumitomo *Electric Industries* (SEI), desenvolveram e construíram um motor síncrono SAT de fluxo axial, com 12,5 kW. Foi utilizada esta configuração com o objectivo de simplificar o arrefecimento das bobinas utilizadas na excitação de campo, que assim ficam fixas.

A máquina foi projectada para ser integrada num sistema de propulsão de um pequeno navio, tratando-se de um motor síncrono trifásico, de fluxo axial e com 8 pólos, onde os enrolamentos de excitação são em fita (1G) e a armadura é rotativa. Foram utilizados núcleos ferromagnéticos nos enrolamentos de excitação de campo, com o objectivo de aumentar o nível de corrente crítica. A armadura está localizada entre dois semi-estatores e a sua excitação é constituída por seis bobinas de cobre. As bobinas de campo estão montadas em crióstatos de G-FRP, o que não origina perdas por correntes de Foucault. Na figura 2.17(a) pode ver-se um CAD do motor, em 2.17(b) o motor finalizado e em 2.17(c), o motor integrado no sistema de propulsão.

As especificações técnicas do motor estão na tabela 2.9.

Este motor vem no seguimento de um outro projecto de desenvolvimento e construção de uma máquina síncrona SAT por parte da mesma equipa. A máquina síncrona desenvolvida no projecto anterior consistia num motor de 8,8 kW, com rendimento máximo de 97,7% e capacidade

2. Estado da Arte

Tabela 2.9: Especificações do motor em disco japonês de 12,5 kW. Retirado de (Gieras, 2009).

Especificações	
Potência nominal, kW	12,5
Binário nominal, Nm	1194
Velocidade nominal, rpm	100
Corrente nominal, A	30
Dimensões, m (Diâmetro x Comprimento)	0,65 x 0,36
Enrolamentos de excitação SAT	
Número de espiras	330
Dimensões da secção da fita SAT, mm (largura x altura)	4,3 x 0,22
Diâmetros da bobinas SAT, mm (interno x externo)	136 x 160
Enrolamentos estáticos	
Número de espiras	850
Diâmetro das bobinas, mm	208
Diâmetro do fio de cobre, mm	2

de fornecer até 44 kW em funcionamento sob sobrecarga. Foram realizadas uma série de optimizações a esse motor, com o objectivo de aumentar a densidade de potência e melhorar o rendimento da máquina, tendo-se chegado a uma máquina com 12,5 kW, mantendo as dimensões. As optimizações realizadas ao motor síncrono trataram-se principalmente de (H.Sugimoto et al., 2006):

- Substituição do aço magnético por permendur: material magnético macio (MMM) altamente permeável, que apresenta uma elevada indução magnética de saturação (B_s), que pode atingir os 2,45 T (Pronto, 2010);
- Utilização de fitas SAT com maior capacidade de transporte de corrente e arrefecidas com azoto líquido sub-arrefecido (66 K), com o objectivo de aumentar a capacidade de transporte de corrente das fitas SAT.

Com estas optimizações, a potência disponibilizada pelo motor aumentou para 12,5 kW em regime de operação nominal e 60 kW em sobrecarga. A principal desvantagem do conceito adoptado por este grupo para este motor é o facto da alimentação das bobinas de campo ser feita através de escovas e anéis deslizantes (Gieras, 2009). O rendimento da máquina não aumentou após as optimizações que foram realizadas, tendo-se mantido nos 97,7% de valor máximo.

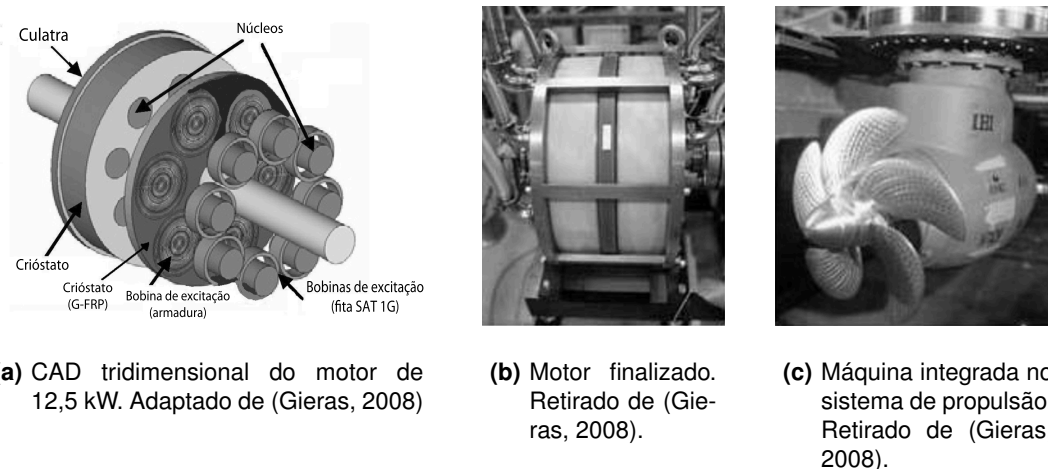


Figura 2.17: Motor síncrono japonês em forma de disco com enrolamentos de excitação SAT 1G.

2.3.2 Motores Síncronos SAT 2G desenvolvidos pelo grupo NEDO.

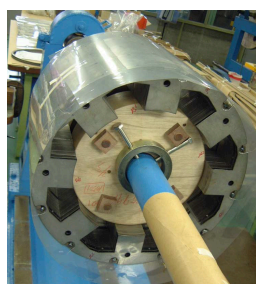
A NEDO, grupo de investigação constituído por Iwakuma et al., iniciou, em 2007, uma série de programas de desenvolvimento e construção de motores SAT que empregam fita 2G na excitação de campo.

2.3.2.1 Motor Síncrono de 15 kW

Inicialmente foi desenvolvido um motor síncrono de 15 kW e 8 pólos, com armadura rotativa e excitação de campo fixa, com o objectivo de simplificar a construção da máquina. Os enrolamentos de campo são constituídos por fita 2G (YBCO), sendo cada pólo constituído por uma única bobina de campo *racetrack*. A fita 2G de 10 mm de largura que foi utilizada na construção das bobinas de campo tinha corrente crítica I_c superior a 200 A aos 77 K, tendo sido obtidas correntes de até 400 A a 15 K. As bobinas de campo foram arrefecidas até 20 - 30 K, através da circulação forçada de hélio no estado gasoso (GHe) por tubos de cobre (possíveis de ver na montagem final dos enrolamentos de campo da figura 2.18(c)). Tanto o núcleo da armadura rotativa, como o núcleo das bobinas de excitação de campo são ferromagnéticos. Na figura 2.18(a) pode ver-se o núcleo ferromagnético fixo das bobinas de excitação, onde vão ser montadas as 8 bobinas SAT de fita 2G da figura 2.18(b), que constituem a excitação de campo da máquina. A montagem final da excitação de campo encontra-se na figura 2.18(c). O objectivo final destes projectos é a construção de motores totalmente supercondutores, com enrolamentos de excitação rotativos, na classe dos MW (Iwakuma et al., 2007).

Os parâmetros de projecto foram verificados e o motor foi instalado num sistema de propulsão, tendo ficado demonstrada a sua operação estável. O motor finalizado e acoplado ao sistema de propulsão pode ser visto na figura 2.19.

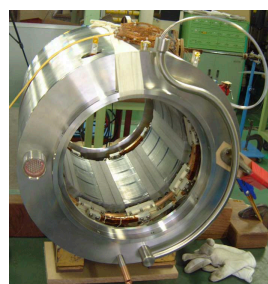
2. Estado da Arte



(a) Núcleo das bobinas de campo.



(b) Bobinas de excitação de fita SAT 2G.



(c) Enrolamentos de campo SAT de fita 2G finalizados.

Figura 2.18: Motor síncrono japonês de 15 kW com enrolamentos de excitação SAT 2G desenvolvido por Iwakuma et al.. Retirado de (Iwakuma et al., 2007).



(a) Motor de 15 kW finalizado.



(b) Motor síncrono SAT integrado num sistema de propulsão (sob teste).

Figura 2.19: Motor síncrono japonês de 15 kW com excitação SAT 2G, desenvolvido por Iwakuma et al., sob teste nos estaleiros de Nagasaki, da Mitsubishi Heavy Industry Ltd. Retirado de (Iwakuma et al., 2007).

2.3.2.2 Motor Síncrono de 7,5 kW (REBCO)

O projecto seguinte desenvolvido pelo grupo NEDO foi o da construção de um motor síncrono de fluxo radial, com rotor *air-core*. Tratava-se de um motor de 7,5 kW às 360 rpm, com 6 pólos e excitação constituída por fita SAT 2G REBCO arrefecida através de circulação forçada de GHe. Os enrolamentos estatóricos são de cobre. Neste caso foi adoptada a topologia mais convencional da máquina síncrona, isto é, enrolamentos de excitação de campo rotativos e uma armadura fixa. Os parâmetros de projecto do motor encontram-se detalhados na tabela 2.10.

Tabela 2.10: Parâmetros de projecto do motor japonês de 7,5 kW desenvolvido pelo NEDO. Retirado de (Iwakuma et al., 2008).

Especificações	
Potência nominal, kW	7,5
Binário nominal, Nm	199
Velocidade nominal, rpm	360
Rotor	
Número de pares de pólos, $2p$	3
Número de espiras	744 (12 espiras x 62 camadas)
Corrente nominal, A	60
Comprimento da fita por bobina, m	400
Temperatura de operação, K	40
Densidade máxima de fluxo magnético B , T	
perpendicular	0,27
paralelo	0,42
Estator	
Tensão nominal, V / frequência, Hz	400 (3ϕ) / 18 Hz
Corrente nominal, A	15,7

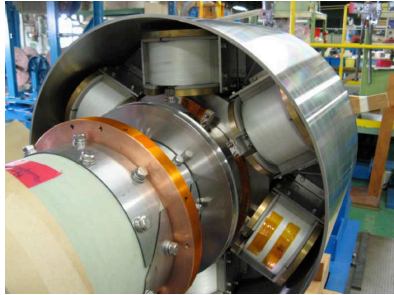
Na figura 2.20(a) pode ver-se a instalação das bobinas de campo no rotor da máquina e, nas figuras 2.20(b) e 2.21(a), respectivamente o rotor e o estator finalizados. O rotor tem 574 mm de diâmetro externo e o estator tem 580 mm de diâmetro interno e 800 mm de diâmetro externo. O motor completo pode ser visto sob ensaio na figura 2.21(b). O motor foi testado como um motor convencional, tendo ficado demonstrados os parâmetros de projecto.

2.3.3 Motor de indução SAT desenvolvido na KU

Um grupo de I&D da Universidade de Quioto - KU - desenvolveu, em 2006, um pequeno motor de indução⁵ com aplicação de materias SAT no rotor. O projecto partiu da modificação de uma máquina de indução (MI) comum, para minimização dos custos (Nakamura et al., 2006).

⁵designação sugerida pela própria equipa de desenvolvimento

2. Estado da Arte

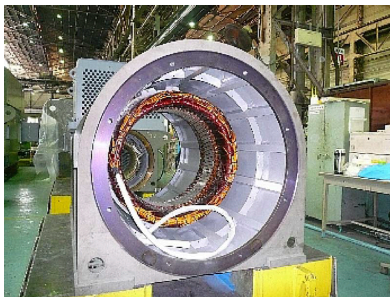


(a) Instalação das bobinas de campo no rotor *air-core*.



(b) Rotor *air-core* finalizado.

Figura 2.20: Construção do rotor do motor síncrono japonês de 7,5 kW com excitação SAT 2G desenvolvido pelo grupo NEDO. Retirado de (Iwakuma et al., 2009).



(a) Estator do motor NEDO SAT de 7,5 kW.

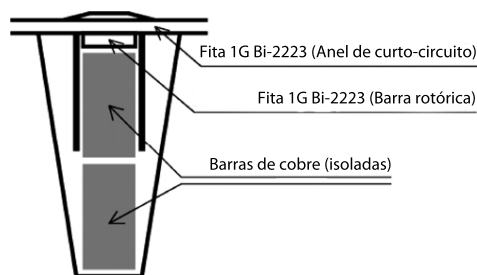


(b) Motor finalizado (à esquerda) sob ensaio. Aco-
plado ao motor SAT está um motor convencional,
a operar como carga.

Figura 2.21: Construção e ensaio do motor síncrono japonês de 7,5 kW com excitação SAT 2G desenvolvido pelo grupo NEDO. Retirado de (Iwakuma et al., 2009).

2.3 Desenvolvimentos de Máquinas Eléctricas SAT no Japão

A gaiola de esquilo da máquina foi substituída por material SAT (fita Bi-2223), tendo a armadura permanecido inalterada. O material SAT aplicado nas cavas foi colocado o mais próximo que era possível do entreferro, e foram utilizadas barras de cobre adicionais (isoladas) para fornecer apoio estrutural (ver esquemático de uma das cavas na figura 2.22(a)). A máquina foi arrefecida por imersão em azoto líquido e o óleo de lubrificação dos rolamentos foi substituído por acetona, para evitar o congelamento do líquido lubrificante e conseqüente aumento das perdas por atrito. O rotor finalizado pode ser visto na figura 2.22(b).



(a) Diagrama esquemático de uma cava do rotor da máquina. Adaptado de (Nakamura et al., 2006).



(b) Rotor da máquina de indução SAT. Retirado de (Nakamura et al., 2007b)

Figura 2.22: Motor de indução SAT desenvolvido por Nakamura et al. na Universidade de Quioto.

Este motor apresentou um comportamento diferente da MI convencional. A MI SAT desenvolve binário de arranque e de aceleração mais elevado que a MI convencional, mas apresenta uma tensão mínima de arranque. Além disso, a máquina produz binário à velocidade síncrona, pelo aprisionamento de fluxo magnético no material supercondutor (ver figura 2.23) (Nakamura et al., 2007a,b). Esta MI SAT demonstrou, portanto, um comportamento semelhante à máquina de histerese, i.e., com características comportamentais típicas da máquina assíncrona e da máquina síncrona.

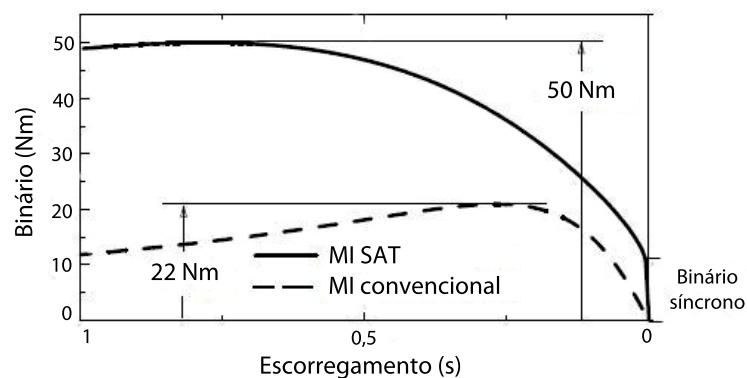


Figura 2.23: Comparação entre as curvas de binário-velocidade da MI SAT e da MI convencional.

2.4 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado o estado da arte das máquinas eléctricas rotativas que empregam materiais supercondutores de alta temperatura (SAT), dando foco especial à máquina síncrona. Foram demonstrados uma série de programas de I&D de máquinas eléctricas SAT, desde protótipos de pequenas dimensões, na gama dos poucos kW, até motores de propulsão com várias dezenas de MW. Foram ainda abordados alguns projectos que utilizam fita 2G na excitação de campo que, de momento, se resumem a máquinas de potência moderada. Além do tipo de fita, foram também exploradas diversas configurações da máquina síncrona: desde a convencional, de fluxo radial e excitação de campo rotativa, à máquina em disco, de fluxo axial.

Ficou demonstrado que as vantagens da utilização de materiais SAT nas máquinas eléctricas rotativas estão relacionadas principalmente com o aumento da densidade de potência da máquina. Isto deve-se à capacidade que os materiais SAT apresentam em transportar maiores densidades de corrente que os materiais convencionais, que resultam na produção de campos magnéticos mais intensos no seu interior. Estes campos magnéticos mais intensos permitem a exploração de projectos alternativos para as máquinas eléctricas, que as tornam mais leves e compactas. Este facto é observável principalmente em máquinas de grande potência, como é o caso dos projectos Siemens e projectos da AmSC. Outras das vantagens obtidas relativamente às máquinas convencionais, para além da diminuição de massa e de volume, são: o aumento do rendimento; maior rigidez face a transitórios; maior capacidade de operação em sobrecarga; maior qualidade energética; e uma operação mais silenciosa.

Apesar destas máquinas terem apresentado diversas vantagens face às máquinas convencionais, a sua viabilidade comercial ainda se encontra por provar. Uma das tecnologias candidatas a tornar estas máquinas viáveis - e até comercialmente atractivas - é a tecnologia da fita 2G. A fita 2G, apesar de já ser produzida em grandes quantidades e com excelente desempenho, tem um custo específico bastante elevado e ainda se encontra por demonstrar a sua aplicação em máquinas de grande escala. Contudo, é esperado que o custo específico desta fita baixe, pela optimização dos processos industriais de produção, o que pode levar à viabilidade comercial das máquinas eléctricas SAT (Li et al., 2009). Outra das tecnologias, que não foi abordada por só muito recentemente ter começado a ser comercializada sob a forma de fita, é o diboreto de magnésio (MgB_2). O MgB_2 é um material com uma temperatura crítica relativamente elevada para um composto binário (~ 40 K), de produção relativamente barata e em grandes comprimentos, características que tornam interessante a sua aplicação em máquinas eléctricas e um dos candidatos à viabilização das máquinas eléctricas supercondutoras (Buzza and Yamashita, 2001).

3

Gerador Síncrono SAT

Conteúdo

3.1	Princípios Electromagnéticos	38
3.1.1	Leis de Maxwell	39
3.1.2	Lei de Faraday e Lei de Ampère	39
3.1.3	Relação entre \vec{E} , \vec{B} , \vec{H} e \vec{J}	40
3.2	Supercondutividade de Alta Temperatura	41
3.2.1	Enquadramento Histórico	42
3.2.2	Propriedades Macroscópicas da Supercondutividade	43
3.2.3	Aplicação de Materiais SAT a Accionamentos de Potência	46
3.3	Máquina Síncrona Supercondutora Clássica	47
3.3.1	Constituição da Máquina Síncrona Supercondutora Clássica	48
3.3.2	Estator da Máquina Supercondutora Clássica	48
3.3.3	Rotor da Máquina Supercondutora Clássica	49
3.3.4	Sistema de Refrigeração	53
3.3.5	Sistema de Excitação de Campo ou Excitatriz	55
3.3.6	Conclusões	56

3.1 Princípios Electromagnéticos

As leis de Maxwell são muito importantes ao entendimento do fenómeno electromagnético e as equações de campo que descrevem o electromagnetismo podem ser escritas sob um único conjunto de equações. As grandezas básicas do electromagnetismo são (Pyrhönen et al., 2008):

Símbolo	Grandeza	Unidade
\vec{E}	Campo eléctrico	[V/m]
\vec{H}	Campo magnético	[A/m]
\vec{D}	Densidade de fluxo eléctrico	[C/m ²]
\vec{B}	Densidade de fluxo magnético	[T]
\vec{J}	Densidade de corrente	[A/m ²]
ρ	Densidade de carga eléctrica	[C/m ³]

A presença de um campo eléctrico \vec{E} ou de um campo magnético \vec{H} pode ser analisada a partir da força exercida pelo campo em questão num objecto carregado electricamente ou num condutor que transporte corrente. Esta força pode ser calculada pela *força de Lorentz*, a força experienciada por uma carga infinitesimal dQ que se move à velocidade \vec{v} (figura 3.1). Esta força é dada pela equação vectorial:

$$d\vec{F} = dQ(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \Leftrightarrow \tag{3.1}$$

$$d\vec{F} = dQ\vec{E} + \frac{dQ}{dt}d\vec{l} \times \vec{B} \Leftrightarrow \tag{3.2}$$

$$d\vec{F} = dQ\vec{E} + id\vec{l} \times \vec{B}. \tag{3.3}$$

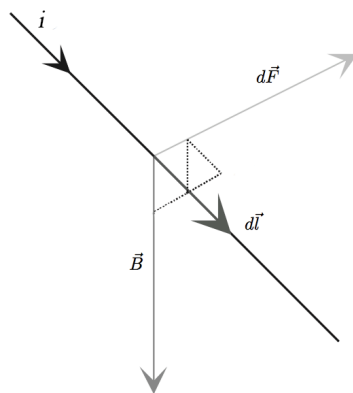


Figura 3.1: Força de Lorentz $d\vec{F}$ que actua num fio condutor de comprimento $d\vec{l}$, a transportar uma corrente eléctrica i inserido campo de indução magnética \vec{B} . Adaptado de (Pyrhönen et al., 2008).

3.1.1 Leis de Maxwell

As leis seguintes ficaram conhecidas por *leis de Maxwell*, por ter sido este o primeiro a apresentá-las na sua forma completa. São consideradas as leis fundamentais da electrotecnia teórica, a partir das quais são deduzíveis as restantes leis:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\delta \vec{B}}{\delta t}, \quad (3.4) \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t}, \quad (3.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (3.6) \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (3.7)$$

A equação 3.4 é conhecida como *lei da indução de Faraday*, que descreve como um fluxo magnético variante no tempo cria um campo eléctrico em torno dele. A equação 3.5 é conhecida como a *lei de Ampère*. Descreve como uma corrente eléctrica e um fluxo eléctrico variante no tempo produzem um campo magnético em torno de si. A partir desta equação pode-se obter a *lei da conservação da carga* (equação 3.8):

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\delta \rho}{\delta t}. \quad (3.8)$$

A equação 3.6 é conhecida como a *lei de Gauss para campos eléctricos*, que expressa matematicamente o sentido fluxo eléctrico, que flui sempre da carga positiva para a negativa. A equação 3.7 é conhecida como a *lei de Gauss para campos magnéticos*. Ao contrário das linhas de fluxo eléctrico, as linhas de fluxo magnético são fechadas, não possuindo início nem fim (Pyrhönen et al., 2008).

3.1.2 Lei de Faraday e Lei de Ampère

A lei de Faraday, em conjunto com a lei de Ampère, são extremamente importantes na construção de maquinaria eléctrica. A lei de Faraday, ilustrada na figura 3.2, é utilizada, por exemplo, para determinar as tensões induzidas nos enrolamentos de uma máquina eléctrica. Esta lei, na sua forma integral, é dada por:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.9)$$

A superfície S , delimitada pelo caminho fechado l , quando atravessada por um fluxo magnético Φ variante no tempo com uma densidade \vec{B} , cria um campo eléctrico \vec{E} . Se for colocado um fio condutor com N espiras curto-circuitado em torno do fluxo, pela integração do campo eléctrico \vec{E} ao longo do caminho fechado ($\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$), obtém-se uma corrente eléctrica nesse condutor.

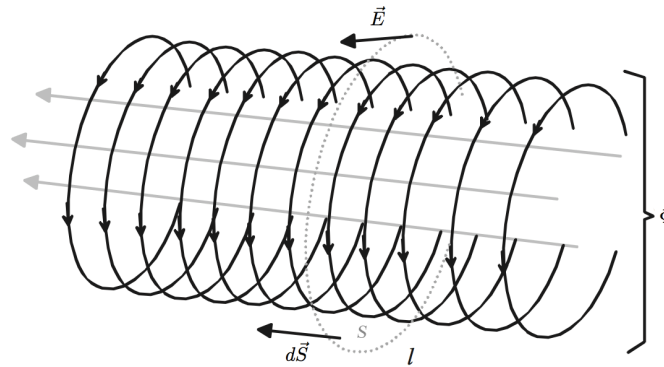


Figura 3.2: Ilustração da lei da indução de Faraday. A linha l delimita a superfície S de uma das N espiras atravessadas pelo fluxo magnético Φ , sendo $d\vec{S}$ o vector normal a esta. Adaptado de (Pyrhönen et al., 2008).

A lei de Ampère (ilustrada na figura 3.3) é dada, na sua forma integral, por:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = i(t) + \frac{d\psi_e}{dt}. \quad (3.10)$$

O termo $\frac{d\psi_e}{dt}$ da equação 3.10 trata-se de uma corrente de deslocamento, conhecida por *corrente de deslocamento de Maxwell*⁶. Esta liga o fenómeno electromagnético como um todo, tendo sido o contributo histórico de Maxwell para a teoria do electromagnetismo e que permite explicar a propagação de ondas electromagnéticas no vazio. A lei de Ampère é muitas vezes escrita na forma *estática*, ou *quase-estática*⁷:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = \sum i(t). \quad (3.11)$$

O termo "quase-estática" indica que a frequência f do fenómeno em questão é baixa o suficiente para que a corrente de deslocamento de Maxwell possa ser desprezada. Os fenómenos ocorrentes em electrotecnia aproximam-se muito desta situação, uma vez que na prática estas correntes de deslocamento surgem somente a frequências mais elevadas, como nas gamas de radiofrequência ou em condensadores construídos deliberadamente para tirar partido destas correntes (Pyrhönen et al., 2008).

3.1.3 Relação entre \vec{E} , \vec{B} , \vec{H} e \vec{J}

As grandezas vectoriais \vec{E} , \vec{B} , \vec{H} e \vec{J} são ainda relacionáveis através de algumas grandezas escalares, sendo elas a *permissividade eléctrica* ϵ , a *permeabilidade magnética* μ e a *condutivi-*

⁶Do termo inglês *Maxwell's displacement current*

⁷Do termo inglês *quasi-static*

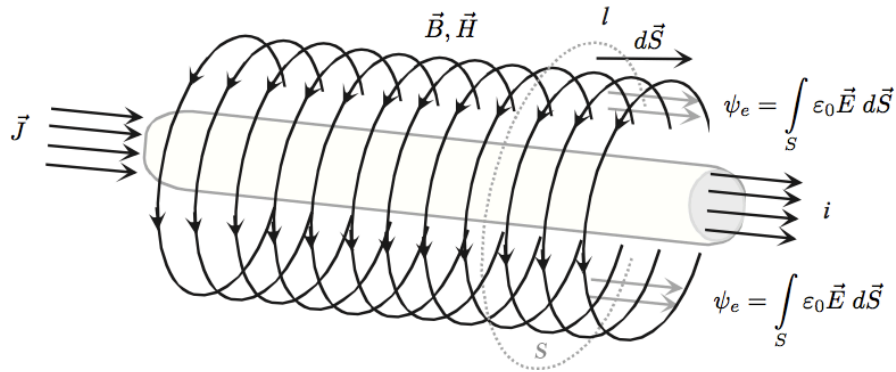


Figura 3.3: Ilustração da lei de Ampère aplicada a um condutor que transporta a corrente i . A linha l delimita a superfície S , sendo o vector $d\vec{S}$ normal a esta. Adaptado de (Pyrhönen et al., 2008).

dade eléctrica σ . Em meios lineares, homogêneos e isotrópicos (LHI), utilizam-se as seguintes equações para descrever os materiais utilizados em electrotecnia:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \tag{3.12}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \tag{3.13}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \tag{3.14}$$

Estas grandezas descritivas do meio nem sempre são simples constantes. Por exemplo, a permeabilidade magnética μ de materiais ferromagnéticos é não-linear. No vácuo, os valores da permitividade eléctrica ϵ_0 e da permeabilidade magnética μ_0 são respectivamente:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi} \times 10^{-9} \text{ F.m}^{-1}, \tag{3.15}$$

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}. \tag{3.16}$$

3.2 Supercondutividade de Alta Temperatura

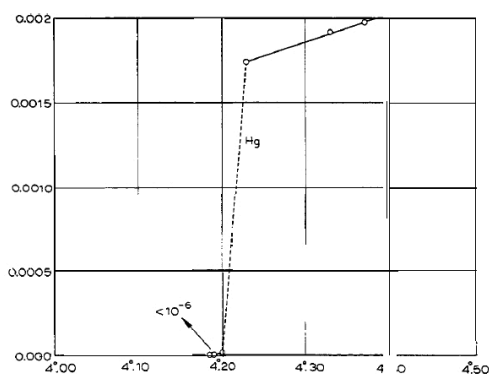
Nesta secção faz-se um breve enquadramento relativamente à supercondutividade, dando um foco especial à supercondutividade de alta temperatura. Inicialmente é abordada a história da supercondutividade, descrevendo sucintamente as descobertas consideradas mais significativas; apresentam-se as características macroscópicas que os materiais SAT apresentam e que são mais interessantes à área da energia; e abordam-se as possíveis aplicações - e mais atractivas - à aplicação deste tipo de materiais em equipamentos eléctricos.

3.2.1 Enquadramento Histórico

O fenómeno da supercondutividade foi inicialmente descrito por Heike Kamerlingh Onnes (figura 3.4(a)) em Leiden, Holanda, que, ao estudar as propriedades eléctricas de tubos capilares de mercúrio a baixas temperaturas, observou que a resistência eléctrica do material desaparecia abruptamente quando a temperatura descia abaixo dos 4,2 K (ver figura 3.4(b)). Este novo estado da matéria ficou conhecido por *estado superconductor* e a temperatura a que o material entrava neste estado ficou conhecida por *temperatura crítica* (T_c). Esta descoberta só foi possível devido ao estudo que Kamerlingh Onnes realizou sobre métodos de refrigeração e que levaram a que este fosse o primeiro a liquefazer o hélio, que utilizou posteriormente para arrefecer o hélio até à sua temperatura crítica. A investigação das propriedades da matéria a baixas temperaturas valeu a Onnes o prémio Nobel em 1913, refutando aquelas que eram as principais teorias da altura relativamente à resistividade eléctrica dos materiais a baixas temperaturas (Pina, 2010).



(a) Heike Kamerlingh Onnes. Fonte: Nobelprize.org



(b) Medições efectuadas por Kamerlingh Onnes. Nas ordenadas está a resistência dos fios capilares de mercúrio (Hg) e nas abscissas está a temperatura, em graus Kelvin. Retirado de (Pina, 2010).

Figura 3.4: Heike Kamerlingh Onnes (21 de Setembro de 1853 - 21 de Fevereiro de 1926). Físico Holandês e prémio Nobel, que descobriu o estado de supercondutividade em 1911.

Em 1986, Johannes Georg Bednorz e Karl Alex Müller, da empresa IBM, publicaram resultados de uma pesquisa que indicavam a existência de supercondutividade acima dos 30 K. Este trabalho valeu-lhes o prémio Nobel em 1987 e estes materiais ficaram designados, na altura, como materiais supercondutores de alta temperatura (SAT). No mesmo ano, os investigadores M.K. Wu, da Universidade do Alabama, EUA, e C.W. Chu, da Universidade de Houston, EUA, produziram os primeiros supercondutores cerâmicos com temperaturas críticas acima da temperatura do azoto líquido ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, na figura 3.5).

A descoberta de materiais supercondutores com temperaturas críticas acima da temperatura de liquefação do azoto líquido tratou-se de um passo muito importante, uma vez que esta gama de temperaturas é alcançável mais fácil, económica e eficientemente que a do hélio líquido - os sistemas criogénicos são até 40 vezes mais eficientes nesta gama de temperaturas, quando comparados com a gama do hélio líquido (Gieras, 2009). Na figura 3.5 pode ver-se a evolução cronológica das temperaturas críticas máximas conhecidas dos materiais supercondutores (Gieras, 2009). Todos os materiais supercondutores descobertos anteriormente a 1986 ficaram então designados por materiais supercondutores de baixa temperatura (SBT).

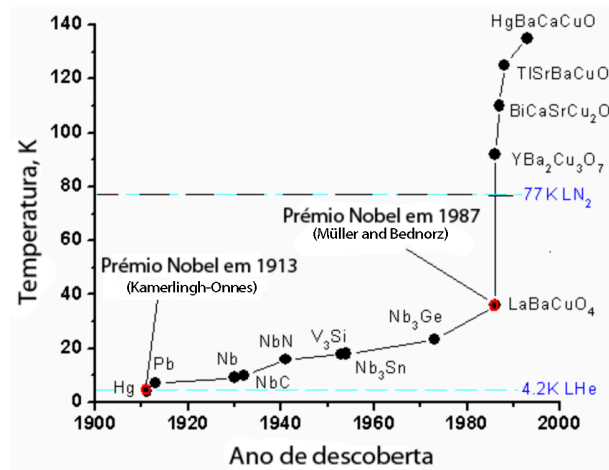


Figura 3.5: Evolução cronológica da temperatura crítica máxima dos materiais supercondutores. Adaptado de (Gieras, 2009)

A principal razão que levou ao abandono dos projectos de aplicação prática da tecnologia SBT foram as temperaturas críticas muito baixas destes materiais, que requeriam sistemas de criorefrigeração muito complexos e dispendiosos. Contudo, a tecnologia SBT ainda é utilizada hoje em dia nalgumas áreas onde são necessários campos magnéticos muito intensos, como nos sistemas de ressonância magnética - *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) -, nos magnetos para aplicação em aceleradores de partículas e em reactores de fusão nuclear (Kalsi, 2011).

3.2.2 Propriedades Macroscópicas da Supercondutividade

3.2.2.1 Resistividade Perfeita

Ainda em 1911, Onnes observou também que o estado supercondutor não dependia somente da temperatura. Onnes apurou que o estado supercondutor dependia também da densidade de corrente que atravessava o material, existindo um valor máximo também para esta sem que o material passasse ao *estado normal*, ou *resistivo*. Este valor de densidade de corrente ficou denominado por *densidade de corrente crítica* (J_c).

3. Gerador Síncrono SAT

Analogamente aos valores máximos de temperatura (T_c) e de densidade de corrente (J_c) existe também um valor de campo magnético máximo a que o material pode ser sujeito, denominado de *campo magnético crítico* (H_c). O estado da supercondutividade é definido, por isso, pelos seguintes parâmetros principais:

- Temperatura crítica, T_c ;
- Campo magnético crítico, H_c ;
- Densidade de corrente crítica, J_c .

A relação entre a T_c , o H_c e a J_c pode ser representada tridimensionalmente pelo diagrama de fase $T_c - H_c - J_c$, ou espaço de fases (ver figura 3.6). O diagrama de fase representa a superfície crítica do material, ou seja, no interior desta superfície o material encontra-se no estado supercondutor, no exterior encontra-se no estado normal, ou resistivo.

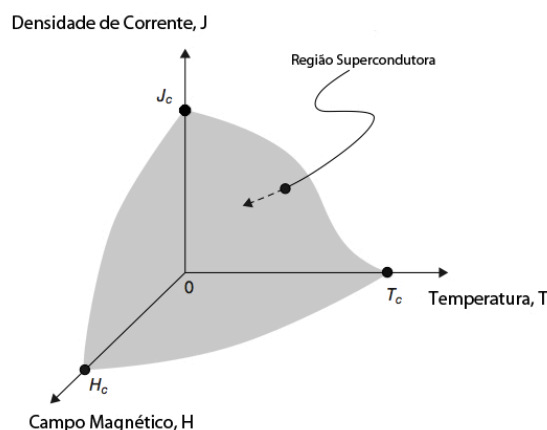


Figura 3.6: Diagrama $T_c - H_c - J_c$. Adaptado de (Kalsi, 2011).

3.2.2.2 Efeito Meissner e Comparação com o Condutor Perfeito

Além da capacidade de transporte de elevadas densidades de corrente com resistividade elétrica praticamente nula, os materiais supercondutores apresentam ainda uma outra característica, conhecida como efeito de Meissner, ou efeito de Meissner-Ochsenfeld. O efeito de Meissner, inicialmente descrito por Walter Meissner e Robert Ochsenfeld, em 1933, corresponde à expulsão total de fluxo magnético do interior do material supercondutor, que é conseguida à custa do surgimento de correntes superficiais persistentes no material. Esta propriedade magnética é conhecida por *diamagnetismo perfeito*.

No interior de um material, a densidade de fluxo magnético \vec{B} (ou campo de indução magnética) é dada por:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}), \quad (3.17)$$

verificando-se o efeito de Meissner, ou seja, a expulsão total de fluxo magnético do interior do material ($\vec{B} = 0$), vem que:

$$\vec{M} = -\vec{H}, \quad (3.18)$$

ou seja, num material supercondutor no estado Meissner, a magnetização \vec{M} do material tem módulo igual e sentido oposto ao do campo magnético \vec{H} aplicado. No caso linear, a magnetização \vec{M} é dada por $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$. Resulta daqui que:

$$\chi_m = -1, \quad (3.19)$$

em que χ_m é a susceptibilidade magnética do material, uma medida da resposta intrínseca do material à acção de um campo magnético \vec{H} aplicado.

O efeito de Meissner é, por isso, uma característica impeditiva do resumo do estado supercondutor a simplesmente um estado de resistividade nula, ou condutividade perfeita. Admitindo a existência de um condutor perfeito, então tal material conservará o fluxo magnético no qual está imerso, enquanto que um supercondutor expelerá o fluxo magnético do seu interior (comportamento diamagnético). Na figura 3.7 faz-se uma comparação entre comportamento do supercondutor e do condutor perfeito, arrefecidos na presença e na ausência de campo magnético aplicado.

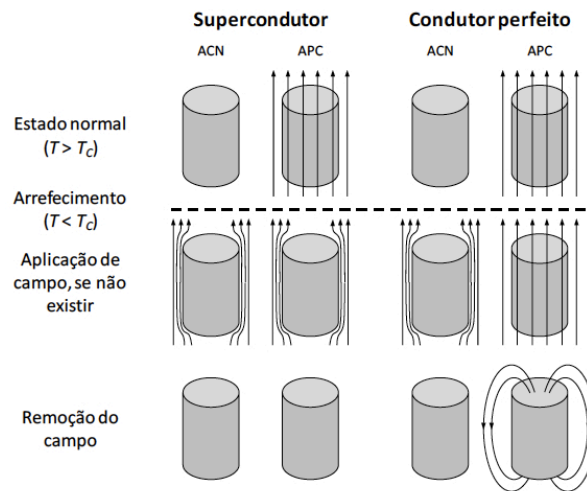


Figura 3.7: Comparação entre o comportamento de um supercondutor e de um condutor perfeito quando arrefecidos na presença de campo (APC) e arrefecidos na presença de campo nulo (ACN). Retirado de (Pina, 2010).

3.2.2.3 Supercondutores tipo I e II

Nos *supercondutores tipo I* a supercondutividade é completamente suprimida⁸ quando o material é exposto a um campo magnético superior a H_c (figura 3.8(a)). Os *supercondutores tipo II*, por sua vez, apresentam dois valores de campo crítico: o primeiro, de baixa intensidade, denominado campo crítico inferior (H_{C1}) suprime parcialmente a supercondutividade; o segundo, campo crítico superior (H_{C2}), é o valor para o qual a supercondutividade é totalmente suprimida (figura 3.8(b)). O campo crítico superior H_{C2} tende a ser duas ordens de grandeza superior ao campo crítico inferior H_{C1} (Gieras, 2009).

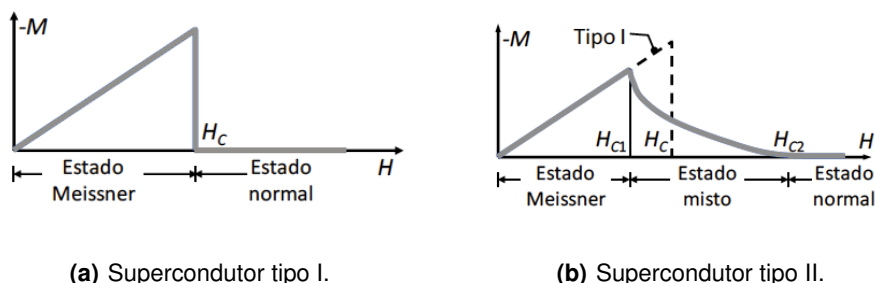


Figura 3.8: Curvas de magnetização típicas dos supercondutores tipo I e tipo II. Adaptado de (Pina, 2010).

A diferença fundamental entre os supercondutores do tipo I e do tipo II reside no facto dos segundos permitirem a penetração de fluxo no seu interior, introduzindo um novo estado que se situa entre o estado Meissner e o estado normal, denominado *estado misto*. Na figura 3.8(b) pode ver-se uma curva típica de um supercondutor do tipo I (a tracejado) sobre a curva do supercondutor do tipo II.

3.2.3 Aplicação de Materiais SAT a Accionamentos de Potência

As perdas com o transporte e distribuição de energia em Portugal correspondem a 9,05% da energia total produzida (dados da NationMaster, 2004). Estas perdas são bastante significativas e têm um impacto negativo sobre o clima e recursos naturais. Os materiais supercondutores de alta temperatura surgem como uma possível solução para este problema, podendo ser aplicados a uma variedade de equipamento eléctrico, melhorando significativamente o seu rendimento e fiabilidade. Neste âmbito, a melhoria de rendimento nas áreas da produção e transporte de energia é alcançável, sobretudo, por via da aplicação de materiais supercondutores a grandes geradores e motores eléctricos, transformadores e cabos de transmissão. O aumento da fiabilidade e protecção da rede pode estar relacionado, por exemplo, com a aplicação de materiais

⁸Do termo inglês *quenched*, um aquecimento resistivo do supercondutor que provoca um aumento brusco da temperatura, que leva a que o material saia do estado supercondutor.

supercondutores a sistemas de armazenamento de energia magnética - *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) - e limitadores de corrente de curto-circuito - *Fault Current Limiters* (FCLs) (Luiz, 2011). Além da redução das perdas e do aumento da fiabilidade, a utilização de materiais supercondutores em accionamentos de potência reduz o peso e tamanho destes, tornando-os interessantes também à aplicação em navios, aeronaves, comboios ou, como é caso de estudo desta tese, geração eólica (Kalsi, 2011).

Nas décadas de 60 e 70 foram depositadas grandes esperanças na aplicação da tecnologia supercondutora a grandes motores e geradores eléctricos, tendo sido iniciados uma série de programas de investigação e desenvolvimento deste tipo de máquinas. Na altura, o desenvolvimento da energia nuclear fez com que se atingissem os limites de tamanho físico destes geradores, e a tecnologia supercondutora foi reconhecida como uma oportunidade para aumentar as densidades de potência destas máquinas. De uma forma geral, os benefícios adicionais que foram obtidos estavam relacionados com a melhoria do rendimento, aumento da capacidade de fornecimento de potência reactiva e o facto de apresentarem uma reactância síncrona reduzida, que tem um impacto positivo na estabilidade dos sistemas de potência. Entre 1970 e 1990 foram demonstrados uma série de geradores que utilizavam a tecnologia NbTi⁹ (exemplo consultável em Keim et al., 1985, Fealey et al., 1985). Contudo, estes geradores não foram considerados economicamente atractivos devido à complexidade dos sistemas de refrigeração criogénicos e à pobre estabilidade dos enrolamentos SBT (Kalsi, 2011).

Um dos pré-requisitos para a aplicação em larga escala da tecnologia SAT é o desenvolvimento dos processos de produção de fita, assim dos sistemas de refrigeração criogénicos, de forma a reduzir os custos e aumentar o desempenho dos materiais SAT. O foco da indústria tem sido principalmente nos materiais BSCCO-2212, BSCCO-2223, YBCO-123 e MgB₂, considerados pela indústria eléctrica os mais promissores em termos de desempenho e menor custo operacional.

3.3 Máquina Síncrona Supercondutora Clássica

Os dois tipos de máquinas eléctricas rotativas mais populares são a máquina síncrona (MS) e a máquina de indução (MI), sendo as MI mais populares entre as gamas de baixa potência (< 500 hp¹⁰) e as MS nas gamas de potência mais elevada (Kalsi, 2011). As máquinas rotativas tradicionais empregam enrolamentos de cobre no rotor e no estator, que apresentam perdas resistivas no transporte de corrente. A minimização destas perdas é algo que é bastante desejável, principalmente em máquinas de grandes dimensões. Os materiais supercondutores possibilitam o transporte de corrente eléctrica em regime contínuo - *direct current* (DC) - praticamente sem

⁹Liga de Níobio-titânio, um SBT tipo II.

¹⁰1 hp corresponde a 0,75 kW.

3. Gerador Síncrono SAT

perdas e com perdas bastante baixas em regime alternado - *alternating current (AC)* -, surgindo como candidatos à melhoria do rendimento destas máquinas. Além disso, este tipo de materiais produzem campos magnéticos mais intensos, possibilitando o aumento da densidade de potência das máquinas eléctricas, o que conduz à diminuição do seu volume e peso.

Nesta secção procede-se à demonstração da topologia clássica da MS com aplicação de materiais supercondutores. É abordada a constituição da máquina, fazendo-se uma breve explicação dos vários componentes que a integram.

3.3.1 Constituição da Máquina Síncrona Supercondutora Clássica

Os enrolamentos de excitação de campo da MS, geralmente colocados no rotor, funcionam em regime DC. Tendo em conta que na MI, os enrolamentos tanto do estator, como do rotor, funcionam em regime AC, a MS é melhor candidata à aplicação de materiais supercondutores que a MI. Na abordagem clássica à máquina síncrona supercondutora os enrolamentos de excitação de campo são substituídos por materiais supercondutores, tirando proveito das perdas virtualmente nulas de transporte de corrente em regime DC e das maiores densidades de campo geradas pelos materiais supercondutores. De notar que, apesar da configuração mais comum neste tipo de máquinas ser a da colocação dos enrolamentos AC no estator e dos enrolamentos DC no rotor, a localização dos dois tipos de enrolamentos pode ser trocada entre si (exemplo de um motor com esta configuração descrito na subsecção 2.3.2.1 - Motor Síncrono de 15 kW).

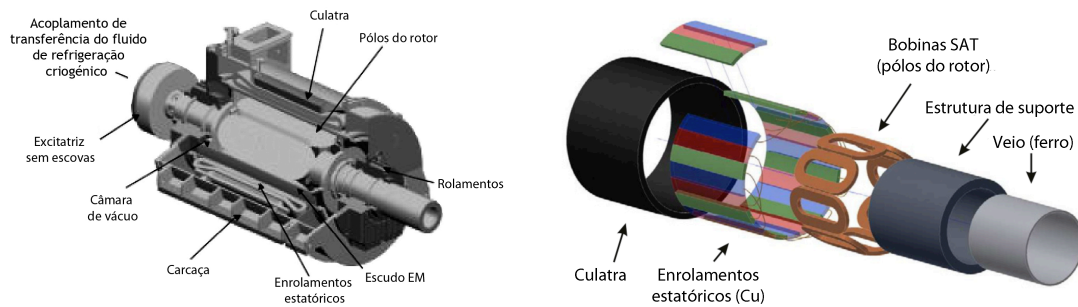
No estator não existem dentes ferromagnéticos de suporte dos enrolamentos e os enrolamentos de excitação SAT encontram-se montados numa estrutura também não-magnética. Estes motores têm, por isso, uma construção dita *air-core*, que permite aumentar a densidade de fluxo magnético no entreferro, sem que ocorra a saturação ou aumento das perdas no ferro.

Na figura 3.9(a) pode ver-se o esquemático da *máquina síncrona supercondutora clássica* e na figura 3.9(b) uma vista explodida e simplificada da parte activa da máquina.

3.3.2 Estator da Máquina Supercondutora Clássica

O estator da máquina síncrona supercondutora está sujeito a campos magnéticos elevados que, em caso normal, saturariam os dentes ferromagnéticos de suporte dos enrolamentos. Por esta razão, os dentes ferromagnéticos são normalmente excluídos. A substituição dos dentes ferromagnéticos por material não-magnético e não-condutor, permite aumentar consideravelmente a densidade de fluxo magnético no interior da máquina, sendo possível a construção de máquinas

3.3 Máquina Síncrona Supercondutora Clássica

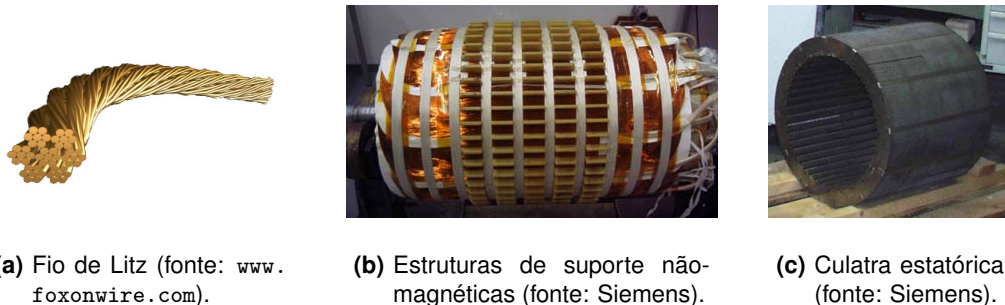


(a) Esquemático da máquina AmSC (fonte: AmSC). Adaptado de (Eckels and Snitchler, 2004).

(b) Vista explodida da máquina síncrona supercondutora clássica. Adaptado de (Lesser and Müller, 2009).

Figura 3.9: Esquemáticos da máquina síncrona com enrolamentos de campo supercondutores clássica.

com densidades de campo magnético no entreferro entre 1 e 2 T (Kalsi, 2011). Na figura 3.10(b) pode ver-se o tipo de estruturas utilizadas para suporte dos enrolamentos e, na figura 3.10(c) a culatra ferromagnética sem dentes. Os enrolamentos são compostos por cabo de Litz¹¹, para reduzir as perdas por correntes de Foucault (figura 3.10(a)).



(a) Fio de Litz (fonte: www.foxonwire.com).

(b) Estruturas de suporte não-magnéticas (fonte: Siemens).

(c) Culatra estática (fonte: Siemens).

Figura 3.10: Pormenores do estator de uma máquina síncrona supercondutora clássica.

Sem dentes ferromagnéticos na região dos enrolamentos, o suporte e arrefecimento dos enrolamentos estatóricos requer atenção especial. A força electromotriz (E) induzida nos enrolamentos estatóricos é uma onda sinusoidal quase perfeita, e as componentes harmónicas são bastante menores que aquelas que são observadas em máquinas convencionais.

3.3.3 Rotor da Máquina Supercondutora Clássica

Os enrolamentos supercondutores, normalmente instalados no rotor, têm de ser adequadamente arrefecidos e estabilizados térmica e mecanicamente. Além disso, estes enrolamentos têm de

¹¹Cabo composto por múltiplos fios de cobre de pequeno diâmetro, electricamente isolados e, geralmente, entrançados.

3. Gerador Síncrono SAT

ser protegidos de qualquer campo harmónico criado no estator. Na configuração clássica, o núcleo do rotor da máquina supercondutora é feito de um material não magnético. Contudo, existem abordagens alternativas que utilizam núcleos de ferro, que reduzem bastante a quantidade de material supercondutor necessário (Klaus et al., 2007). As máquinas supercondutoras com rotores de núcleo ferromagnético são ainda classificáveis quanto ao tipo de arrefecimento, i.e., de núcleo frio ou núcleo quente. Ambas as configurações podem ser vistas na figura 3.11.

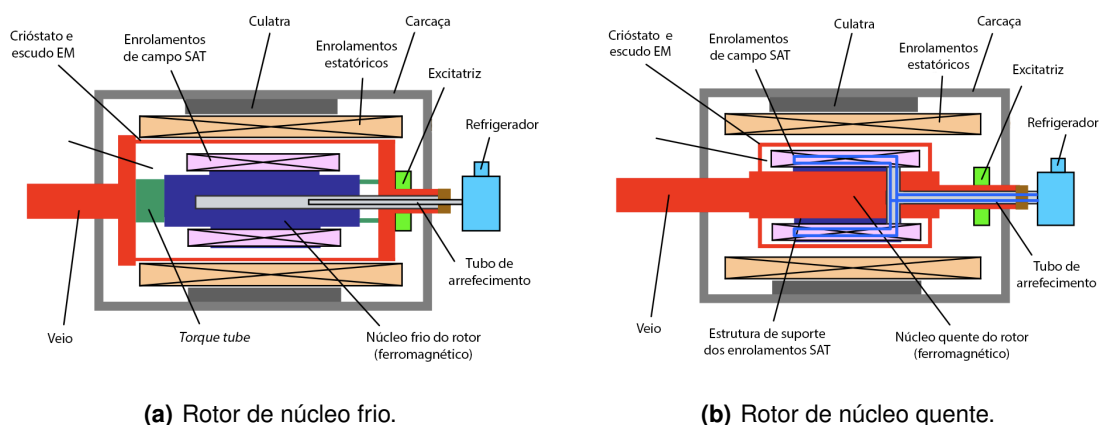


Figura 3.11: Esquemáticos da máquina síncrona supercondutora com núcleo ferromagnético. Adaptado de (Klaus et al., 2007).

Nos rotores de núcleo quente, somente as bobinas SAT são arrefecidas. Estes possuem períodos de arrefecimento muito menores que os rotores de núcleo frio, onde todo o núcleo do rotor é arrefecido. Contudo, um rotor de núcleo quente necessita de uma estrutura de suporte das bobinas SAT mais complexa, com tubos de arrefecimento para circulação do fluido criogénico de arrefecimento que vão até às bobinas supercondutoras. Na configuração de núcleo frio, as bobinas, assim como todo o núcleo, são arrefecidas por condução a partir no veio oco da máquina, onde circula o fluido criogénico. Não são utilizados rotores de núcleo frio em máquinas de grande escala, devido à grande quantidade de tempo necessário para arrefecer toda a massa do núcleo até à temperatura criogénica de operação. Nos pontos seguintes faz-se uma breve explicação dos vários componentes que constituem o rotor da máquina síncrona supercondutora clássica.

3.3.3.1 Bobinas Supercondutoras de Excitação de Campo

Existem diversas abordagens para a construção de enrolamentos de excitação de campo supercondutores. As mais comuns são: (Kalsi, 2011)

- Enrolar fita supercondutora directamente em torno de um pólo saliente;
- Enrolar separadamente uma série de bobinas *racetrack* e montá-las posteriormente sob a forma de um pólo. Exemplo da construção destas bobinas e de um pólo finalizado respectivamente nas figuras 2.2(a) e 2.2(b). As bobinas supercondutoras podem ser instaladas em

pólos de material magnético ou não.

- Enrolar material supercondutor directamente em cavas no rotor, de forma semelhante ao rotor de uma máquina convencional.

Em quase todas estas abordagens os enrolamentos são impregnados com resina *epoxy*, para criar uma estrutura monolítica capaz de suportar as forças que actuam sobre estes e facilitar o arrefecimento do material supercondutor.

Tem de ser dada especial atenção a situações que provoquem excursões do campo magnético, temperatura ou corrente do supercondutor, que podem levar a que este passe ao estado normal. Estas variações têm de ser consideradas aquando do projecto da máquina e têm de ser dadas margens de segurança suficientes, para que estes valores não atinjam os valores críticos do material supercondutor. Estas excursões dos parâmetros dos supercondutores devem-se normalmente a transitórios causados por falhas na rede.

3.3.3.2 Escudo Electromagnético

Em regime permanente, o rotor de uma máquina síncrona supercondutora roda em sincronismo com o campo girante criado pelas correntes polifásicas do estator, e os enrolamentos rotóricos supercondutores experienciam somente campos magnéticos DC. Contudo, sob carga ou transitórios da alimentação da máquina, o rotor pode experienciar campos harmónicos AC. Normalmente é empregue um escudo electromagnético na zona quente do rotor (superfície exterior do crióstato), colocado entre as bobinas SAT e os enrolamentos estatóricos, que faz a blindagem das bobinas SAT relativamente aos campos AC do estator. Estes campos podem ter origem não só em fontes externas (e.g. harmónicas temporais da rede ou de um variador de velocidade), como também em correntes não-balanceadas e harmónicas espaciais causadas pelos enrolamentos estatóricos.

O escudo é composto por um material de elevada condutividade, normalmente alumínio ou cobre. Adicionalmente, também pode ser colocado um escudo EM na zona fria do rotor, na superfície interna do crióstato. Estes campos variantes no tempo induzem forças electromotrizes nos escudos EM, cuja função é amortecer as correntes alternadas que se geram, protegendo os enrolamentos supercondutores. O escudo EM deve ser capaz de atenuar os campos AC o suficiente para que a carga térmica na zona fria do rotor seja minimizada.

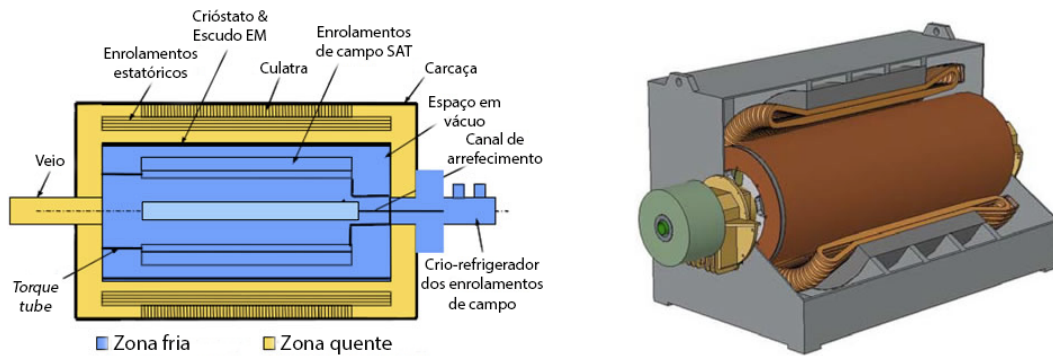
Nos últimos anos tem-se optado pela utilização de escudos compósitos em máquinas de grandes dimensões, que possuem maior capacidade de suportar os binários gerados em situações

3. Gerador Síncrono SAT

de falha que os escudos convencionais. Um escudo composto tem uma camada exterior de um metal de elevada condutividade, semelhante aos escudos convencionais, suportada por um cilindro em aço, que providencia o suporte mecânico necessário em situação de falha. A espessura da camada de material de elevada condutividade é otimizada de forma a providenciar a atenuação adequada dos campos AC e das oscilações em torno do ponto de sincronismo (Kalsi, 2011).

3.3.3.3 Crióstato

O ambiente criogénico dos enrolamentos supercondutores tem de ser protegido do calor que é transmitido por condução e radiação da zona quente da máquina. As perdas térmicas a temperaturas criogénicas são bastante difíceis de extrair e, se forem demasiado elevadas, podem mesmo inviabilizar o conceito da máquina supercondutora. O crióstato encontra-se montado entre a zona fria da máquina - enrolamentos supercondutores e sua estrutura de suporte - e a zona quente - escudo EM e estator. Na figura 3.15 podem ver-se esquemáticos da configuração típica dos vários componentes que integram a máquina síncrona supercondutora clássica, onde se pode ver com maior pormenor a localização do crióstato no interior da máquina. De notar que o escudo EM assenta directamente na superfície exterior do crióstato.



(a) Esquemático da máquina supercondutora clássica (corte longitudinal) com indicação das zonas quentes e frias.

(b) Esquemático tridimensional da máquina supercondutora.

Figura 3.12: Esquemáticos da máquina síncrona com enrolamentos de campo supercondutores clássica. Adaptado de (Luiz, 2011).

Tanto a zona quente do crióstato, como a zona fria, estão mecanicamente ligadas ao veio da máquina. A zona quente está ligada directamente, enquanto que a zona fria está ligada por intermédio de um *torque tube*, que limita a transmissão de calor por condução proveniente da zona à temperatura ambiente. O espaço entre a parede fria e a parede quente do crióstato é normalmente preenchida com um isolamento multi-camada, para minimização da radiação térmica das superfícies quentes para as frias (Kalsi, 2011). Em alguns casos é utilizado um escudo EM inter-

médio, na zona fria do rotor, para interceptar quaisquer cargas térmicas causadas por campos harmónicos do estator. Contudo, para o caso da tecnologia SAT, este escudo não é normalmente utilizado, uma vez que tem um impacto muito reduzido na carga térmica total.

3.3.3.4 Tubo de Transmissão de Binário ou *Torque tube*

No caso da máquina síncrona supercondutora clássica é necessário dar atenção especial à estrutura de suporte dos enrolamentos supercondutores e à forma como o binário da máquina é extraído do seu interior, a temperatura criogénica, para o exterior, à temperatura ambiente. A funcionar em condições de regime permanente, os enrolamentos supercondutores do rotor estão sujeitos à actuação de binários, forças centrífugas e forças magnéticas bastante elevadas. O rotor tem, por isso, de ser capaz de transmitir elevado binário para o exterior da máquina (à temperatura ambiente), ao mesmo tempo que limita a condução térmica de calor para o seu interior (a temperatura criogénica). Além disso, as diferentes contracções existentes entre a zona fria e a zona quente têm de ser consideradas e acomodadas. A título de exemplo, em (Winn, 2008) pode ver-se uma patente de um *torque tube* inventado por Peter M. Winn, onde se pode ver em maior pormenor a constituição deste componente.

3.3.4 Sistema de Refrigeração

Todos os supercondutores conhecidos actualmente têm de operar a temperaturas criogénicas, entre 4 e 80 K (Kalsi, 2011). Existem diversas formas de arrefecer estes materiais até estas baixas temperaturas, sendo a mais simples simplesmente banhar o material num líquido criogénico, como o azoto líquido. Na tabela 3.1 estão listadas as propriedades dos cinco fluidos criogénicos considerados mais interessantes ao arrefecimento dos materiais supercondutores (Iwasa, 2009).

Tabela 3.1: Propriedades dos fluidos considerados mais interessantes ao arrefecimento de materiais supercondutores. Valores obtidos à pressão de 1 atm. Retirado de (Iwasa, 2009).

Propriedade	He	H ₂	Ne	N ₂	O ₂
Temperatura de ebulição (T_s), K	4,22	20,39	27,09	77,39	90,18
Ponto triplo, K	~	13,96	24,56	63,16	54,36
Calor de vaporização (líquido), kJ/kg	20,9	443	85,9	199,3	213
Calor de vaporização (volume líquido), J/cm ³	2,6	31,1	104	161	243
Densidade (T_s , líquido), kg/m ³	125	70,8	1206	807	1141
Densidade (T_s , vapor), kg/m ³	16,9	1,33	9,37	4,60	4,47
Densidade (293 K), kg/m ³	0,167	0,084	0,840	1,169	1,333

Apesar destes cinco fluidos serem adequados ao arrefecimento de materiais supercondutores, o hélio (He), o néon (Ne) e o azoto (N₂) são favoritos por serem fluidos que não se combinam

3. Gerador Síncrono SAT

com outros fluidos para criar misturas explosivas, como é o caso do hidrogéneo (H_2) e do oxigénio (O_2). Antes da descoberta dos materiais SAT, a única escolha possível para arrefecer os materiais SBT era o hélio líquido (LHe), devido às temperaturas extremamente baixas a que estes materiais operam. Os materiais SAT utilizados em aplicações sujeitas a campos magnéticos pouco intensos podem ser arrefecidos com azoto líquido (LN_2) e, ainda assim, ter um desempenho adequado. Para aplicações sujeitas a campos magnéticos muito intensos é utilizado o néon líquido (LNe) ou hélio no estado gasoso (GHe), que permitem a obtenção de maior desempenho do material supercondutor e/ou maiores margens de segurança. O LN_2 é preferido, relativamente ao LNe, porque é barato e está disponível em muita quantidade (Kalsi, 2011).

A principal desvantagem dos fluidos criogénicos é o facto de terem de ser repostos, ou utilizados num sistema fechado em conjunto com crio-refrigeradores. O arrefecimento directo, por imersão num fluido, é possível para máquinas de pequenas dimensões (exemplo em Nakamura et al., 2006) mas, para máquinas de grandes dimensões, o arrefecimento indirecto, ou por condução, é preferido. O arrefecimento das bobinas supercondutoras é feito por condução a partir da superfície exterior. Tipicamente são utilizadas duas configurações, que podem ser vistas na figura 3.13.

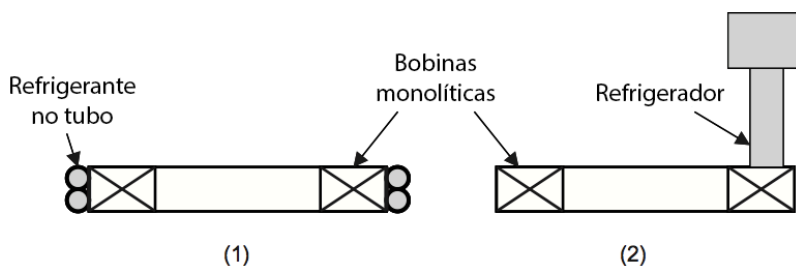


Figura 3.13: Arrefecimento por condução de uma bobina supercondutora. (1) Fluido refrigerante em tubos. (2) Bobina em contacto com o crio-refrigerador. Adaptado de (Kalsi, 2011).

O sistema de refrigeração fechado é responsável por manter os enrolamentos SAT à temperatura criogénica, fazendo circular o refrigerante (líquido ou gasoso) por canais de arrefecimento localizados no interior do rotor. O refrigerante é novamente arrefecido no exterior com um crio-refrigerador que faz a remoção da carga térmica. Neste tipo de sistemas é normalmente utilizado para circulação do fluido refrigerante e extracção do calor um crio-refrigerador tipo Gifford-McMahon, que é colocado estacionariamente no exterior da máquina. Apesar desta ser a configuração mais comum para o sistema de refrigeração da máquina supercondutora, existem outras abordagens, como crio-refrigeradores tipo Stirling e *pulse-tubes*. Os primeiros não são utilizados porque, apesar de terem maior rendimento que os refrigeradores Gifford-McMahon, são substancialmente mais caros e pesados. Os refrigeradores *pulse-tube*, apesar de terem elevada fiabilidade e menores vibrações, têm menores capacidades de arrefecimento (Kalsi, 2011).

Apesar do rendimento destes sistemas ter vindo a aumentar de forma constante nos últimos anos, este ainda se encontra na ordem dos 20% do rendimento de Carnot¹², definido por:

$$\eta_c = \frac{T_f}{T_q - T_f}, \quad (3.20)$$

em que T_q é a temperatura da fonte quente (≈ 300 K) e T_f é a temperatura da fonte fria. Para o caso do azoto líquido ($T_f=77$ K), o η_c é 34,5%, ou seja, a eficiência dos crio-refrigeradores ronda os $\eta=6,9\%$. Outra forma de expressar esta capacidade de extracção de calor do crio-refrigerador é através da potência específica ($=1/\eta$) que neste caso é 14,5, ou seja, para retirar 1 W de calor à temperatura de 77 K são necessários 14,5 W (Kalsi, 2011). A título de exemplo, na figura 3.14 pode ver-se a curva de capacidade do crio-refrigerador AL600 da Cryomech, capaz de extrair 100 W de calor à temperatura de 30 K.

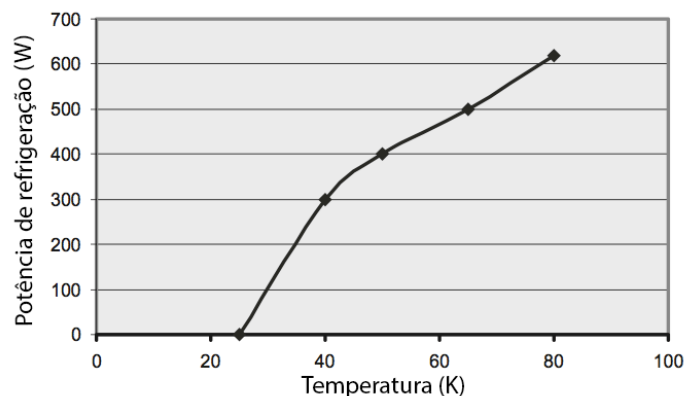


Figura 3.14: Curva de capacidade do refrigerador Cryomech AL600. Adaptado de (Kalsi, 2011).

3.3.5 Sistema de Excitação de Campo ou Excitatriz

O sistema de excitação da máquina síncrona, responsável pela alimentação dos enrolamentos rotóricos de excitação de campo com corrente DC, pode ser de dois tipos (Boldea, 2005):

- Sistema com escovas e anéis-deslizantes de cobre;
- Sistema de excitação sem escovas.

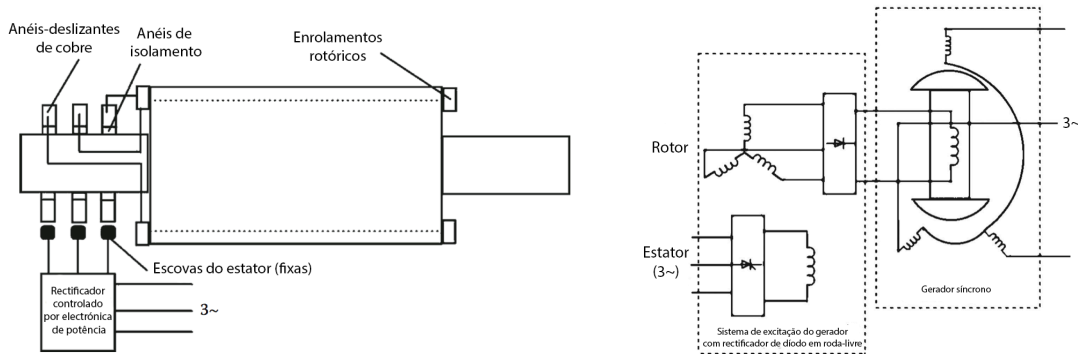
Em máquinas supercondutoras normalmente são utilizados sistemas de excitação sem escovas, uma vez que o objectivo é construir máquinas com o maior rendimento que for possível, e os sistemas baseados em escovas e anéis deslizantes são os que apresentam perdas mais elevadas.

¹²Rendimento máximo que uma máquina térmica pode ter a funcionar entre T_f e T_q .

3. Gerador Síncrono SAT

Nos sistemas de excitação baseados em escovas e anéis deslizantes é utilizado um rectificador controlado, com uma potência que ronda os 3% da potência nominal da máquina (ver figura 3.15(a)), que adequa a corrente de campo DC consoante a necessidade da máquina, estabilizando a tensão e frequência do gerador.

Alternativamente, um gerador síncrono invertido - com os enrolamentos AC e o rectificador colocados no rotor e a excitação DC no estator - pode desempenhar o papel de uma excitatriz sem escovas (figura 3.15(b)). A corrente de campo da excitatriz é controlada por um rectificador de baixa potência. Este tipo de sistema de excitação, apesar de ter maior rendimento que o sistema anteriormente descrito, tem a desvantagem de ter uma resposta mais lenta (Boldea, 2005).



(a) Sistema de excitação com escovas e anéis-deslizantes.

(b) Sistema de excitação sem escovas.

Figura 3.15: Sistemas de excitação da máquina síncrona. Adaptado de (Boldea, 2005).

3.3.6 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se aquela que se considera a topologia clássica da máquina síncrona SAT. Descreveram-se os vários componentes constituintes deste tipo de máquinas e foi feita uma pequena incursão à supercondutividade de alta temperatura, descrevendo as manifestações macroscópicas mais interessantes à área da energia. Também foi feita uma revisão aos principais princípios e leis do electromagnetismo, fundamentais ao projecto de máquinas eléctricas.

4

Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos

Conteúdo

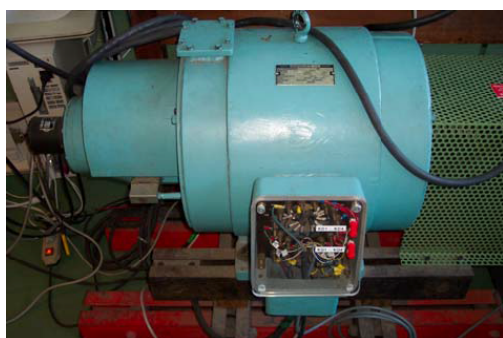
4.1	Máquina Síncrona Convencional	58
4.2	Máquina Síncrona SAT Proposta	59
4.2.1	Configuração do Modelo Flux2D	59
4.2.2	Malha de Elementos Finitos	63
4.2.3	Definição das Propriedades Físicas dos Materiais Utilizados	63
4.2.4	Circuitos Utilizados na Simulação da Máquina	67
4.3	Conclusões	71

4. Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos

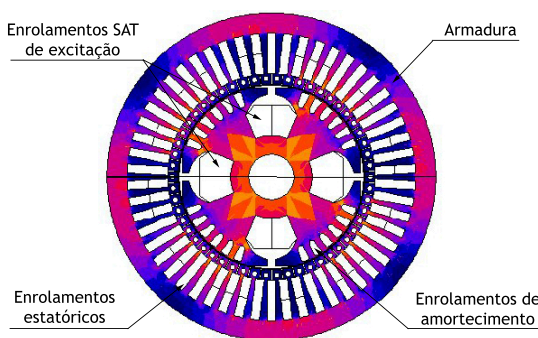
Neste capítulo procede-se à descrição da metodologia utilizada no projecto da máquina síncrona SAT proposta. Mostra-se a configuração do modelo bidimensional (2D) de elementos finitos que foi utilizado para a sua simulação, assim como dos circuitos utilizados nos vários ensaios realizados à máquina.

4.1 Máquina Síncrona Convencional

O projecto da máquina síncrona SAT proposta baseia-se em algoritmos de elementos finitos (EF) descritivos de uma máquina síncrona convencional, à qual foram feitas as alterações necessárias para poder ser colocada a excitação de campo SAT. A máquina síncrona convencional em que a máquina SAT é baseada pode ser vista na figura 4.1 (a) e na figura 4.1 (b) pode ver-se a geometria do modelo 2D de elementos finitos representativo desta máquina. A máquina tem uma potência de 3 kVA, 4 pólos e 220 V de tensão composta e as suas principais dimensões encontram-se listadas na tabela 4.1. A parte activa da máquina tem um diâmetro de 405 mm e uma profundidade de 132 mm. O entreferro tem uma espessura de 1,14 mm.



(a) Máquina síncrona convencional de 3 kVA, 4 pólos e 220 V. Retirado de (Cedrat, 2006).



(b) Geometria do modelo EF 2D da máquina (corte transversal da parte activa da máquina síncrona). Adaptado de (Cedrat, 2006).

Figura 4.1: Máquina convencional que serviu de base ao projecto da máquina SAT proposta.

Tabela 4.1: Dimensões da máquina síncrona convencional. Retirado de (Cedrat, 2006)

Parâmetro	Dimensão (mm)
Raio externo do rotor	113,2
Raio interno do rotor	28,575
Raio externo do estator	202,5
Raio interno do estator	114,34
Espessura do entreferro	1,14
Profundidade	132

4.2 Máquina Síncrona SAT Proposta

4.2.1 Configuração do Modelo Flux2D

As alterações realizadas concentram-se principalmente no rotor. Contudo, também foram realizadas algumas alterações ao estator. A geometria do rotor da máquina teve de ser simplificada, de forma a poder albergar as bobinas *racetrack*, uma vez que a fita SAT tem uma geometria menos flexível que os enrolamentos de cobre convencionais.

A geometria da máquina SAT proposta pode ser vista na figura 4.2), tendo as suas dimensões principais permanecido inalteradas. Nos pontos seguintes faz-se uma descrição mais pormenorizada das alterações efectuadas aos vários componentes da máquina, recorrendo à utilização de imagens sempre que se considerar necessário realçar alguma característica considerada importante.

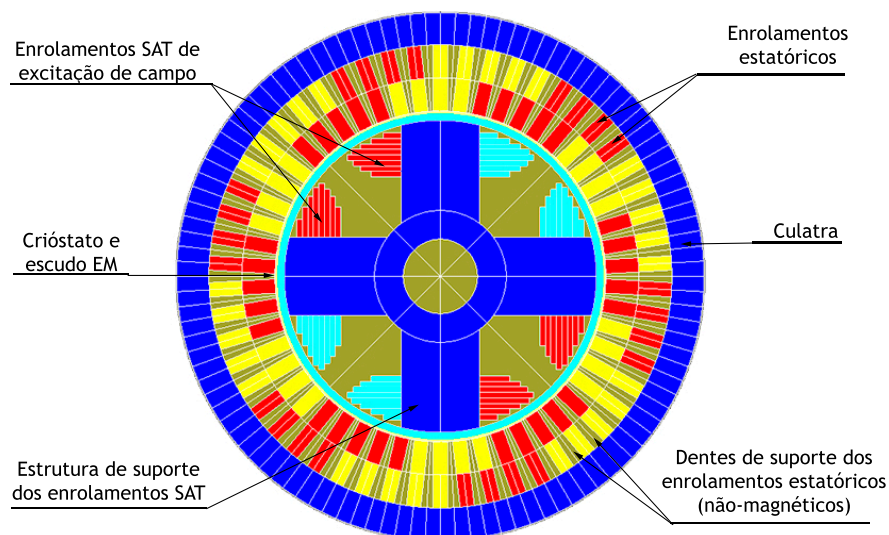


Figura 4.2: Vista geral da geometria do modelo EF da máquina SAT desenvolvida.

4.2.1.1 Geometria dos Pólos

A primeira grande alteração que foi realizada está relacionada com a geometria dos pólos. Como se pode observar na figura 4.1(b), os pólos do rotor da máquina convencional não mantêm a mesma largura ao longo do seu comprimento radial, tornando esta geometria inadequada à montagem das bobinas *racetrack* de fita SAT. Por esta razão, a geometria do núcleo do rotor foi simplificada, com a adopção de pólos de largura uniforme. Na figura 4.3 pode ver-se, a verde, a configuração final do núcleo de rotor. No resto da presente descrição, alguns pormenores do modelo que se pretendam destacar serão feitos na mesma cor.

4. Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos

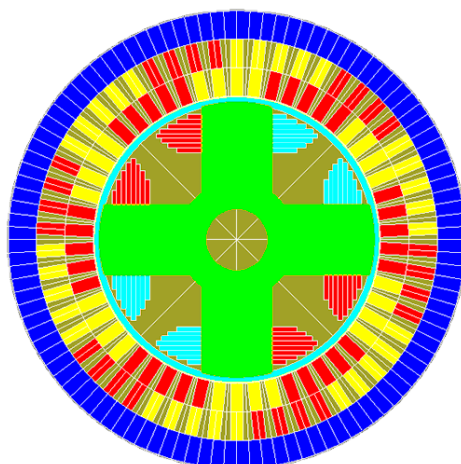


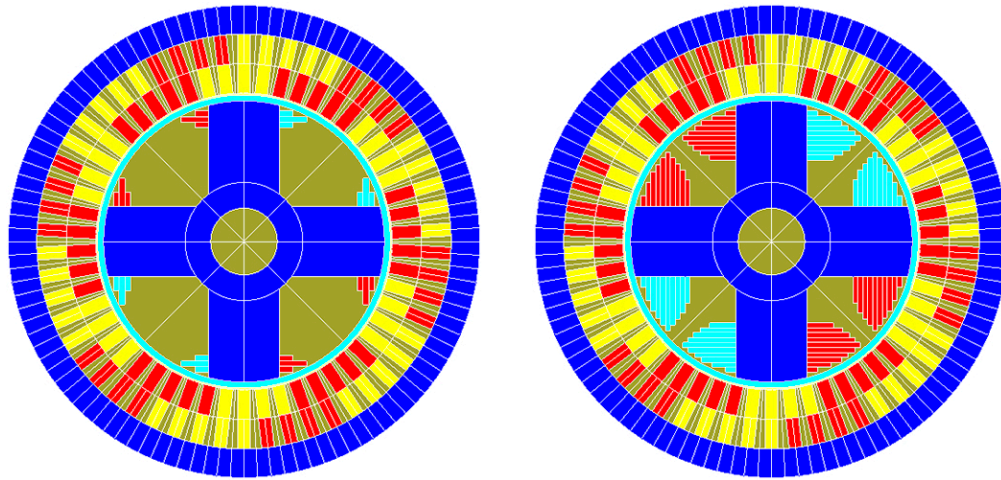
Figura 4.3: Estrutura de suporte dos enrolamentos SAT (núcleo do rotor), a verde.

Uma vez que a fita SAT tem um raio mínimo de curvatura, que varia de fabricante para fabricante e para diferentes modelos de fita, a largura dos pólos foi deixada em função de um parâmetro. No modelo EF de projecto da máquina foram utilizados dados da fita SAT 2G da AmSC com estabilizador de cobre que, segundo a AmSC, é o tipo de fita mais indicado às máquinas rotativas (dados das propriedades mecânicas da fita na tabela 4.4). Na maior parte dos ensaios realizados foram utilizados pólos com largura correspondente ao dobro do diâmetro mínimo desta fita, para preservação do desempenho.

4.2.1.2 Enrolamentos SAT de Excitação de Campo

Os enrolamentos de excitação de campo foram substituídos por enrolamentos de fita de material SAT. Foram desenvolvidos uma série de modelos, com diferente número de bobinas de excitação de campo, cuja geometria é função do número de espiras de cada uma destas bobinas. Como se tem 2 pares de pólos, foram criadas 4 regiões, uma para cada uma das orientações da corrente (positiva ou negativa) em cada um dos pares de pólos. Foram ainda criados modelos alternativos, com menor e maior número de bobinas SAT, para simular a máquina noutras condições (possíveis de ver na figura 4.4). De notar que as bobinas estão geometricamente separadas no modelo, mas que na prática podem ser um enrolamento contínuo, desde que a fita tenha comprimento para tal.

As regiões e orientações dos enrolamentos de excitação de campo podem ser vistas na figura 4.5. Na tabela 4.3 podem ver-se as propriedades eléctricas da fita SAT 2G da AmSC. No modelo de elementos finitos (EF) 2D da máquina síncrona SAT desenvolvida foram utilizados os dados da fita com 4,8 mm de largura. Esta fita tem um valor de corrente crítica máxima de 100 A a 77 K.



(a) Geometria do modelo de três bobinas.

(b) Geometria do modelo de dez bobinas.

Figura 4.4: Geometria de modelos alternativos para a máquina síncrona SAT que foram desenvolvidos.

4.2.1.3 Escudo EM e Crióstato

Os enrolamentos de amortecimento foram retirados. Contudo, numa máquina síncrona supercondutora, a função destes enrolamentos é realizada pelo escudo EM que é colocado em torno do rotor SAT. O escudo EM foi modelizado como uma região definida por uma linha de condutor sólido¹³, uma vez que possui uma espessura muito reduzida quando comparada com as restantes regiões do modelo, o que origina problemas de qualidade da malha de elementos finitos. O crióstato foi modelizado como uma zona sem propriedades electromagnéticas, com uma espessura de 5 mm. Nas figuras 4.6(a) e 4.6(b) pode ver-se com maior pormenor o escudo EM e o crióstato.

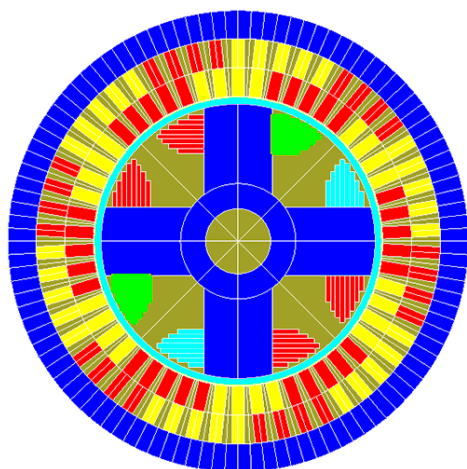
4.2.1.4 Enrolamentos Estatóricos

Os enrolamentos estatóricos tiveram de ser redimensionados, uma vez que não foi obtida a tensão nominal de 220 V/127 V da máquina convencional original. Como a força electromotriz induzida nos enrolamentos estatóricos (dada pela equação 3.9), é proporcional ao fluxo ligado com os enrolamentos, a forma encontrada para aumentar a tensão aos terminais do estator passou pelo aumento do número de espiras. O aumento do número de espiras é possível por duas vias: aumento da área de secção das cavas, possível pela troca dos dentes ferromagnéticos de suporte por estruturas mais finas, ou pela adopção de fio de menor diâmetro, como o fio de Litz.

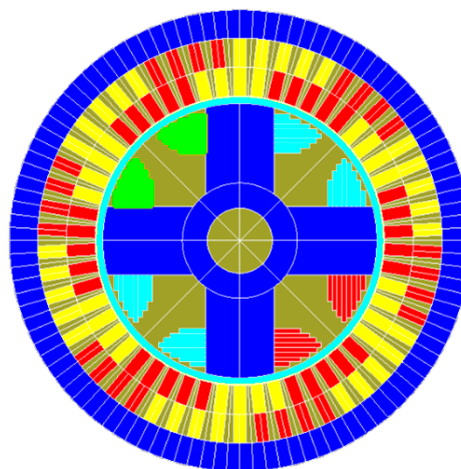
Na figura 4.7 pode ver-se as disposições das três fases dentro da máquina. Estas regiões foram definidas como bobinas de material condutor para ligação a elementos de um circuito eléctrico.

¹³Line region no software Flux2D

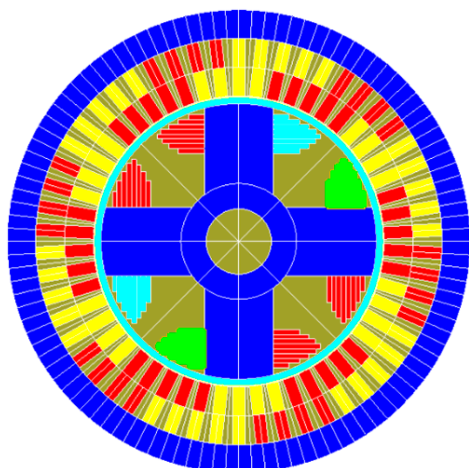
4. Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos



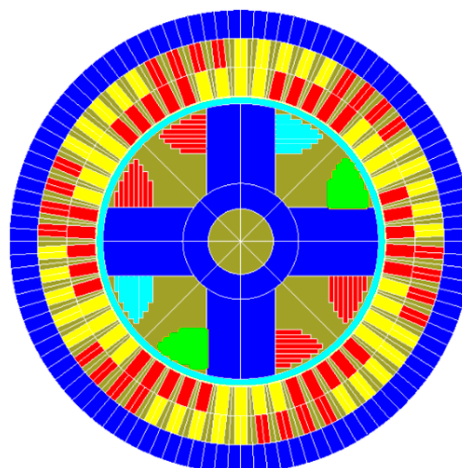
(a) Orientação negativa da corrente do primeiro par de pólos.



(b) Orientação positiva da corrente do primeiro par de pólos.



(c) Orientação negativa da corrente do segundo par de pólos.



(d) Orientação positiva da corrente do segundo par de pólos.

Figura 4.5: Configuração dos enrolamentos SAT de excitação de campo (a verde na figura).

Tabela 4.2: Especificações dos enrolamentos da máquina síncrona convencional e da máquina SAT desenvolvida. Dados da máquina convencional retirados de (Cedrat, 2006)

Especificações	Máquina convencional	Máquina SAT
Número de cavas	54	54
Número de espiras por fase	108	270
Número de espiras por cava	12	30

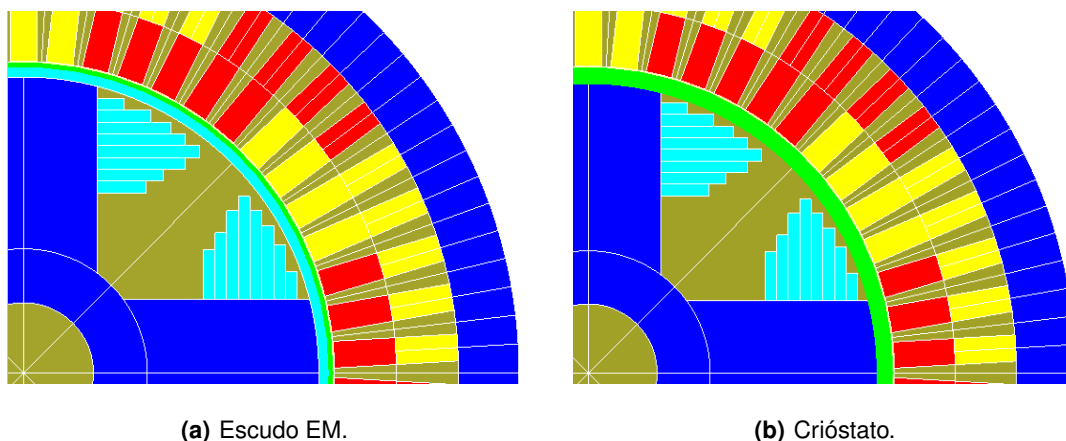


Figura 4.6: Crióstato e escudo EM da máquina SAT em pormenor (a verde).

4.2.2 Malha de Elementos Finitos

A malha foi definida com maior detalhe na zona do entreferro e das bobinas SAT e com menor pormenor nas zonas mais afastadas, nomeadamente o veio e parte mais externa da carcaça. A qualidade da malha obtida está dependente da espessura do entreferro e do escudo EM, mas tem normalmente $\sim 94\%$ de nós¹⁴ de excelente qualidade, sem apresentar nós anormais.

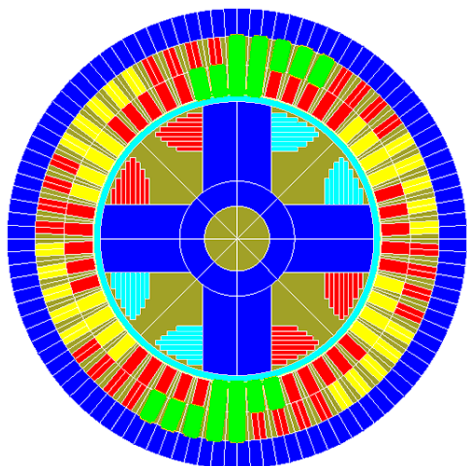
A malha de elementos finitos pode ser vista na figura 4.8. Na figura 4.8(a) pode ver-se uma vista mais geral da malha e, na figura 4.8(b) a malha na zona do entreferro em maior pormenor.

4.2.3 Definição das Propriedades Físicas dos Materiais Utilizados

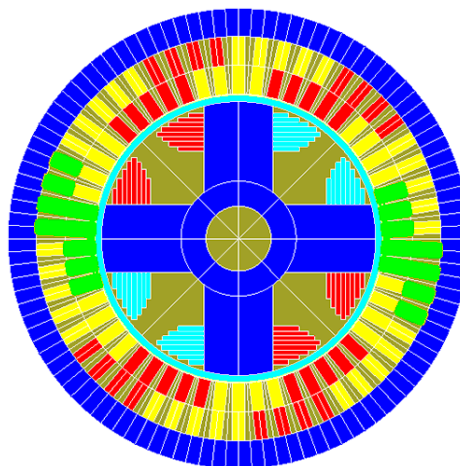
4.2.3.1 Material Ferromagnético

A culatra que envolve os enrolamentos estáticos da máquina síncrona é composta por um material ferromagnético. Nas simulações efectuadas, o material ferromagnético utilizado foi um aço magnético fornecido pelo próprio software Flux2D, cuja curva magnetização (curva B-H) pode ser vista na figura 4.9. O material possui uma permeabilidade magnética relativa $\mu_r = 8000$ e uma densidade de fluxo magnético de saturação $B_s = 1,6$ T. Este material também foi utilizado no núcleo do rotor, quando se simulou o comportamento da máquina com rotor ferromagnético.

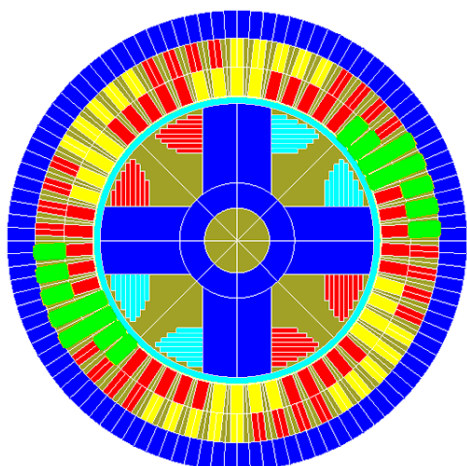
¹⁴Nodes no software Flux2D



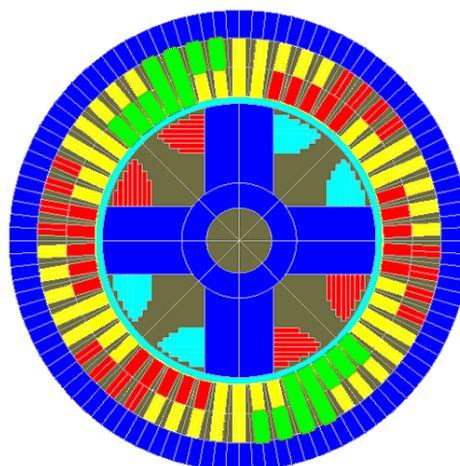
(a) Orientação negativa da corrente da fase 1 (a verde).



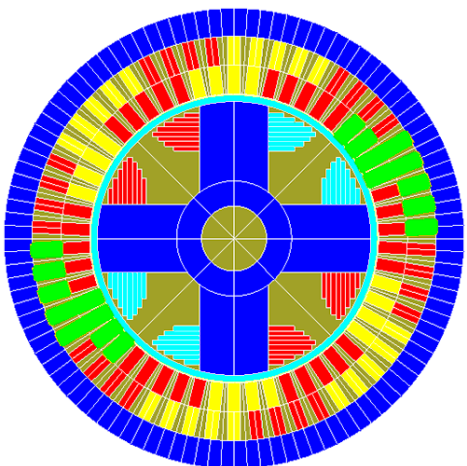
(b) Orientação positiva da corrente da fase 1 (a verde).



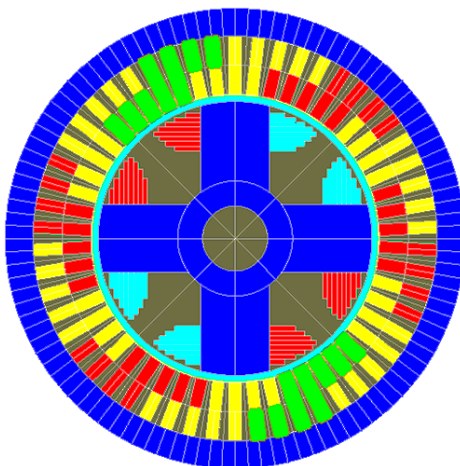
(c) Orientação negativa da corrente da fase 2 (a verde).



(d) Orientação positiva da corrente da fase 2 (a verde).

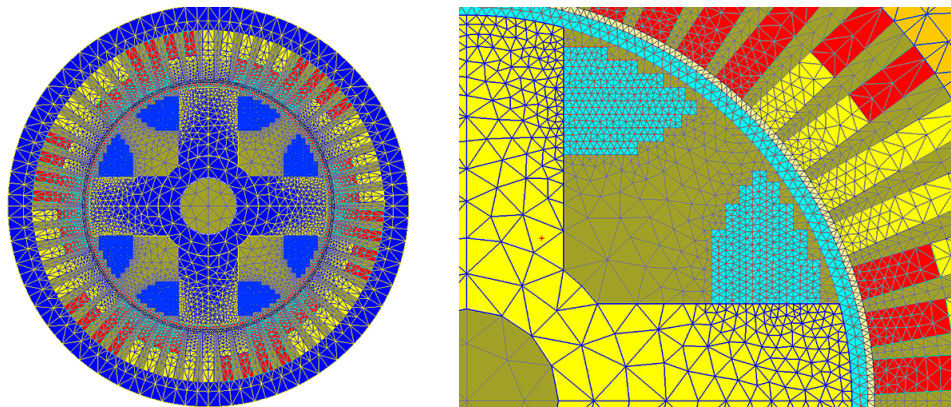


(e) Orientação negativa da corrente da fase 3 (a verde).



(f) Orientação positiva da corrente da fase 3 (a verde).

Figura 4.7: Configuração das três fases do estator.



(a) Vista geral da malha de EF.

(b) Pormenor da malha de EF.

Figura 4.8: Malha de elementos finitos (EF) definida para a simulação da máquina SAT.

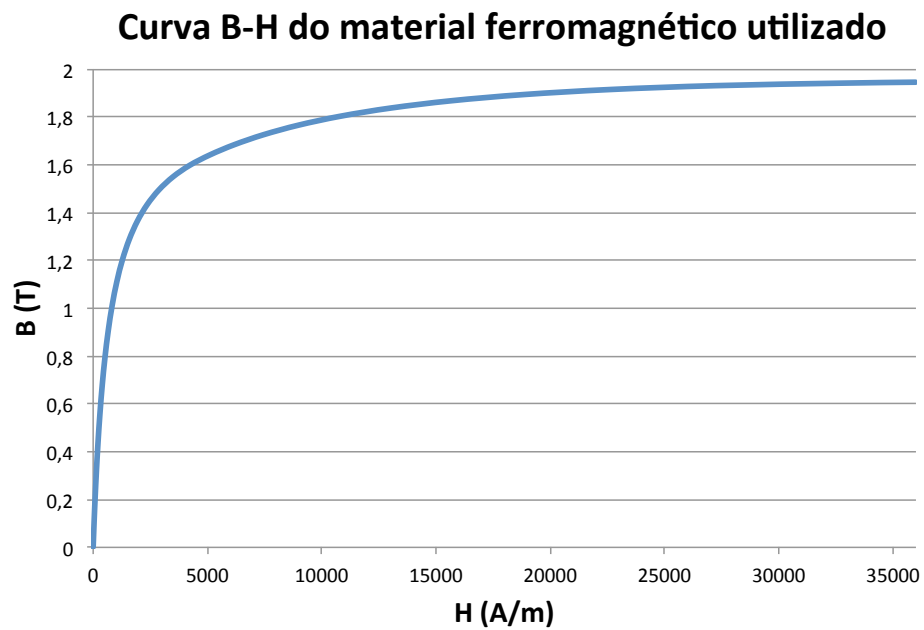


Figura 4.9: Curva B-H do material ferromagnético utilizado na simulação da máquina SAT.

4. Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos

4.2.3.2 Cobre

Os enrolamentos estáticos são feitos de cobre. Foi mais uma vez utilizado um material já modelizado pelo *software* Flux2D. O Flux2D considera que a resistividade deste material é isotrópica e que varia linearmente com a temperatura T . Este calcula a resistividade do material em função da temperatura, com base na equação:

$$\rho_f = \rho_{amb} \cdot [1 + \alpha(T_f - T_{amb})], \quad (4.1)$$

em que T_{amb} corresponde à temperatura ambiente, T_f é a temperatura do material, ρ_{amb} é a resistividade do material à temperatura T_{amb} e ρ_f a resistividade do material à temperatura T_f . O coeficiente de termoresistividade do material (α) tem unidades de $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou K^{-1} . Neste caso, o material utilizado tem um coeficiente de termoresistividade $\alpha = 0,1564 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

4.2.3.3 Material SAT

O material SAT utilizado é baseado num material supercondutor também já modelizado pelo *software* Flux2D, que foi alterado para ter as características de desempenho semelhantes à fita SAT 2G da AmSC, a fita utilizada como base de projecto. O material é modelizado como possuindo supercondutividade isotrópica, fornecida pela lei da potência. Foi considerada uma resistividade de $\rho = 1 \times 10^{-12} \Omega \cdot \text{m}$, com uma densidade de corrente crítica $J_c = 10300 \text{ A/cm}^2$. Os dados técnicos da fita encontram-se no anexo A. Nas tabelas 4.3 e 4.4 estão as sumarizadas as principais características eléctricas e mecânicas da fita.

Tabela 4.3: Propriedades eléctricas da fita SAT 2G da AmSC com estabilizador de cobre. Dados retirados de (AmSC, 2012)

	4,8 mm	12 mm
Corrente mínima (I_c)	J_e (A/cm ²)	J_e (A/cm ²)
70 A	7200 A/cm ²	~
80 A	8200 A/cm ²	~
90 A	9300 A/cm ²	~
100 A	10300 A/cm ²	~
175 A	~	7200 A/cm ²
200 A	~	8200 A/cm ²
225 A	~	9300 A/cm ²
250 A	~	10400 A/cm ²

Tabela 4.4: Características geométricas da fita SAT 2G da AmSC com laminação de cobre. Dados retirados de (AmSC, 2012)

	4,8 mm	12 mm
Espessura média	0,18 - 0,22 mm	0,18 - 0,22 mm
Largura mínima	4,70 mm	0,18 - 11,9 mm
Largura máxima	4,95 mm	12,3 mm
Diâmetro de curvatura mínimo	30 mm	30 mm

4.2.4 Circuitos Utilizados na Simulação da Máquina

4.2.4.1 Ensaio em Vazio e em Carga

O circuito utilizado para realizar os ensaios de circuito-aberto e com carga puramente estática está figura 4.10.

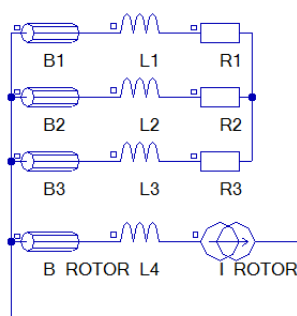


Figura 4.10: Circuito utilizado para realizar os ensaios da máquina em vazio e com carga resistiva.

Os componentes B_1 , B_2 , B_3 e B_{ROTOR} são os elementos que fazem a ligação entre a parte física do modelo EF e o circuito elétrico de simulação. O seu valor de resistência corresponde à resistência dos enrolamentos a que correspondem. As resistências de carga (R_1 , R_2 e R_3) têm valores muito elevados, para simular o circuito aberto. L_1 , L_2 e L_3 são os valores de indutância dos enrolamentos estáticos e L_4 dos enrolamentos SAT do rotor. O valor de L_4 foi estimado a partir do método sugerido por (Jiashan and Jian, 1982), que situa o valor de indutância de um enrolamento supercondutor em aproximadamente $60 \mu\text{H/m}$. Na tabela 4.5 estão os valores padrão dos componentes do circuito de ensaio em vazio.

Os únicos valores dos componentes que são alterados para o ensaio com carga resistiva são as resistências de carga R_1 , R_2 e R_3 , que estão dependentes do ensaio. Por esta razão, optou-se por indicar o valor destes componentes na secção correspondente ao próprio ensaio.

4. Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos

Tabela 4.5: Valores padrão dos vários componentes do circuito de ensaio em vazio.

Componente	Valor
B ₁ , B ₂ e B ₃	$455,25 \times 10^{-3} \Omega$
L ₁ , L ₂ e L ₃	$2,76 \times 10^{-3} \text{ H}$
R ₁ , R ₂ e R ₃	$1 \times 10^6 \Omega$
B _{ROTOR}	$2,98 \times 10^{-10} \Omega$
L ₄	$550,5 \times 10^{-3} \text{ H}$
I _{ROTOR}	-80 A

4.2.4.2 Ensaio em Curto-Circuito

O circuito de ensaio em curto-circuito pode ser visto na figura 4.11.

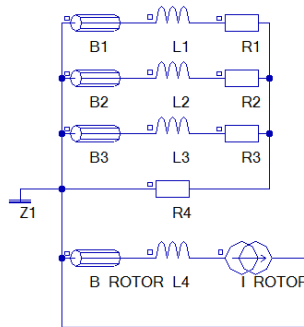


Figura 4.11: Circuito utilizado para realizar o ensaio da máquina em curto-circuito.

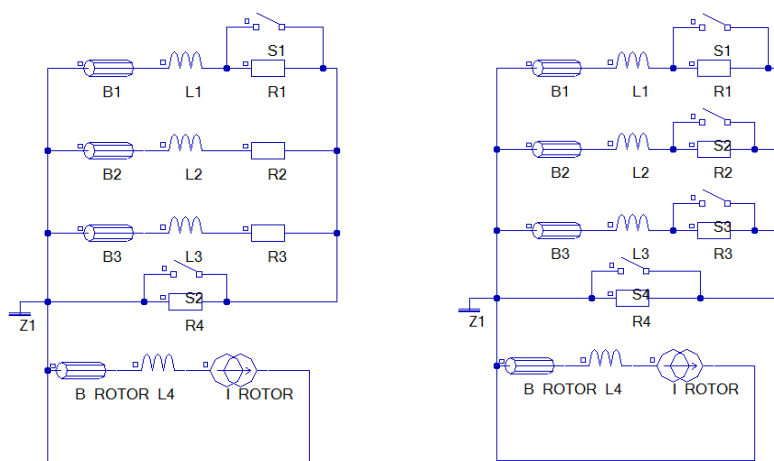
Os componentes B₁, B₂ e B₃ são os elementos de ligação com as bobinas estatóricas da parte física do modelo e B_{ROTOR} com as bobinas de excitação de campo. Neste caso, as resistências de carga (R₁, R₂ e R₃) possuem um valor muito baixo, para simular o curto-circuito. R₄ é uma resistência utilizada para monitorizar a corrente que circula para a terra, caso ocorra um desequilíbrio de fases durante o curto-circuito (opera como um amperímetro). L₁, L₂, L₃ e L₄ têm os mesmos valores do ensaio anterior. Na tabela 4.6 estão os valores padrão dos componentes do circuito de ensaio em curto-circuito.

4.2.4.3 Curto-Circuitos Repentinos

Na figura 4.12(a) está o circuito utilizado no curto-circuito repentino de uma fase e na figura 4.12(b) o do curto-circuito trifásico. Neste ensaio, as resistências R₁, R₂, R₃ e R₄ têm valores elevados, para simular a operação em vazio, sendo curto-circuitadas através dos interruptores S₁, S₂, S₃ e S₄. Na tabela 4.7 estão os valores padrão dos componentes do circuito.

Tabela 4.6: Valores padrão dos vários componentes do circuito de ensaio em curto-circuito.

Componente	Valor
B_1, B_2 e B_3	$455,25 \times 10^{-3} \Omega$
L_1, L_2 e L_3	$2,76 \times 10^{-3} \text{ H}$
R_1, R_2, R_3 e R_4	$1 \times 10^{-6} \Omega$
B_{ROTOR}	$2,98 \times 10^{-10} \Omega$
L_4	$550,5 \times 10^{-3} \text{ H}$
I_{ROTOR}	-80 A



(a) Curto-circuito de uma fase.

(b) Curto-circuito de três fases.

Figura 4.12: Circuitos utilizados para realizar os curto-circuitos repentinos.

Tabela 4.7: Valores padrão dos vários componentes do circuito de ensaio de curto-circuito repentino.

Componente	Valor
B_1, B_2 e B_3	$455,25 \times 10^{-3} \Omega$
L_1, L_2 e L_3	$2,76 \times 10^{-3} \text{ H}$
R_1, R_2, R_3 e R_4	$1 \times 10^{-6} \Omega$
B_{ROTOR}	$2,98 \times 10^{-10} \Omega$
L_4	$550,5 \times 10^{-3} \text{ H}$
I_{ROTOR}	-80 A
$S_{1-On}, S_{2-On}, S_{3-On}$ e S_{4-On}	$1 \times 10^{-9} \Omega$
$S_{1-Off}, S_{2-Off}, S_{3-Off}$ e S_{4-Off}	$1 \times 10^9 \Omega$

4. Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos

4.2.4.4 Ensaio da Máquina com Carga de Carácter Indutivo

Na figura 4.13 pode ver-se o circuito utilizado para testar a máquina sob carga de carácter indutivo. Os valores-padrão dos componentes do circuito de ensaio encontram-se listados na tabela 4.13. Os componentes correspondentes à carga são as resistências R_1 , R_2 e R_3 e as indutâncias L_5 , L_6 e L_7 , formando uma carga RL por cada ramo.

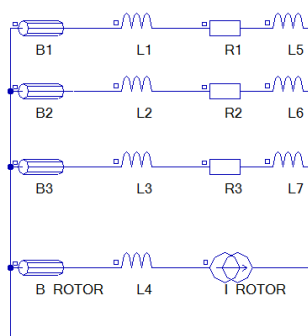


Figura 4.13: Circuito utilizado para realizar o ensaio da máquina sob carga indutiva.

Tabela 4.8: Valores padrão dos vários componentes do circuito de ensaio sob carga de carácter de indutivo.

Componente	Valor
B_1, B_2 e B_3	$455,25 \times 10^{-3} \Omega$
L_1, L_2 e L_3	$2,76 \times 10^{-3} \text{ H}$
R_1, R_2 e R_3	50Ω
L_5, L_6 e L_7	$100 \times 10^{-3} \text{ H}$
B_{ROTOR}	$2,98 \times 10^{-10} \Omega$
L_4	$550,5 \times 10^{-3} \text{ H}$
I_{ROTOR}	-80 A

4.3 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se a metodologia utilizada no projecto do gerador síncrono supercondutor. Foi tido um cuidado especial com a protecção do material supercondutor, que é sem dúvida o elemento mais sensível deste tipo de máquinas, tendo sido adoptadas diversas margens de segurança, e.g.:

- O projecto foi todo realizado com base nos valores críticos da fita SAT a 77 K, quando a maior parte dos projectos que foram analisados operavam a temperaturas geralmente mais baixas, que permitem obter melhores desempenhos por parte da fita;
- O raio de curvatura da fita foi mantido no dobro do raio de curvatura mínimo da fita utilizada no projecto, uma vez que quanto menor for o raio de curvatura, mais deteriorado fica o desempenho da mesma;
- Foi empregue um escudo EM de cobre em torno do rotor, para protecção do material SAT contra campos AC que prejudicam o desempenho da fita (Kalsi, 2011);
- O ponto de funcionamento da máquina foi definido 20 A abaixo do valor de corrente crítica da fita ($I_c=100$ A a 77 K), para se ter alguma margem de manobra quando a máquina se encontrar em operação.

Verificou-se também que mantendo os enrolamentos estatóricos inalterados, seria impossível de alcançar a tensão nominal da máquina original. Como a comparação com a máquina síncrona convencional é algo que é bastante desejável, optou-se por colocar um maior número de espiras em cada cava do estator. Isto é possível de realizar por duas vias: ou pela redução do diâmetro do fio de cobre utilizado (deu-se o exemplo do fio de Litz como solução) ou pelo aumento da área da secção das cavas. Esta última é possível de alcançar pela eliminação dos dentes ferromagnéticos de suporte dos enrolamentos estatóricos e adopção de estruturas de suporte mais finas.

4. Projecto do Gerador Síncrono SAT utilizando um Programa de Elementos Finitos

5

Resultados e Discussão

Conteúdo

5.1	Verificações Iniciais	74
5.1.1	Fluxo Magnético no Interior da Máquina - Densidade e Distribuição das Linhas Fluxo Magnético	75
5.1.2	Verificação do Equilíbrio das Fases	75
5.1.3	Comparação entre as Densidades de Fluxo Magnético no Entreferro da Máquina SAT e da Máquina Convencional	77
5.2	Característica em Vazio	78
5.2.1	Característica em Vazio da Máquina SAT Clássica	78
5.2.2	Característica em Vazio da Máquina com Rotor Ferromagnético	80
5.3	Característica de Curto-Circuito	82
5.4	Reactância Síncrona	83
5.5	Ensaio de Curto-Circuito Repentino	85
5.5.1	Curto-circuito de uma Fase	85
5.5.2	Curto-circuito das Três Fases	87
5.6	Influência do Escudo EM no Desempenho da Máquina	88
5.7	Ensaio da Máquina com Cargas de Diferentes Carácterres	90
5.7.1	Ensaio da Máquina com Carga Resistiva	90
5.7.2	Ensaio da Máquina com Carga de Carácter Indutivo	91
5.8	Análise Espectral da Energia Produzida	94
5.9	Conclusões	97

5. Resultados e Discussão

Neste capítulo mostram-se e analisam-se os resultados dos testes realizados à máquina síncrona SAT por simulação, utilizando o *software* Flux2D. Fazem-se, quando necessário, algumas comparações com a máquina SAT de rotor ferromagnético e com a máquina convencional, em que esta máquina é baseada. Na maior parte das simulações foi utilizada uma máquina de rotor *air-core*, com 1120 espiras de fita SAT por pólo. Se algum parâmetro do modelo for alterado nos ensaios, o facto será indicado. Na figura 5.1 pode ver-se o esquema equivalente de uma das fases do gerador síncrono.

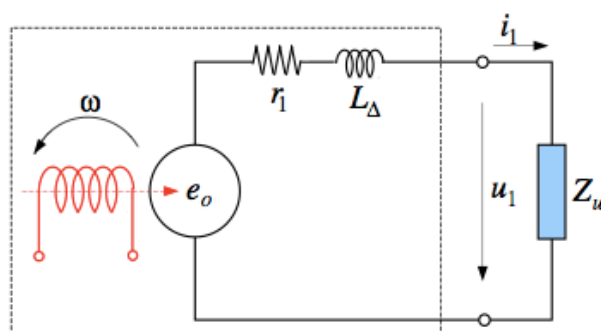


Figura 5.1: Esquema equivalente do gerador síncrono. e_o é a força electromotriz induzida nos enrolamentos estatóricos, r_1 a resistência dos enrolamentos, L_Δ a indutância síncrona e u_1 é a tensão disponibilizada à carga Z_u . Retirado de (Rodrigues, 2008).

Os principais ensaios que são realizados no capítulo tratam-se, à semelhança da máquina síncrona convencional, da determinação da característica em vazio, da característica de curto-circuito e da determinação da reactância síncrona, feita a partir das duas características da máquina. Além destes testes, será também estudado o comportamento da máquina a operar sob carga puramente resistiva, carga de carácter indutivo e ainda a sua reacção à aplicação de curto-circuitos repentinos, uma vez que esta é referida na literatura existente como sendo um dos pontos mais interessantes desta máquina.

5.1 Verificações Iniciais

Os testes iniciais tinham o objectivo de analisar a distribuição e densidade das linhas de fluxo magnético e o equilíbrio das fases. Sabendo que a potência das máquinas eléctricas rotativas varia linearmente com a densidade de campo magnético no entreferro B_m , a comparação da B_m da máquina SAT com a máquina convencional permite ter uma noção da potência da máquina SAT. A potência de qualquer máquina é proporcional a (Vajda et al., 1999):

$$P_{mec} \propto B_m A_{est} NV, \quad (5.1)$$

em que A_{est} é a amplitude da carga linear específica do estator, N é a velocidade da máquina e V o seu volume activo. Interessa, por isso, que a densidade de campo magnético no entreferro B_m seja o mais elevada que for possível, sem ocorra a saturação do material ferromagnético da máquina.

5.1.1 Fluxo Magnético no Interior da Máquina - Densidade e Distribuição das Linhas Fluxo Magnético

Na figura 5.2(a) pode ver-se a distribuição das linhas de fluxo magnético no interior da máquina e na figura 5.2(b) a densidade de fluxo magnético. Estes valores foram obtidos a partir de um ensaio em vazio, utilizando o circuito da figura 4.10 com os valores da tabela 4.5. A partir da figura 5.2(a) verifica-se que as linhas se fecham a cada par de pólos, confirmando que a orientação dos pólos da máquina está correcta. Na figura 5.2(b) pode ver-se a densidade de campo magnético no interior da máquina em escala de cor. As escalas destes gráficos encontram-se no anexo B.

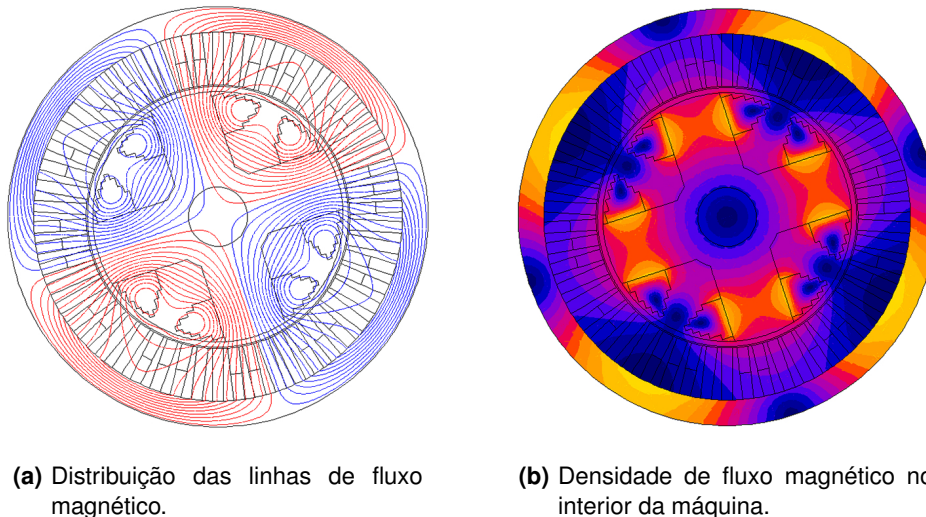


Figura 5.2: Fluxo magnético no interior da máquina. Escalas do modelo EF da máquina de rotor *air-core* no anexo B.

5.1.2 Verificação do Equilíbrio das Fases

Verificada a correcta distribuição das linhas de fluxo magnético e da existência de densidade de fluxo magnético suficientemente elevada, partiu-se para a verificação do equilíbrio das fases. Na figura 5.3 estão as tensões das três fases da máquina, obtidas a partir do ensaio em vazio.



Figura 5.3: Tensões nas três fases da máquina disponibilizadas à carga, obtidas com uma corrente de excitação $I_f = 80$ A.

Pelo gráfico da figura 5.3 verifica-se que as três ondas têm a mesma amplitude e estão desfasadas 120° entre si. O período das ondas é de 20 ms, o que equivale a uma frequência de:

$$f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow \quad (5.2)$$

$$f = \frac{1}{20 \text{ ms}} \Leftrightarrow f = 50 \text{ Hz}, \quad (5.3)$$

correspondente à frequência da rede. As tensões disponibilizadas à carga têm uma amplitude máxima $U_{\text{máx}} = 180$ V, a que corresponde a tensão eficaz de:

$$U_{\text{ef}} = \frac{U_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \Leftrightarrow \quad (5.4)$$

$$U_{\text{ef}} = \frac{180}{\sqrt{2}} \Leftrightarrow U_{\text{ef}} = 127 \text{ V}, \quad (5.5)$$

a tensão nominal de projecto. A máquina tem as fases equilibradas, com frequência e tensões correctas.

5.1.3 Comparação entre as Densidades de Fluxo Magnético no Entreferro da Máquina SAT e da Máquina Convencional

Como já foi referido no início do capítulo, a potência da máquina varia com B_m pela expressão 5.1. Como todos os outros parâmetros da equação 5.1 se mantiveram, torna-se interessante fazer uma comparação entre as densidades de fluxo, B_m , de ambas.

Na figura 5.4 pode ver-se a evolução angular da amplitude das densidades de fluxo magnético de ambas as máquinas, ao longo do entreferro. Para o caso da máquina convencional, o B_m foi obtido com $I_f = 6,75$ A (condições nominais) e no caso da máquina SAT foi obtido com $I_f = 80$ A, o valor de corrente de excitação que induz a tensão nominal aos terminais da máquina.

Como se pode observar pela figura 5.4, na máquina SAT conseguem-se alcançar densidades de fluxo B_m bastante superiores às da máquina convencional. Pode-se portanto dizer que a potência da máquina SAT será provavelmente superior à da máquina convencional.

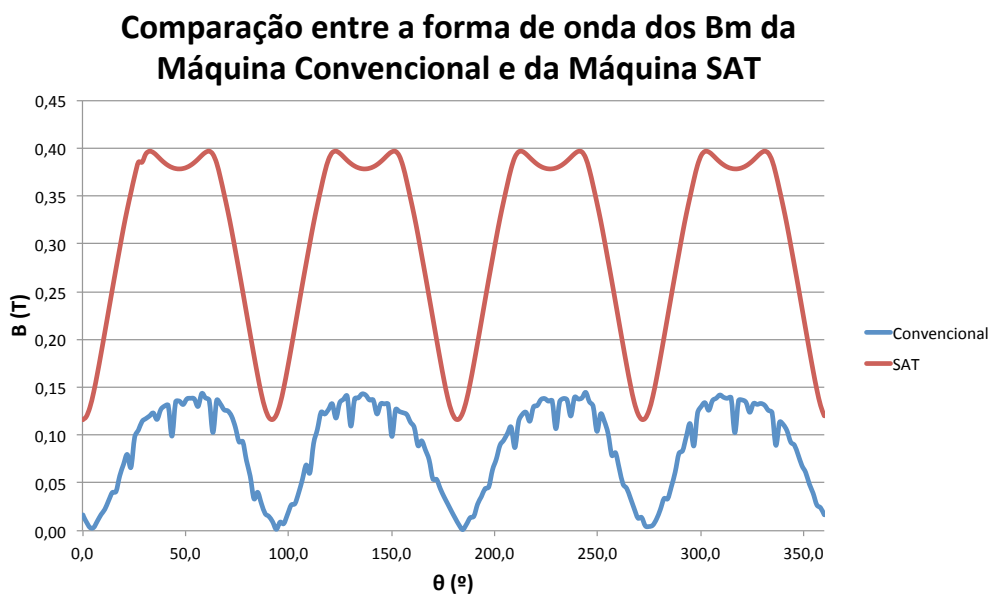


Figura 5.4: Comparação entre as densidades de fluxo magnético B_m no entreferro da máquina convencional e da máquina SAT.

A densidade de fluxo magnético B_m da máquina convencional é mais irregular que a da máquina SAT. Uma possível explicação para a irregularidade do B_m desta máquina está relacionada com a geometria dos próprios pólos ferromagnéticos. Estes têm cavas, onde estão inseridos os enrolamentos de amortecimento (cobre, $\mu_r \approx 1$), que introduzem harmónicas espaciais (harmónicas de dentadura do rotor). Estas irregularidades são suficientes para distorcer a densidade de fluxo no entreferro.

5.2 Característica em Vazio

5.2.1 Característica em Vazio da Máquina SAT Clássica

A característica em vazio da máquina síncrona fornece o valor eficaz da força electromotriz induzida no estator (E_0) em função da corrente de excitação de campo (I_f), com a máquina a operar em vazio. Para se obter a característica em vazio fez-se variar o valor de I_f entre 0 e 100 A (o valor de corrente crítica da fita SAT a 77 K), anotando os valores de tensão eficaz obtidos depois da estabilização da tensão. O circuito eléctrico que foi utilizado na simulação foi o da figura 4.10, com os valores da tabela 4.5. A característica em vazio da máquina pode ser vista na figura 5.5. A tensão nominal de 127 V é obtida para uma corrente de excitação de ~ 80 A.

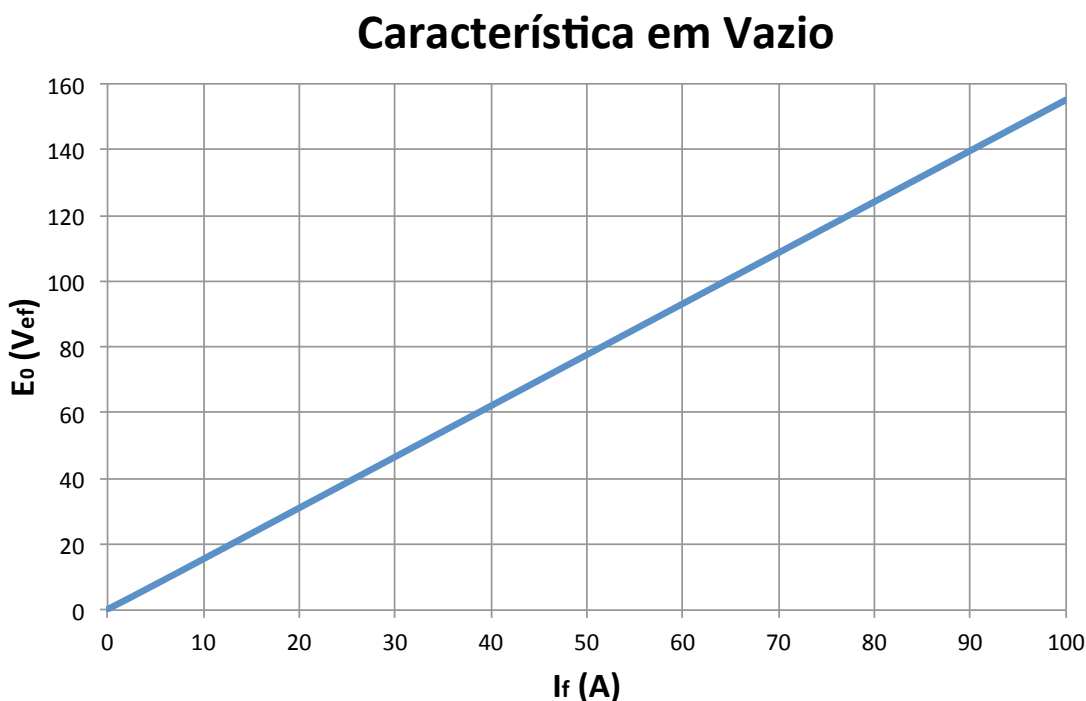
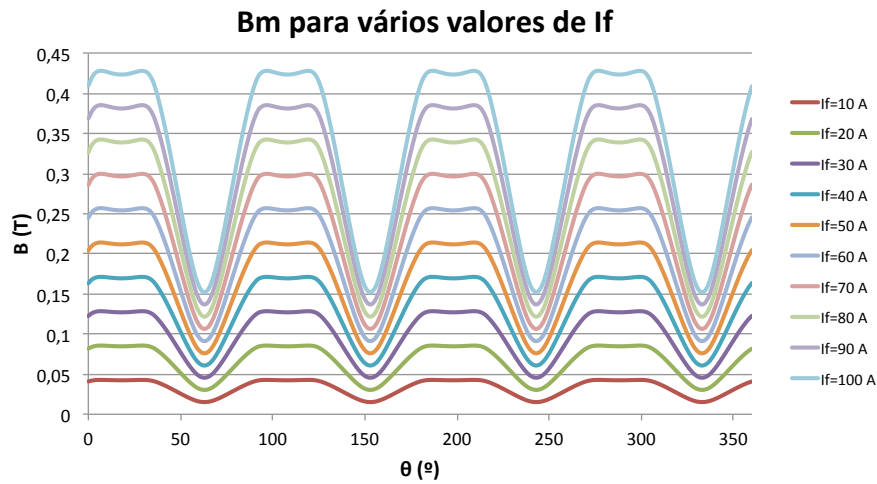
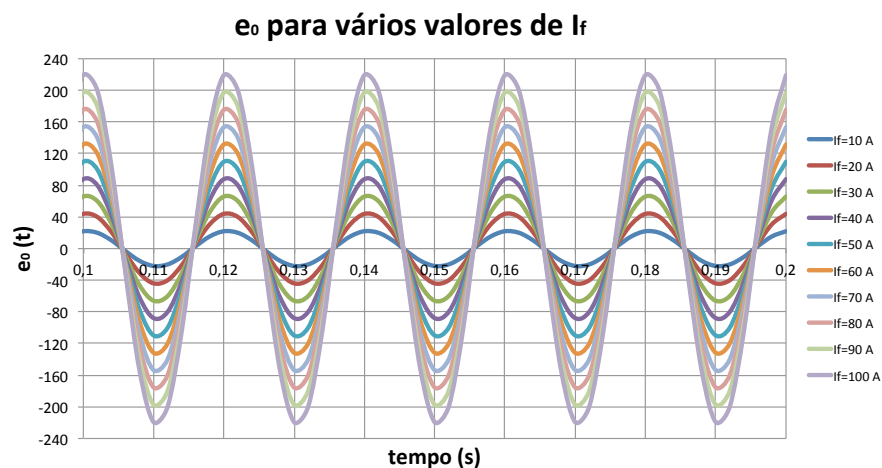


Figura 5.5: Característica em vazio da máquina síncrona SAT.

Conclui-se que, ao contrário das máquinas convencionais, o valor de E_0 varia linearmente com a corrente de excitação para toda a gama de I_f . No caso das máquinas convencionais, o valor de E_0 varia linearmente com a corrente de excitação I_f somente até certo ponto, a partir do qual o material ferromagnético satura, distorcendo a característica e as ondas de saída do gerador. Este ponto, onde começa a existir saturação do circuito magnético da máquina, é normalmente definido como o ponto de funcionamento nominal. Na figura seguinte pode observar-se o andamento da densidade de fluxo no entreferro, B_m , para os vários valores de corrente de excitação I_f ensaiados.



(a) Andamento da densidade de fluxo magnético no entreferro B_m para vários valores de corrente de excitação I_f .



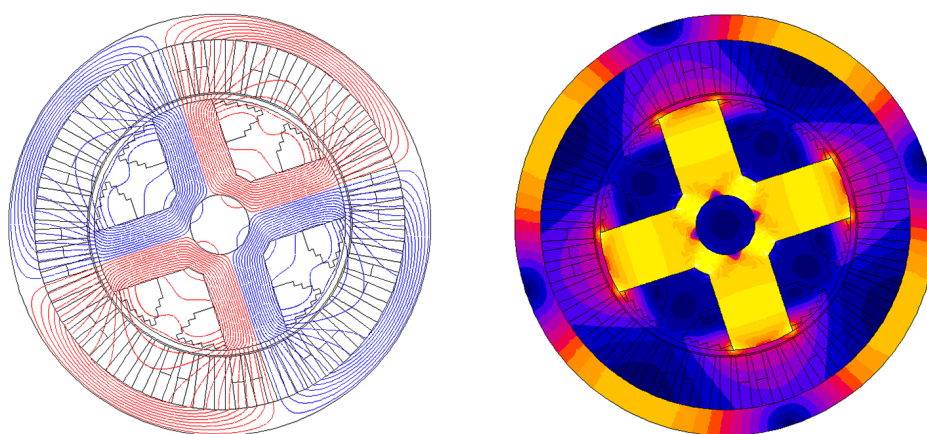
(b) Tensões induzidas aos terminais do estator e_0 para vários valores de corrente de excitação I_f .

Figura 5.6: Densidade de fluxo magnético no entreferro, B_m , e tensões induzidas aos terminais do estator, e_0 , para vários valores de corrente de excitação.

Como se pode observar pela figura 5.6, tanto a densidade de fluxo magnético no entreferro B_m (figura 5.6(a)), como as tensões induzidas aos terminais do estator (figura 5.6), não apresentam distorção causada pela saturação do material magnético. De referir que para correntes de excitação I_f suficientemente elevadas, ou no caso da culatra ser subdimensionada, é expectável que ocorra saturação magnética na culatra da máquina SAT. Contudo, neste caso, a corrente de excitação I_f máxima admitida pela fita SAT não é suficientemente elevada para saturar o material ferromagnético.

5.2.2 Característica em Vazio da Máquina com Rotor Ferromagnético

Tendo em conta o resultado do teste anterior, decidiu-se testar também a máquina com um rotor de material ferromagnético. O material utilizado para o rotor foi o mesmo que na culatra do estator, descrito na subsecção 4.2.3.1. As escalas utilizadas para as representações da figura 5.7 encontram-se no anexo C.



(a) Distribuição das linhas de fluxo magnético.

(b) Densidade de fluxo magnético.

Figura 5.7: Fluxo magnético no interior da máquina SAT com rotor ferromagnético. Escalas do modelo EF da máquina com rotor ferromagnético no anexo C.

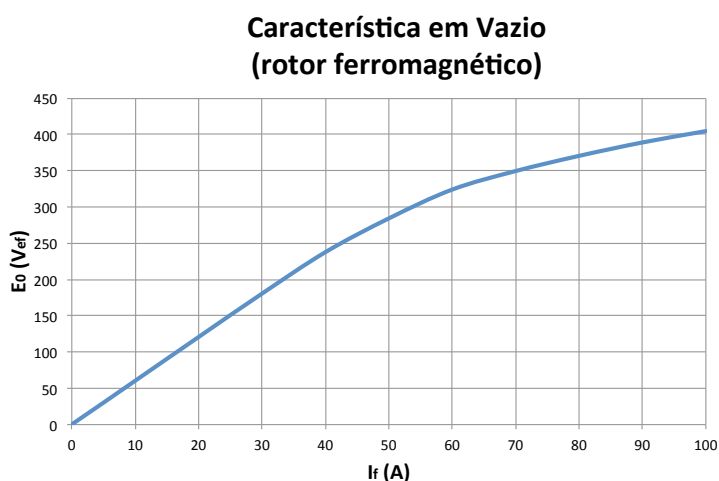


Figura 5.8: Característica em vazio da máquina síncrona SAT com rotor ferromagnético.

Como se pode observar, ao contrário da máquina com rotor de núcleo *air-core*, a força electromotriz E_0 induzida aos terminais da máquina SAT com rotor ferromagnético apresenta saturação magnética a partir de aproximadamente $I_f = 50$ A.

Apesar de existir saturação, as tensões induzidas no estator são mais elevadas que no caso da máquina *air-core*, que se deve ao facto da relutância magnética da máquina diminuir - o material ferromagnético tem uma permeabilidade magnética relativa μ_r muito superior à do ar. A relutância magnética \mathfrak{R} é dada por (Pyrhönen et al., 2008):

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{F}}{\Phi} \Leftrightarrow \quad (5.6)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}, \quad (5.7)$$

em que \mathfrak{F} é a força magnetomotriz (A.e), Φ é o fluxo magnético (Wb), l é o comprimento do circuito magnético (m), A é a área da secção transversal (m²) e μ é a permeabilidade magnética do material. A permeabilidade magnética é dada por:

$$\mu = \mu_r \mu_0, \quad (5.8)$$

em que μ_r é a permeabilidade magnética relativa (adimensional) e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade magnética relativa do vazio. Neste caso, há mais material ferromagnético, cuja permeabilidade magnética relativa é superior à do vazio ($\mu_r = 8000$), e daí a relutância magnética diminuir (no caso da máquina *aircore* $\mu_r = 1 \Leftrightarrow \mu = \mu_0$).

Na figura 5.9 pode ver-se as forças electromotrices (e_0) induzidas aos terminais do estator no ensaio em vazio e para vários valores de corrente de excitação I_f .

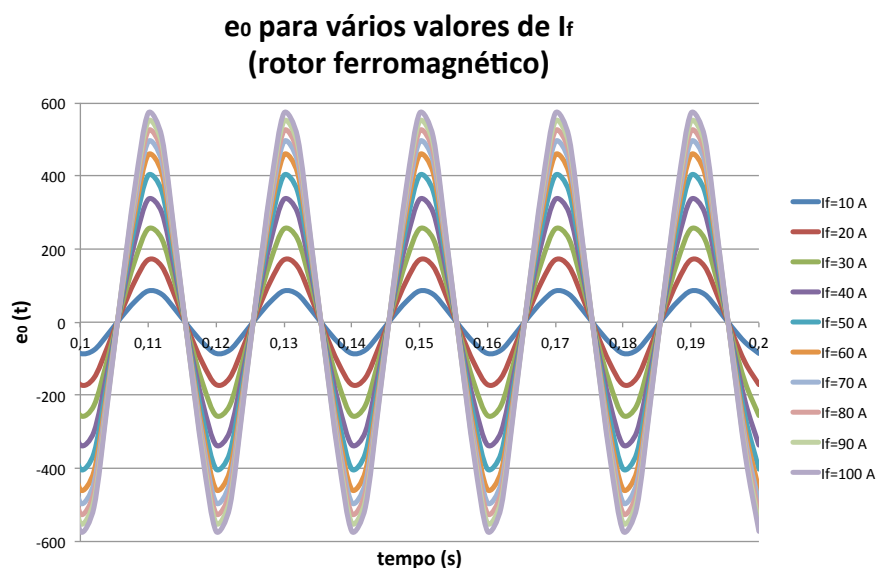


Figura 5.9: Força electromotriz e_0 induzida aos terminais do estator da máquina SAT com rotor ferromagnético obtida para vários valores de corrente de excitação I_f (ensaio realizado em vazio).

5. Resultados e Discussão

Como se pode observar, a amplitude das ondas não varia linearmente com o aumento da corrente de excitação. Por exemplo, as forças electromotrizes induzidas aos terminais do estator com os valores de corrente de excitação $I_f = 90$ A e $I_f = 100$ A encontram-se praticamente sobrepostas. Além disso, com o aumento de I_f , as ondas começam a distorcer, perdendo a forma sinusoidal.

5.3 Característica de Curto-Circuito

A característica de curto-circuito da máquina é obtida fazendo variar a corrente de excitação I_f com o estator da máquina curto-circuitado. Esta fornece o valor eficaz da corrente nas fases do estator, em função da corrente de excitação de campo I_f . O circuito utilizado foi o da figura 4.11, com os valores da tabela 4.6.

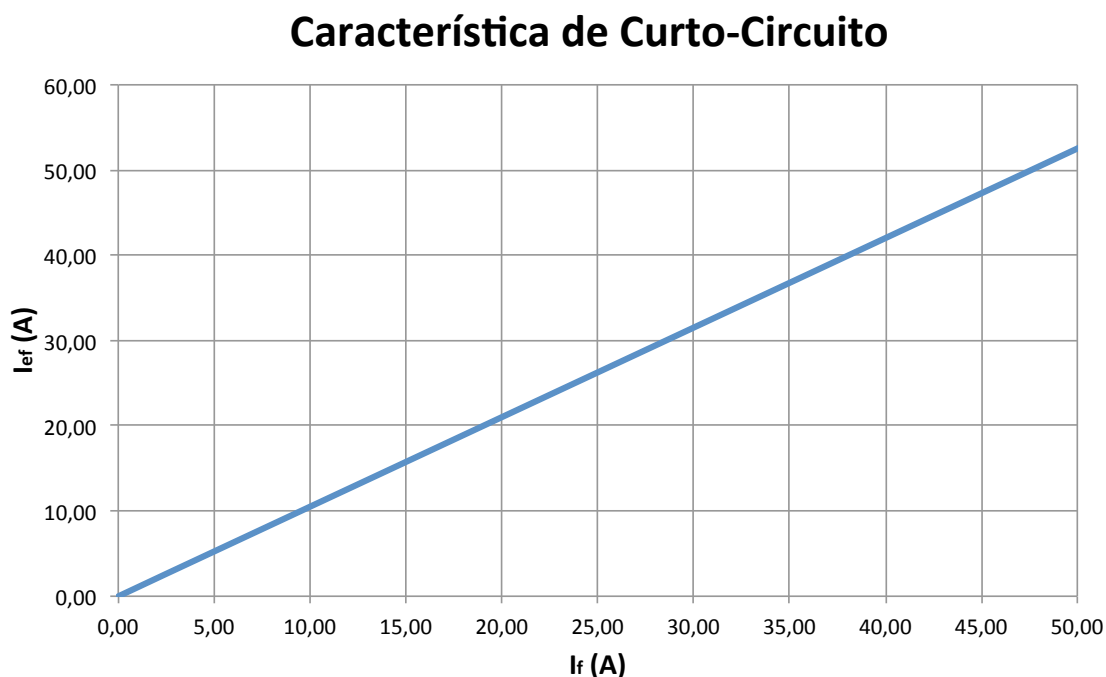


Figura 5.10: Característica de curto-circuito da máquina síncrona SAT.

Neste caso, e à semelhança do que acontece nas máquinas síncronas convencionais, a característica de curto-circuito é linear. A característica da figura 5.10 foi traçada somente até $I_f = 50$ A uma vez que para correntes de campo superiores, as correntes induzidas no estator são demasiado elevadas para os enrolamentos de cobre convencionais.

Durante os curto-circuitos verificou-se que a densidade de campo no entreferro (B_m) fica distorcida. Na figura 5.11(a) pode ver-se os vários B_m obtidos nos ensaios realizados para determinar a característica de curto-circuito e na figura 5.11(b) uma comparação entre o B_m obtido em vazio e em curto-circuito para uma corrente de excitação $I_f = 30$ A. Como se pode observar, no caso do curto-circuito, a forma de B_m é distorcida relativamente ao ensaio em vazio, ficando assimétrica.

5.4 Reactância Síncrona

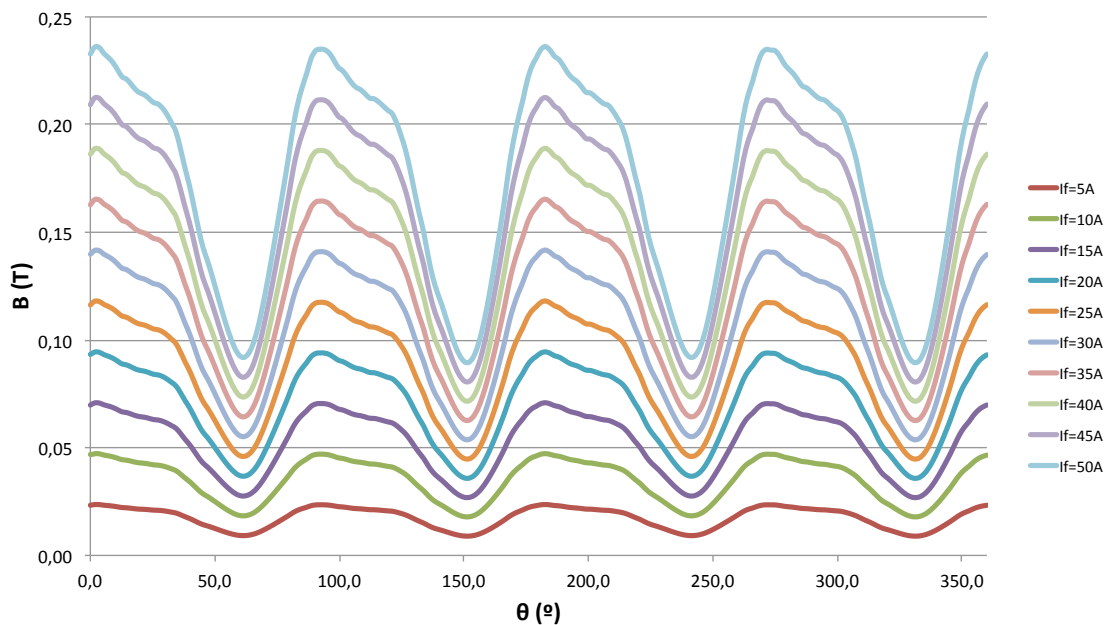
A reactância síncrona X_Δ é obtida através da divisão da tensão em vazio da máquina (E_0 , dada pela característica em vazio), pela corrente de curto-circuito (I_{CC} , dada pela característica de curto-circuito), i.e.:

$$X_\Delta = \frac{E_0}{I_{CC}} \quad (5.9)$$

O gráfico da reactância síncrona que foi obtido pode ser visto na figura 5.12. X_Δ mantém-se constante com o valor de $2,96 \Omega$ para toda a gama de corrente de excitação I_f testada (até $I_f = 50$ A). Este valor encontra-se muito abaixo dos valores típicos das máquinas síncronas convencionais, o que está em linha com os resultados obtidos por outros grupos de I&D (e.g., projectos AmSC e Siemens). Para efeitos de comparação, o valor de X_Δ da máquina convencional em que esta máquina se baseia tem o valor de 22Ω (Cedrat, 2006). A reactância síncrona da máquina SAT, ao contrário da reactância síncrona das máquinas convencionais, não começa a cair a partir de certo valor de corrente de excitação, uma vez que não existe a saturação do circuito magnético da máquina. Esta trata-se, portanto, de mais uma característica que difere a máquina síncrona SAT da máquina convencional.

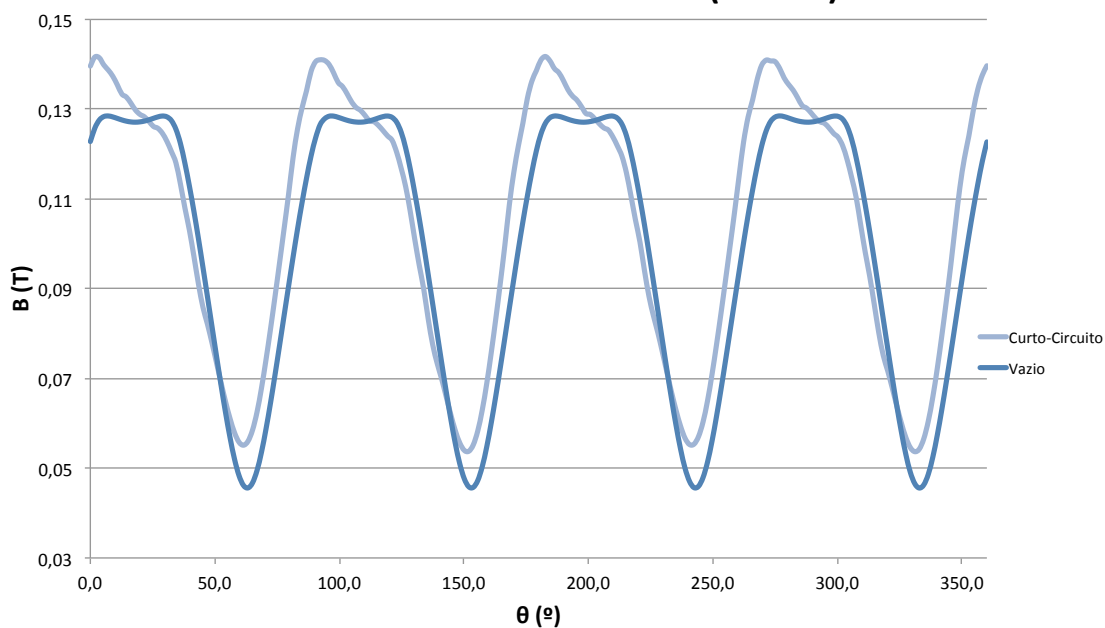
O ponto de funcionamento nominal da máquina síncrona convencional é determinado a partir do andamento da reactância síncrona, correspondendo ao ponto máximo de I_f para o qual a reactância síncrona se mantém contante (i.e., para o qual não existe saturação do circuito magnético). Contudo, como se vê pela figura 5.12, a reactância síncrona da máquina SAT apresenta um comportamento diferente da máquina síncrona clássica, não decaindo com a corrente I_f (pelo menos para os valores de corrente suportáveis pela fita SAT utilizada). Daqui, conclui-se que o ponto de funcionamento nominal da máquina é imposto não pela reactância síncrona, mas pela corrente máxima que pode circular nos enrolamentos de cobre estatóricos, ou seja, pelas suas perdas resistivas de Joule (P_J).

Densidade de Fluxo Magnético B no Entreferro



(a) Densidades de campo obtidas para vários valores de corrente de excitação.

Comparação entre os B_m 's obtidos com o ensaio em curto-circuito e em vazio ($I_f=30\text{ A}$)



(b) Comparação entre as densidades de campo em vazio e em curto-circuito.

Figura 5.11: Densidade de fluxo magnético no entreferro B_m em curto-circuito.

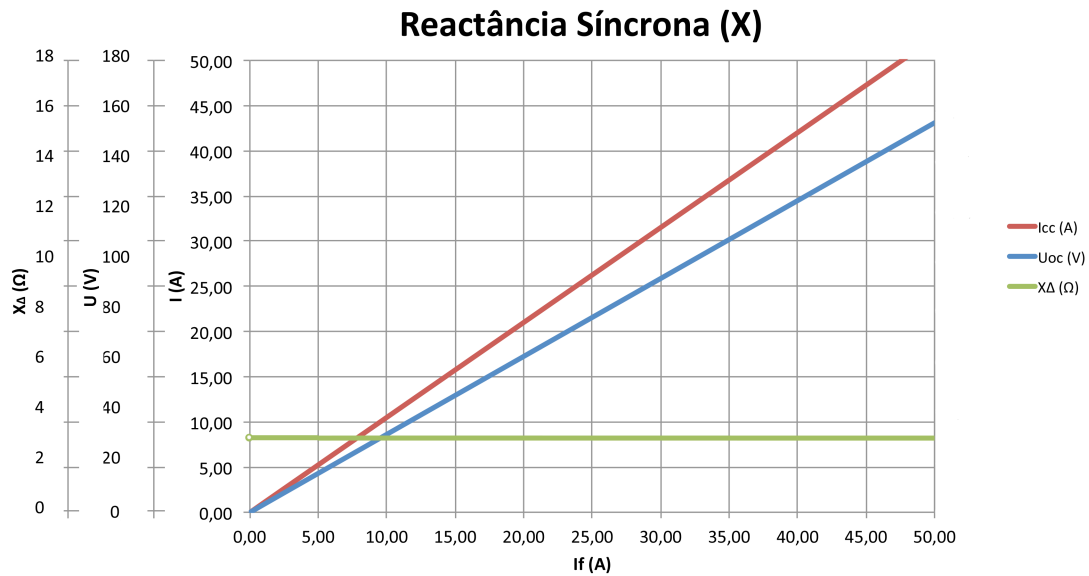


Figura 5.12: Reactância síncrona da máquina SAT.

5.5 Ensaio de Curto-Circuito Repentino

Nesta secção analisa-se a capacidade de reacção da máquina à aplicação de curto-circuitos repentinos, uma das áreas onde a literatura refere que a máquina SAT clássica apresenta maiores vantagens. Para simular os curto-circuitos repentinos foram utilizados os circuitos das figuras 4.12(a) e 4.12(b) com os valores da tabela 4.7. Os curto-circuitos foram aplicados com a máquina a operar com 30% da corrente de excitação nominal ($I_f = 80 \times 30\% = 24$ A), evitando a circulação de correntes demasiado elevadas nos enrolamentos estáticos.

5.5.1 Curto-circuito de uma Fase

Na figura 5.13 pode ver-se o que se passa com as correntes nas três fases quando o curto-circuito na fase 1 é estabelecido, na figura 5.15 o que acontece às tensões nas três fases e na figura 5.16 a tensão da fase 1 do estator em maior pormenor.

Como se pode observar no gráfico das correntes (figura 5.13), a única corrente que é afectada pelo curto-circuito é a da fase 1, a fase em que se dá o curto-circuito. As restantes permanecem praticamente nulas. Regista-se que a máquina tem capacidade de recuperação e que é bastante rápida a reagir, demorando $\sim 1,5$ ciclos (30 ms) a estabilizar.

Curto-Circuito na fase 1 do estator entre os 200 e os 400 ms

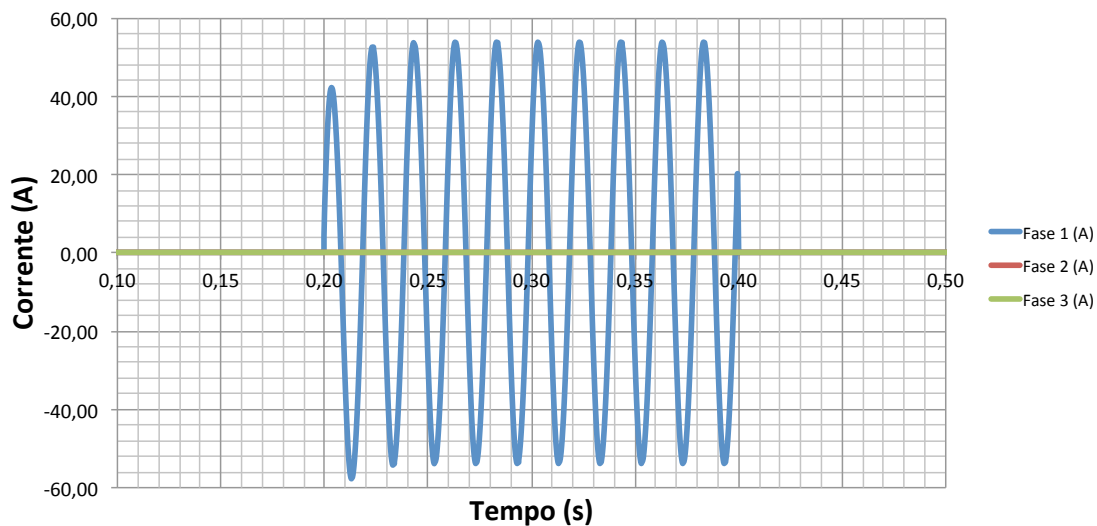


Figura 5.13: Curto-circuito na fase 1 entre os 200 e os 400 ms. Correntes nas três fases.

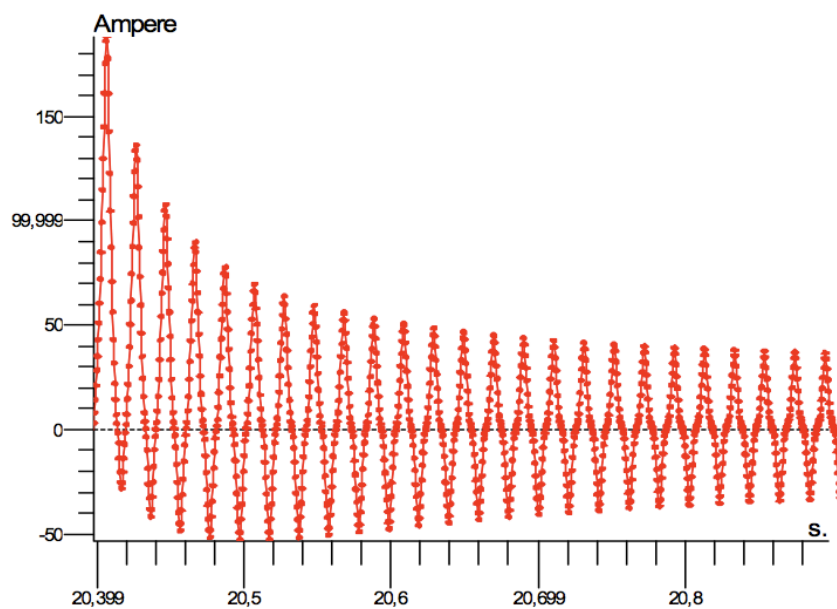


Figura 5.14: Curto-circuito da fase 1 aos 20,4 s. Corrente na fase da máquina convencional em que ocorre o curto-circuito. Retirado de (Cedrat, 2006).

Para efeitos de comparação, apresenta-se na figura 5.14 a reacção da máquina síncrona convencional também a um curto-circuito repentino, com a máquina a operar com 30% da corrente de excitação nominal. A corrente da máquina convencional leva cerca de 0,3 s a estabilizar, valor 10 vezes superior ao da máquina SAT. Fica assim verificada uma das principais vantagens referidas na literatura sobre a máquina síncrona SAT clássica, o seu comportamento muito rígido face a transitórios ou mudanças das condições de operação.

Na figura 5.15 pode ver-se o efeito que um curto-circuito aplicado à fase 1 do estator tem sobre as tensões da máquina, e na figura 5.16 a tensão da fase 1 em maior pormenor.



Figura 5.15: Curto-circuito da fase 1 entre os 200 e os 400 ms. Tensões nas três fases.

Como se pode observar, em termos de tensão, todas as fases são afectadas, sendo a mais afectada a fase 1 (fase em que se dá o curto-circuito). A tensão na fase 1 cai sensivelmente de 76 V de tensão máxima ($U_{\text{máx}}$) para ~ 44 V, uma baixa de tensão de aproximadamente 42,1%. As tensões das restantes fases caem de 76 V para ~ 72 V, o que corresponde a uma baixa de tensão de cerca de 5,3%. Na figura 5.16 pode ver-se a tensão da fase 1 da máquina em maior pormenor. No instante de tempo $t = 0,4$ s, instante em que o curto-circuito é desfeito, é possível verificar o tempo de reacção muito curto que a máquina tem, alterando quase instantaneamente os valores de tensão para os valores normais.

5.5.2 Curto-circuito das Três Fases

Da mesma forma que no ensaio anterior, o ensaio de curto-circuito repentino das três fases do estator da máquina SAT também foi realizado com uma corrente de excitação correspondente a 30% do valor nominal, i.e., 24 A.

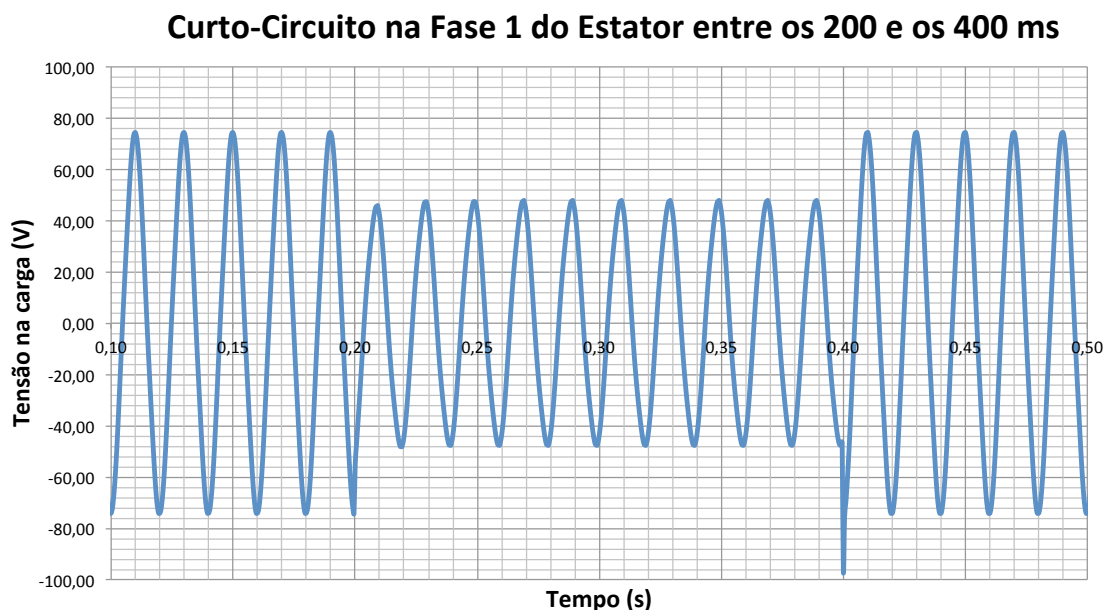


Figura 5.16: Curto-circuito da fase 1 entre os 200 e os 400 ms. Tensão da fase 1 em pormenor.

Na figura 5.17 pode ver-se o que se passa com as correntes nas três fases durante o curto-circuito das três fases e na figura 5.18 o que se passa com as tensões. Como se pode observar pela figura 5.17, as correntes passam de zero para aproximadamente 50 A em cerca de 1,5 ciclos (30 ms). A máquina comporta-se, à semelhança do ensaio anterior, de forma muito insensível a variações na carga, o que resulta num recuperação muito rápido do transitório provocado pelo curto-circuito, cancelando rapidamente a componente DC que surge na corrente.

Verifica-se novamente a capacidade de recuperação da máquina, e que leva novamente $\sim 1,5$ ciclos (30 ms) até a amplitude das ondas estabilizarem. Contudo, quando o curto-circuito é desfeito, aos 40 ms dá-se um pico bastante grande de tensão.

5.6 Influência do Escudo EM no Desempenho da Máquina

O escudo electromagnético é um componente muito importante da máquina síncrona SAT, responsável pela protecção das bobinas de fita SAT de fluxos magnéticos AC provenientes do estator. Contudo, este não poderá ser demasiado espesso, uma vez que este tem influência no B_m e logo no desempenho da máquina. Na figura 5.19 pode ver-se a influência que a espessura do escudo EM tem na densidade de fluxo magnético no entreferro e na figura 5.20 o fluxo magnético no rotor, para verificação da atenuação que os escudos de diferentes espessuras provocam nos campos AC.

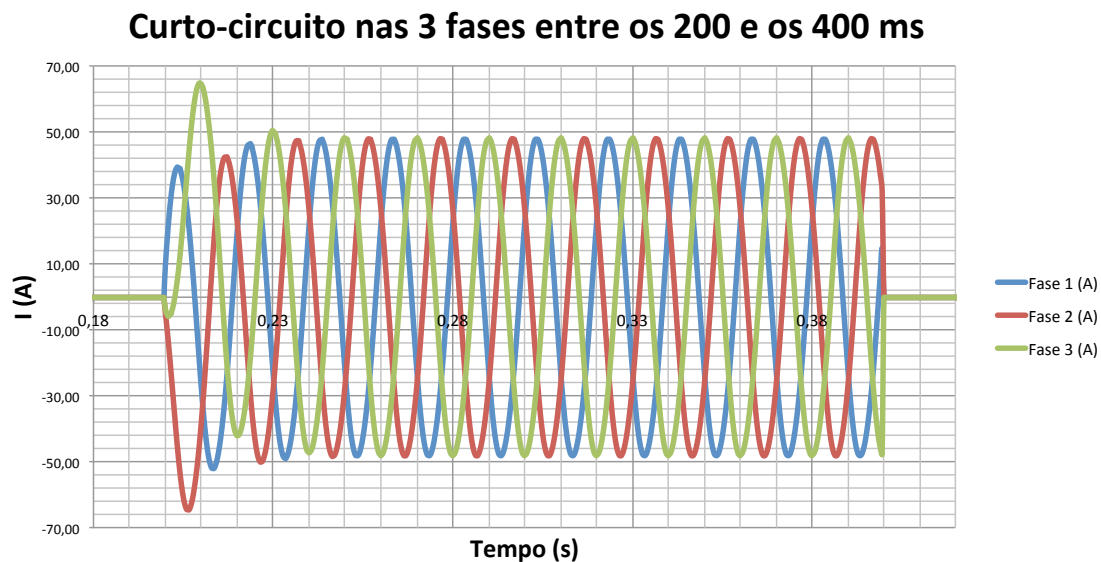


Figura 5.17: Curto-circuito das três fases entre os 200 e os 400 ms. Corrente nas três fases.

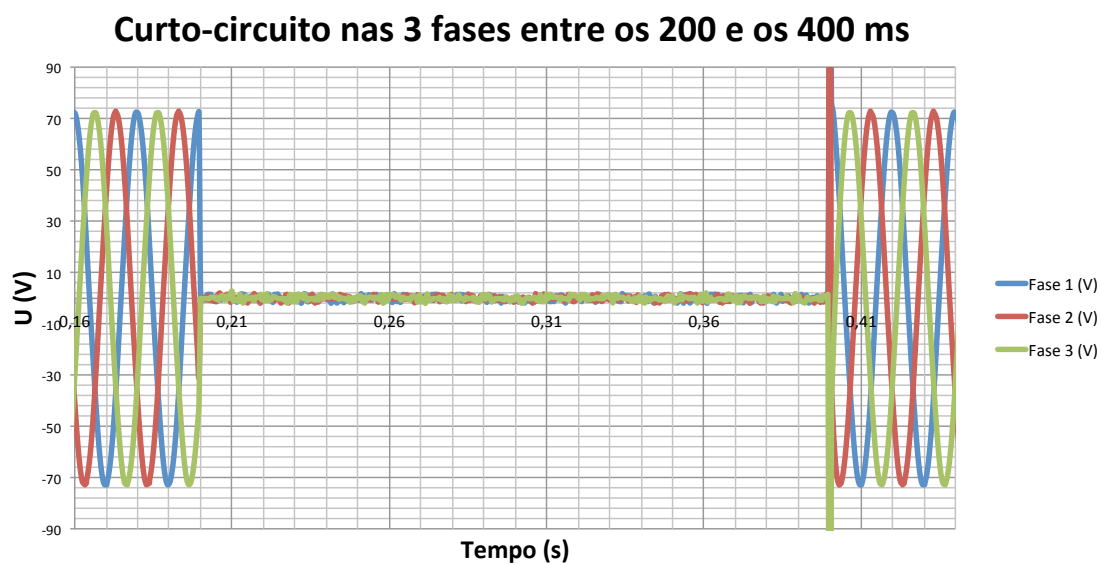


Figura 5.18: Curto-circuito das três fases entre os 200 e os 400 ms. Tensão nas três fases.

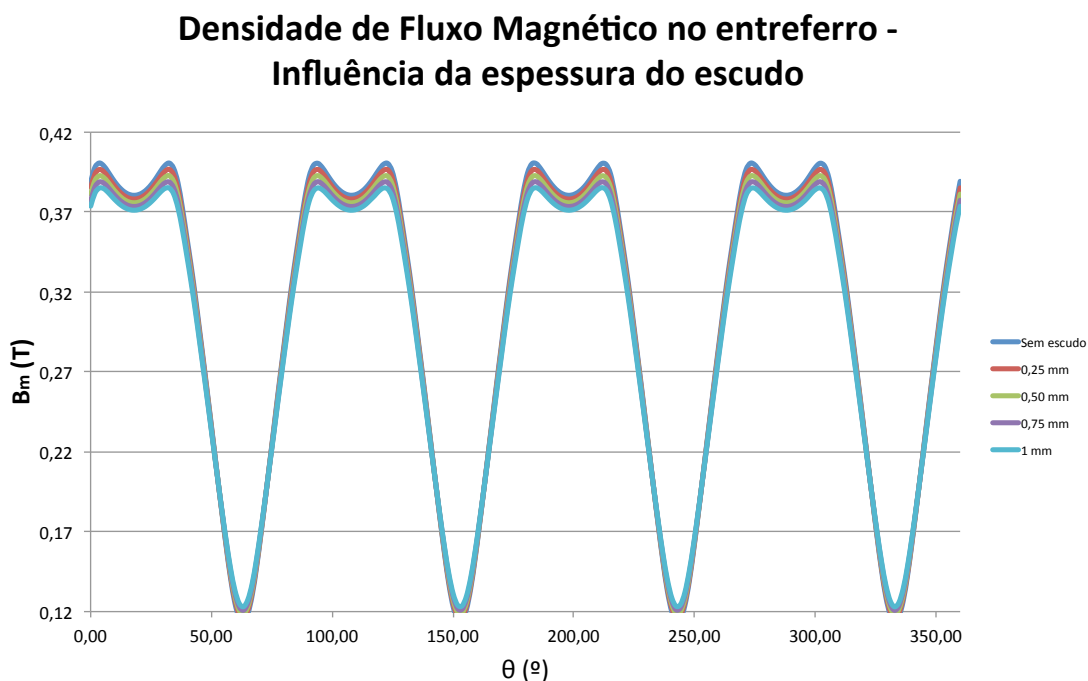


Figura 5.19: Influência do escudo na densidade de fluxo magnético no entreferro.

Como se pode observar, a densidade de fluxo magnético no entreferro é negativamente afetada pela espessura do escudo. Contudo, quanto mais espesso este for, mais atenuado fica a componente alternada do fluxo magnético incidente nas bobinas SAT. Este trata-se, por isso, de um compromisso entre desempenho e protecção do material SAT. Contudo, para o escudo com uma espessura de 1 mm já se nota a perda da periodicidade da onda, indicador de uma boa atenuação da componente harmónica do fluxo magnético (ver figura 5.20).

5.7 Ensaios da Máquina com Cargas de Diferentes Carácter

5.7.1 Ensaio da Máquina com Carga Resistiva

Nesta subsecção mostram-se os resultados obtidos nos testes realizados por simulação à máquina síncrona sujeita a uma carga puramente resistiva. No ensaio foram utilizados o circuito da figura 4.10 e os valores da tabela 4.5, à excepção dos valores das resistências de carga R_1 , R_2 e R_3 , que neste caso tinham o valor de $15,675 \Omega$. Na figura 5.21 podem ver-se as tensões e correntes registadas na carga resistiva. São todas perfeitamente sinusoidais, com frequência $f = 50 \text{ Hz}$ ($T = 20 \text{ ms}$).

Fluxo magnético nos enrolamentos SAT - Influência da espessura do escudo EM

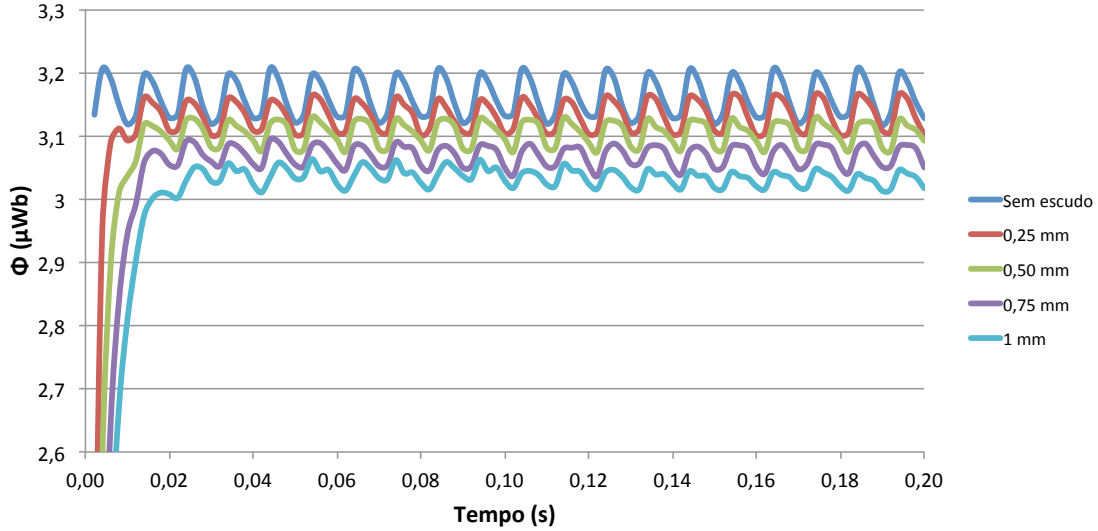


Figura 5.20: Influência do escudo no fluxo magnético na fita SAT.

A tensão na carga atinge o valor máximo de $U_{\text{máx}} = 198 \text{ V}$ e a corrente o valor máximo de $I_{\text{máx}} = 12,6 \text{ A}$. É também possível verificar que as duas se encontram em fase, como seria de esperar. Daqui resulta que:

$$S = \sqrt{3} U_c I_{\text{ef}} \Leftrightarrow S = 3 U_{\text{ef}} I_{\text{ef}} \Leftrightarrow \quad (5.10)$$

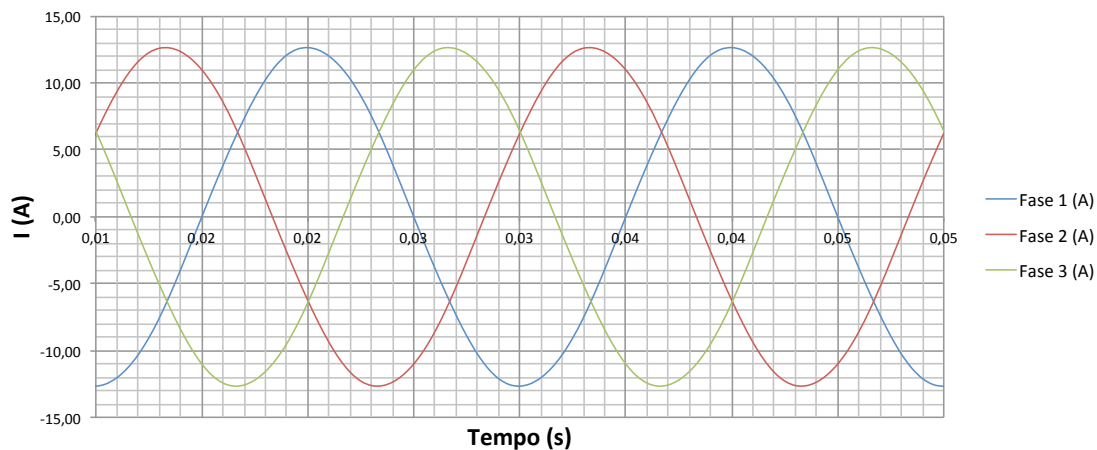
$$S = 3 \frac{U_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = 3750 \text{ VA} \quad (5.11)$$

Neste ensaio, a máquina SAT forneceu uma potência aparente $S_{\text{SAT}} = 3750 \text{ VA}$, valor superior à potência nominal da máquina convencional ($S_{\text{Conv}} = 3 \text{ kVA}$). Na figura 5.22 pode ver-se o binário da máquina em função do tempo. Observa-se um ligeiro *ripple*, de muito baixa amplitude, em torno de $T = 23,8 \text{ N.m}$. O valor negativo do binário deve-se ao facto da máquina estar a operar como gerador.

5.7.2 Ensaio da Máquina com Carga de Carácter Indutivo

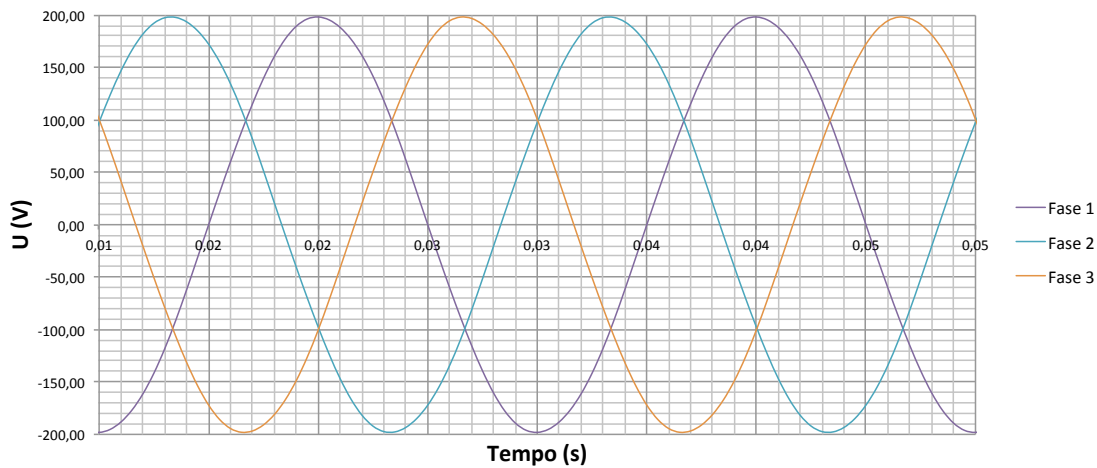
Na figura 5.23(a) pode ver-se o diagrama de Behn-Eschenburg para cargas de carácter indutivo, e na figura 5.23(b) o diagrama de Behn-Eschenburg para cargas indutivas simplificado. O diagrama Behn-Eschenburg é possível de simplificar, uma vez que nas máquinas síncronas a queda de tensão óhmica $r\bar{I}$ é muito pequena face à queda de tensão indutiva $jX_{\Delta}\bar{I}$. O diagrama de Behn-Eschenburg simplificado, da figura 5.23(b), é obtido para $r = 0$.

Correntes nas três fases (A)



(a) Correntes registadas no ensaio com carga resistiva.

Tensão (V)



(b) Tensões registadas no ensaio com carga resistiva.

Figura 5.21: Tensões e correntes registadas na carga resistiva.

Binário (Nm)

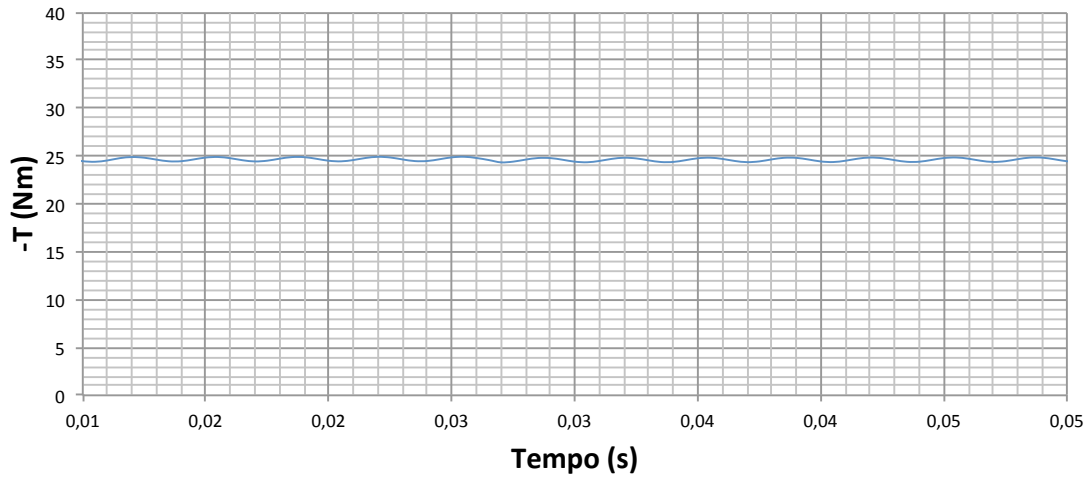


Figura 5.22: Binário registado no ensaio com carga resistiva.

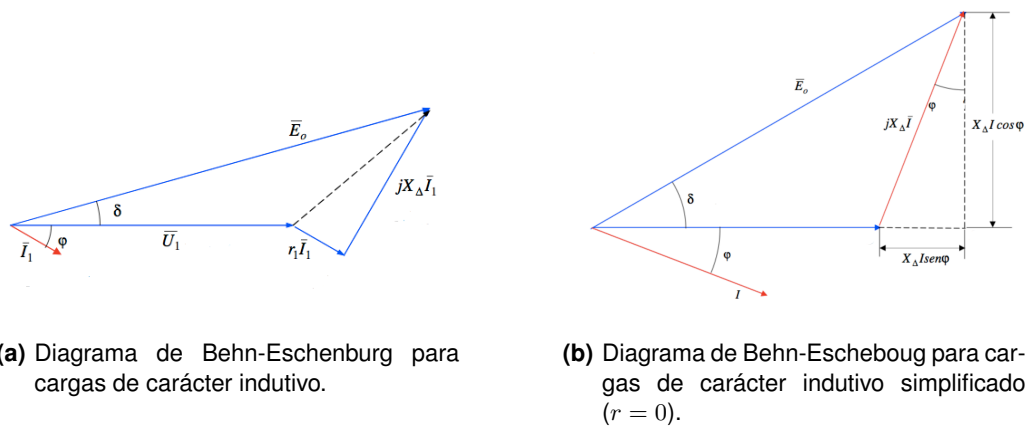


Figura 5.23: Diagrama de Behn-Eschenburg para cargas de carácter indutivo. Retirado de (Rodrigues, 2008).

5. Resultados e Discussão

Este ensaio foi realizado com o circuito da figura 4.13 e os valores da tabela 4.8. O valor das resistências de carga R_1 , R_2 e R_3 tinham o valor de 50Ω e as indutâncias L_5 , L_6 e L_7 o valor de 100 mH. Na figura 5.24(a) mostram-se as forças electromotrizes induzidas no estator, na figura 5.24(b) as tensões na carga e na figura 5.24(c) as correntes.

A partir dos valores eficazes da tensão e corrente na carga e da corrente pode-se calcular o valor da potência aparente. Neste caso, a tensão na carga tem o valor de $U_{ef} = 199 \text{ V}$ e a corrente $I_{ef} = 2,20 \text{ A}$. Resulta daqui:

$$S = \sqrt{3} U_c I_{ef} \Leftrightarrow S = 3 U_{ef} I_{ef} \Leftrightarrow \quad (5.12)$$

$$S = 3 \times 199 \times 2,2 \Leftrightarrow S = 1313,4 \text{ VA} \quad (5.13)$$

Na figura 5.25 pode ver-se uma representação gráfica da corrente e tensão registadas na carga, onde se observa um desfasamento, correspondente ao ângulo φ . O desfasamento medido entre a corrente \bar{I} e a tensão \bar{U} na carga foi $\varphi = -36^\circ$. O ângulo de carga δ , formado entre \bar{E}_0 e \bar{U} , foi calculado com base no diagrama de Behn-Eschenburg simplificado (figura 5.23(b)), por ser demasiado pequeno para ser determinado com exactidão graficamente, através da seguinte expressão:

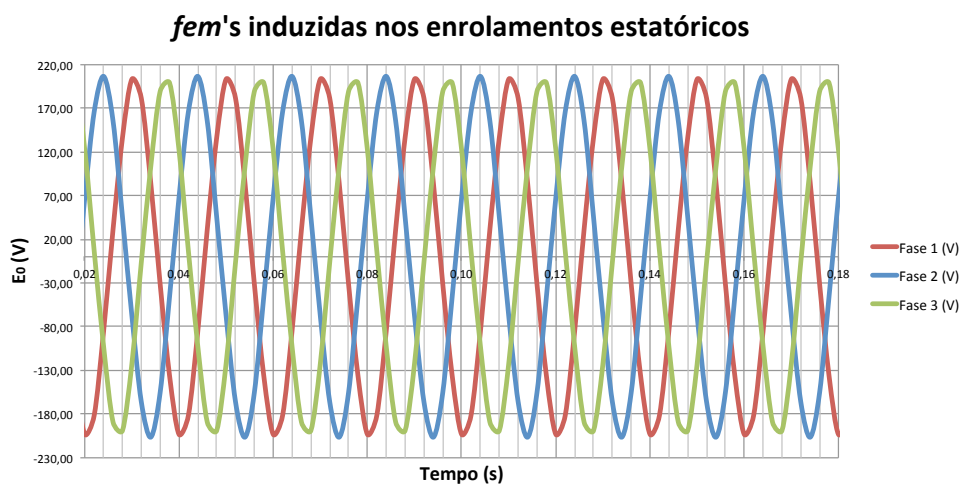
$$\cos \delta = \frac{U + X_\Delta I \sin \varphi}{E_0} \Leftrightarrow \quad (5.14)$$

$$\delta = \cos^{-1}\left(\frac{U + X_\Delta I \sin \varphi}{E_0}\right) \Leftrightarrow \delta = 5,9^\circ \quad (5.15)$$

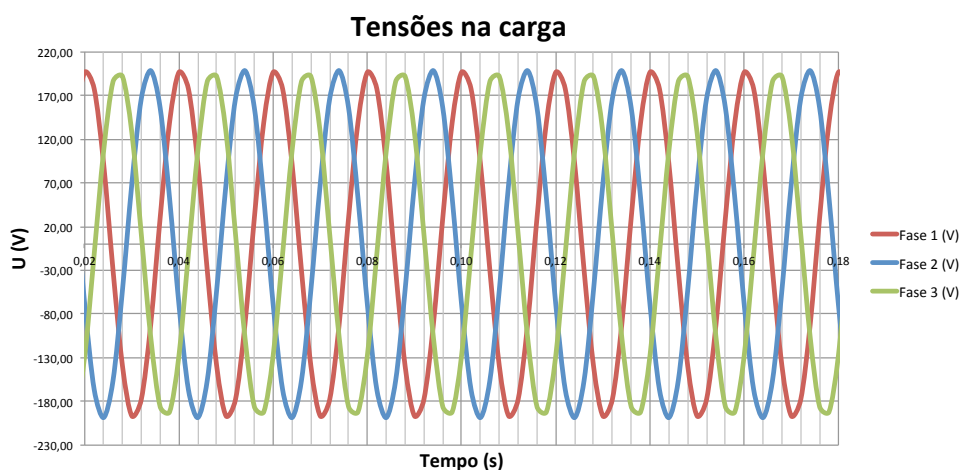
O ângulo de carga formado entre \bar{E}_0 e \bar{U} tem o valor de $\delta = 5,9^\circ$. Ficou assim mais uma vez demonstrada uma característica que a literatura disponível sobre a máquina síncrona supercondutora refere: a operação da máquina síncrona SAT a ângulos de carga muito baixos.

5.8 Análise Espectral da Energia Produzida

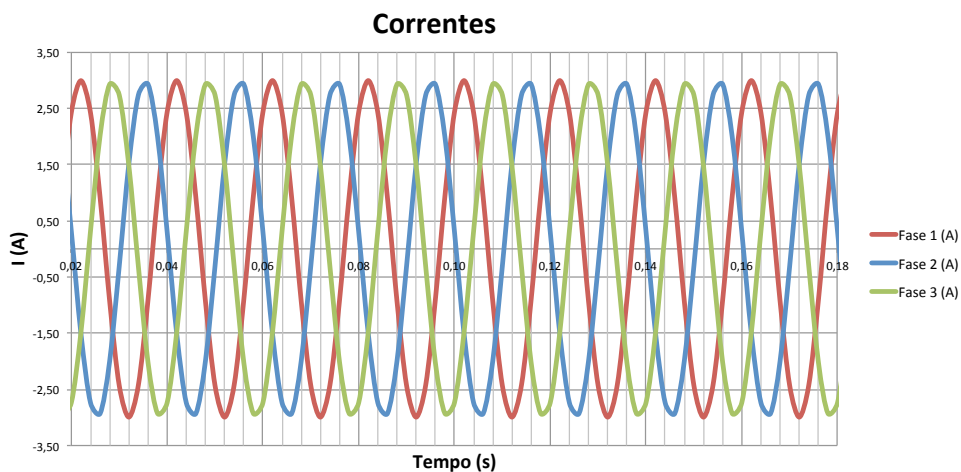
Para analisar a energia produzida pelo gerador síncrono SAT recorreu-se à ferramenta de análise espectral do *software* Flux2D. O espectro obtido para a tensão produzida pela máquina supercondutora está na figura 5.26(b) e, na figura 5.26(a) a análise espectral de uma onda de corrente produzida pela máquina síncrona convencional.



(a) Forças electromotrizes induzidas nos enrolamentos estáticos.



(b) Tensões na carga.



(c) Correntes nas três fases.

Figura 5.24: Fem's, tensões e correntes registadas no ensaio com carga RL.

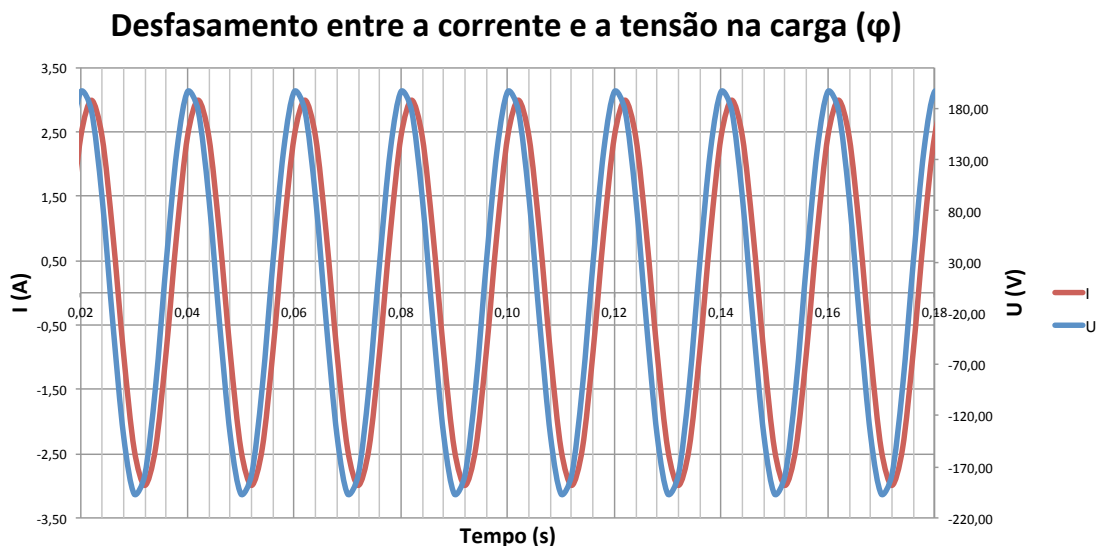
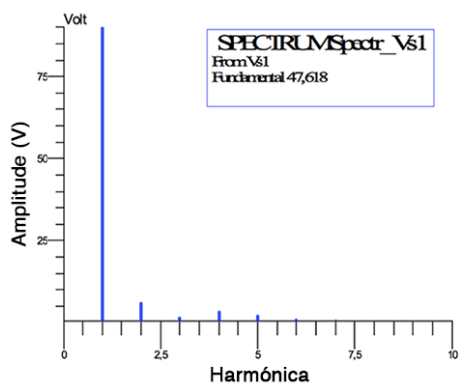
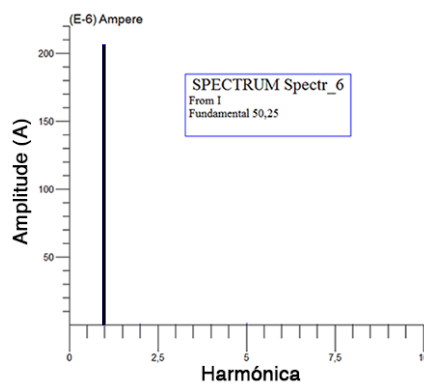


Figura 5.25: Desfasamento entre a tensão U e corrente I na carga RL.



(a) Análise espectral da tensão produzida pela máquina síncrona convencional. Retirado de (Cedrat, 2006).



(b) Análise espectral da corrente produzida pela máquina síncrona SAT.

Figura 5.26: Comparação entre os espectros das ondas produzidas pela máquina síncrona convencional e pela máquina síncrona SAT

A máquina convencional tem uma componente fundamental de 47,62 Hz e a máquina SAT de 50,25 Hz, valores que estão assinalados respectivamente nas figuras 5.26(a) e 5.26(b). Além disto, também é possível verificar que a presença de harmónicas de maior ordem é maior na máquina convencional.

5.9 Conclusões

Neste capítulo apresentaram-se os resultados de alguns dos testes realizados por simulação ao modelo da máquina síncrona com excitação de campo em materiais supercondutores de alta temperatura. A partir dos resultados obtidos por simulação ficaram confirmadas muitas das características comuns às publicações feitas pelos projectos de I&D de máquinas síncronas SAT.

As principais características a destacar neste tipo de máquina estão relacionadas com a sua baixa reactância síncrona (X_{Δ}), que resultam numa máquina com um comportamento muito insensível a variações da carga, que é muito rápida a reagir a transitórios (ver 5.5 - Ensaio de Curto-Circuito Repentino).

Ficou demonstrado que é possível atingir densidades de fluxo magnético superiores às das máquinas convencionais, que se encontram limitadas pela saturação dos materiais ferromagnéticos. Apesar de ser previsível que a máquina SAT terá uma densidade de potência superior à máquina convencional, uma vez que se obtêm densidades de fluxo magnético superiores, esta ficou por provar. Isto deveu-se ao facto do número de espiras dos enrolamentos estatóricos ter de ser aumentado, de forma a obterem-se forças electromotrizes induzidas semelhantes às da máquina convencional. Não se tendo certeza do método utilizado para aumentar o número de espiras dos enrolamentos estatóricos (por via de diminuição do diâmetro do fio utilizado ou por via de aumento da área da secção das cavas do estator), ficou por determinar a capacidade de transporte de corrente destes enrolamentos, e assim a potência nominal da máquina.

Outro aspecto bastante interessante, onde se provou que a máquina síncrona SAT também apresenta vantagens, foi no campo da qualidade da energia produzida, uma vez que o gerador síncrono supercondutor apresenta menor conteúdo harmónico (de harmónicas de ordem superior à fundamental) que a máquina síncrona convencional, que por si só já é conhecida por produzir energia eléctrica de excelente qualidade (Boldea, 2005).

6

Conclusões

Conteúdo

6.1	Conclusões	100
6.2	Trabalho Futuro	101

6. Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões que se puderam retirar da elaboração deste trabalho. Ficou demonstrada uma proposta para um gerador síncrono supercondutor de pequenas dimensões, que foi projectado com recurso a um programa de elementos finitos. O objectivo inicial deste trabalho passava pela construção do gerador, e não apenas pelo projecto. Contudo, devido a restrições de ordem financeira, a construção do mesmo não foi possível.

6.1 Conclusões

Ficaram demonstradas diversas questões de projecto relacionadas com a construção deste tipo de máquinas e foram realizadas as simulações necessárias à determinação das características principais das máquinas síncronas, i.e., a característica em vazio, a característica de curto-circuito e a determinação da reactância síncrona da máquina. Os resultados obtidos encontram-se em linha com as publicações feitas na área, tendo sido obtida uma máquina com muito baixa reactância síncrona, que resulta num comportamento muito insensível a variações da carga e operação a ângulos de carga muito reduzidos. Outra das principais vantagens está relacionada com a energia produzida, que tem muito baixo conteúdo harmónico de ordem superior à harmónica fundamental (que neste modelo tem o valor de 50,25 Hz). É possível também deduzir que a massa desta máquina é menor que a massa da máquina original, uma vez que o volume foi mantido (foram mantidas todas as principais dimensões da máquina) e o ferro do rotor foi excluído. A diminuição de massa é especialmente interessante à área da geração eólica, onde geradores eléctricos mais pequenos e compactos é algo que é muito desejável.

Um dos pontos que ficaram por provar está relacionado com a densidade de potência superior deste tipo de máquinas, uma vez que os enrolamentos estatóricos foram alterados para que esta máquina operasse aos mesmos níveis de tensão da máquina síncrona original. Foi tido também o cuidado de elaborar o modelo de elementos finitos de forma a ser o mais flexível que fosse possível, possibilitando a alteração dos parâmetros principais da máquina de forma muito simples.

6.2 Trabalho Futuro

O trabalho futuro passará, numa primeira fase, pela definição da melhor arquitectura para os enrolamentos SAT, tendo em conta com os recursos disponíveis no Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEE) e, numa fase posterior, pela construção do próprio gerador SAT.

Se possível, seria interessante construir ambos os modelos da máquina (com rotor ferromagnético e com rotor *air-core*) para efeitos de comparação. As principais vantagens do primeiro é o facto de reduzir a quantidade de material supercondutor necessário e o facto de não obrigar a alterações dos enrolamentos estatóricos. No entanto, do ponto de vista científico, será mais interessante a construção da máquina de rotor *air-core*, que se prevê que traga as maiores vantagens face às máquinas convencionais, mas que é de construção mais cara.

6. Conclusões

Bibliografia

- Abrahamsen, A. B., Mijatovic, N., Seiler, E., Zirngibl, T., Træholt, C., Nørgård, P. B., Pedersen, N. F., Andersen, N. H., and Østergård, J. (2010). Superconducting wind turbine generators. *SUPERCONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY* 23.
- AmSC (2012). Copper laminated amperium® wire - second generation hts wire for power-dense coil applications. available in 4.8 mm and 12 mm width.
- Boldea, I. (2005). *The Electric Generators Handbook. Synchronous Generators*. CRC.
- Buzea, C. and Yamashita, T. (2001). Review of superconducting properties of mgb2. *Superconductors, Science & Technology*.
- Cedrat (2006). *CAD Package for Electromagnetic and Thermal Analysis using Finite Elements*.
- Eckels, P. W. and Snitchler, G. (2004). 5 mw high temperature superconductor ship propulsion motor design and test results. *Electric Machines Technology symposium*.
- EU (2012). The eu climate and energy package - 20/20/20 targets. http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm.
- EWEA (2012). The european wind energy association. <http://www.ewea.org/>.
- Fealey, J. A., Jones, W. D., Keim, T. A., and T.E.Laskaris (1985). Comprehensive test and evaluation of a 20 mva superconducting generator. *IEEE Power Engineering Review*.
- Frank, M., Frauenhofer, J., Gromoll, B., van Haßelt, P., Nick, W., Nerowski, G., Neumüller, H.-W., Häfner, H.-U., and Thummes (2004). Thermosyphon cooling system for the siemens 400kw hts synchronous machine. *AIP, Conference Proceedings*.
- Frauenhofer, J., Grundmann, J., Klaus, G., and Nick, W. (2008). Basic concepts, status, opportunities, and challenges of electrical machines utilizing high-temperature superconducting (hts) windings. *Journal of Physics: Conference Series* 97.
- Gamble, B., Snitchler, G., and MacDonald, T. (2011). Full power test of a 36.5 mw hts propulsion motor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, , Vol. 21, No. 3.
- Gieras, J. F. (2008). *Advancements in Electric Machines*. Springer.

Bibliografia

- Gieras, J. F. (2009). Superconducting electrical machines state of the art. *IEEE*.
- H.Sugimoto, T.Nishikawa, T.Tsuda, Y.Hondou, and Y.Akita (2006). Trial manufacture of liquid nitrogen cooling high temperature superconductivity motor. *Journal of Physics: Conference Series 43. 7th European Conference on Applied Superconductivity*.
- Iwakuma, M., Hase, Y., Satou, T., Tomioka, A., Konno, M., Iijima, Y., Saitoh, T., Yamada, Y., Izumi, T., and Shiohara, Y. (2008). Development of a 7.5 kw ybco superconducting synchronous motor. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 18, NO. 2*.
- Iwakuma, M., Hase, Y., Satou, T., Tomioka, A., Konno, M., Iijima, Y., Saitoh, T., Yamada, Y., Izumi, T., and Shiohara, Y. (2009). Production and test of a rebco superconducting synchronous motor. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 19, NO. 3*.
- Iwakuma, M., Tomioka, A., Konno, M., Hase, Y., Satou, T., Iijima, Y., Saitoh, T., Yamada, Y., Izumi, T., , and Shiohara, Y. (2007). Development of a 15 kw motor with a fixed ybco superconducting field winding. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 17, NO. 2*.
- Iwasa, Y. (2009). *Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational Issues*. Springer, 2nd edition edition.
- Jiashan, B. and Jian, Q. (1982). A new formula for calculating the inductance of a superconducting strip transmission line. *AIP - Journal of Applied Physics*.
- Kalsi, S., Gamble, B., Snitchler, G., and Ige, S. (2006a). The status of hts ship propulsion motor developments. *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*.
- Kalsi, S., Madura, D., MacDonald, T., Ingram, M., and Gran, I. (2006b). Operating experience of a superconductor dynamic synchronous condenser. *IEEE*.
- Kalsi, S., Madura, D., and Ross, M. (2005). Performance of superconductor dynamic synchronous condenser on an electric grid. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China*.
- Kalsi, S. S. (2011). *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*. OHN WILEY & SONS, INC.
- Kalsi, S. S., Madura, D., Snitchler, G., Ross, M., Voccio, J., and Ingram, M. (2007). Discussion of test results of a superconductor synchronous condenser on a utility grid. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 17, NO. 2*.
- Keim, T., Laskaris, T., Fealey, J., and Rios, P. (1985). Design and manufacture of a 20 mva superconducting generator. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*.

- Klaus, G., Wilke, M., Frauenhofer, J., Nick, W., and Neumüller, H.-W. (2007). Design challenges and benefits of hts synchronous machines. *IEEE*.
- Kummeth, P., Frank, M., Nick, W., Nerowski, G., and Neumüller, H.-W. (2005). Development of synchronous machines with hts rotor. *Physica C: Superconductivity*.
- Lesser, M. and Müller, J. (2009). Generating the future of offshore wind power. *Renewable Energy World Conference and Exhibition, Cologne, Germany*. Zenergy Power, GmbH.
- Li, X., Rupich, M. W., Thieme, C. L. H., Teplitsky, M., Sathyamurthy, S., Thompson, E., Buczek, D., Schreiber, J., DeMoranville, K., Lynch, J., Inch, J., Tucker, D., Savoy, R., , and Fleshler, S. (2009). The development of second generation hts wire at american superconductor. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 19, NO. 3*.
- Luiz, A. M., editor (2011). *Application of High- T_c Superconductivity*. InTech.
- Nakamura, T., Miyake, H., Ogama, Y., Morita, G., Muta, I., and Hoshino, T. (2006). Fabrication and characteristics of hts induction motor by the use of bi-2223/ag squirrel-cage rotor. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 16, NO. 2*.
- Nakamura, T., Ogama, Y., and Miyake, H. (2007a). Performance of inverter fed hts induction-synchronous motor operated in liquid nitrogen. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 17*.
- Nakamura, T., Ogama, Y., Miyake, H., Nagao, K., and Nishimura, T. (2007b). Novel rotating characteristics of a squirrel-cage-type hts induction/synchronous motor. *IOP PUBLISHING, SUPERCONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY 20*.
- NationMaster (2004). Electric power transmission and distribution losses. percentage of output by country. http://www.nationmaster.com/graph/ene_ele_pow_tra_and_dis_los_of_out-power-transmission-distribution-losses-output.
- Navigant (2009). Projection of the commercialization timeline for utility/energy hts applications. <http://www.navigantconsulting.com>. Dispute Consulting & Business Advisory Consulting Firm, BURLINGTON, MA (U.S.).
- Nick, W., Frank, M., Klaus, G., Frauenhofer, J., and Neumüller, H.-W. (2007). Operational experience with the world's first 3600 rpm 4 mva generator at siemens. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17*.
- Nick, W., Frank, M., Kummeth, P., Rabbers, J. J., Wilke, M., and Schleicher, K. (2010). Development and construction of an hts rotor for ship propulsion application. *Journal of Physics: Conference Series 234*.

Bibliografia

- Nick, W., Grundmann, J., and Frauenhofer, J. (2012). Test results from siemens low-speed, high-torque hts machine and description of further steps towards commercialisation of hts machines. *Physica C: Superconductivity*.
- Nick, W., Nerowski, G., Neumüller, H.-W., Frank, M., van Hasselt, P., Frauenhofer, J., and Steinmeyer, F. (2002). 380 kw synchronous machine with hts rotor windings – development at siemens and first test results. *Physica C: Superconductivity*.
- Ohsaki, H., Terao, Y., and Sekino, M. (2010). Wind turbine generators using superconducting coils and bulks. *Journal of Physics: Conference Series 234 - 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 09)*, IOP Publishing.
- Pina, J. (2010). *Tecnologias dos Materiais para Energia*. PhD thesis, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Pronto, A. M. G. (2010). *Análise de perdas em sistemas de energia que empregam materiais supercondutores de alta temperatura*. PhD thesis, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Pyrhönen, J., Jokinen, T., and Hrabovcová, V. (2008). *Design of Rotating Electrical Machines*.
- Rodrigues, A. L. (2008). Material das aulas teóricas da disciplina de electrotecnia teórica. FCT - UNL.
- UN (1998). United nations framework convention on climate change. In *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- UpWind (2011). Design limits and solutions for very large wind turbines - a 20 mw turbine is feasible. Technical report, Sixth Framework Programme (FP6) - European Research and Technological Development, EU.
- Vajda, I., Szalay, A., Gobl, N., Meerovich, V., and Sokolovsky, V. (1999). Requirements for the industrial application of superconducting rotating electrical machines. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, 9:1225–1228.
- Winn, P. M. (2008). Torque transmission assembly for superconducting rotating machines.
- Woodruff, S., Boenig, H., Bogdan, F., Fikse, T., Petersen, L., Sloderbeck, M., Snitchler, G., and Steurer, M. (2005). Testing a 5 mw high-temperature superconducting propulsion motor. *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*.



Brochura da fita AmSC SAT 2G com Estabilizador de Cobre

Copper Laminated Amperium[®] Wire

Second generation HTS wire for power-dense coil applications.
Available in 4.8 mm and 12 mm width

AMSC's copper laminated Amperium wire conducts more than 100 times the electrical current of copper wire of similar dimensions. Used in power dense coils for synchronous motors, generators and magnets among other applications, it can dramatically reduce the size and weight of large-scale electrical equipment. AMSC's copper laminated high temperature superconductor (HTS) wire provides significantly greater power throughput and efficiency as well as high strength and stability with outstanding bend tolerance.

Responding to current demand

Amperium wire has changed the industry with its revolutionary ability to conduct over 100 times the electrical current (amperage) of conventional wire. As an example, just one of these ultra-thin HTS wires can carry enough power to serve the needs of approximately 10,000 US homes.

Reducing the footprint and costs of large-scale equipment

The high power density of Amperium wire dramatically reduces the size, weight and often the overall cost of large-scale electrical equipment while also increasing efficiency for applications such as magnets and wind generators when compared with systems based on traditional copper wire.

Ideal for all coil applications

Coils made utilizing Amperium wire can be effectively applied to ship propulsion motors and generators, wind turbine generators, transformers and SMES and degaussing systems for naval ships.

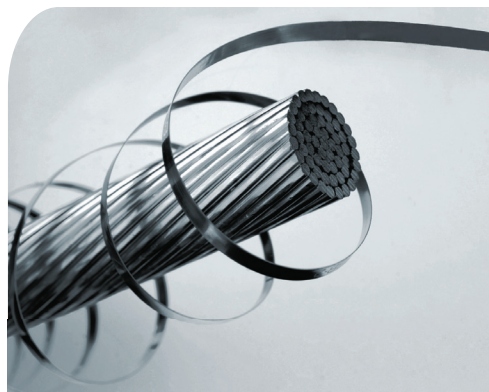
Enhanced strength and electrical stability

The copper laminated wire features solder fillets at the edges, which assure hermeticity, high C-axis strength for epoxy encapsulated coils and enhanced electrical stability – for maximum performance and reliability.

Various widths available

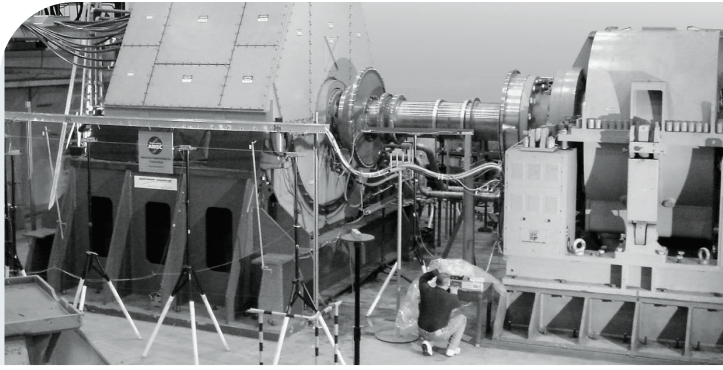
Manufactured utilizing a high-volume and proprietary process, AMSC's copper laminated Amperium wire is available in two different widths: 4.8 mm and 12 mm. The extra wide, high current 12 mm design reduces wire length requirements and coil stack count.

- High strength and stability
- Solder fillets at edges for high c-axis strength and enhanced electrical stability
- Robust product with outstanding bend tolerances



AMSC's Amperium wire wound around a copper bundle with equivalent current carrying capability. Amperium wire conducts more than 100 times the electrical current of equivalent sized copper wire.





Second generation HTS wire for power dense coil applications

AMSC 36.5 MW, 120 rpm ship propulsion motor

MECHANICAL PROPERTIES

	4.8 mm	12 mm
Average thickness:	0.18 mm - 0.22 mm	0.18 mm - 0.22 mm
Minimum width:	4.70 mm	11.9 mm
Maximum width:	4.95 mm	12.3 mm
Minimum double bend diameter (RT):	30 mm ⁱ	30 mm ⁱ
Minimum double bend diameter for spliced wire (RT):	100 mm ⁱ	100 mm ⁱ
Maximum rated tensile stress (RT):	150 MPa ⁱ	150 MPa ⁱ
Maximum rated wire tension (RT):	12 kg ⁱ	30 kg ⁱ
Maximum rated tensile strain (77K):	0.3% ⁱ	0.3% ⁱ
Maximum rated C-Axis stress:	20 MPa ⁱ	20 MPa ⁱ

ELECTRICAL PROPERTIES

	4.8 mm	12 mm
Minimum amperage (I _c) ⁱⁱ	Average Engineering current density - J _e (A/cm ²) ⁱⁱⁱ	Average Engineering current density - J _e (A/cm ²) ⁱⁱⁱ
70 A	7,200 A/cm ²	—
80 A	8,200 A/cm ²	—
90 A	9,300 A/cm ²	—
100 A	10,300 A/cm ²	—
≥100 A	Contact factory	—
175 A	—	7200 A/cm ²
200 A	—	8200 A/cm ²
225 A	—	9300 A/cm ²
250 A	—	10400 A/cm ²
≥250 A	—	Contact factory

Spliced wire available in long lengths

Insulation options: Contact factory

Certificate of Conformance provided.

Certificate of Analysis optionally available. Contact factory.

Leaders and trailers optionally available. Contact factory.

ⁱ Greater than 95% I_c retention

ⁱⁱ 77K, self-field, 1 μV/cm, 1 m resolution

ⁱⁱⁱ J_e is based on average thickness and width

B

Escalas da Densidade de Fluxo Magnético e das Linhas de Fluxo Magnético da Máquina *Air-core*

Escala de cor da densidade de fluxo B
da máquina *air-core*

Color Shade Results

Quantity : |Flux density| Tesla

Time (s.) : 0,002 Pos (deg): 18

Scale / Color

0 / 62,5E-3

62,5E-3 / 0,125

0,125 / 187,5E-3

187,5E-3 / 0,25

0,25 / 312,5E-3

312,5E-3 / 0,375

0,375 / 437,5E-3

437,5E-3 / 0,5

0,5 / 562,5E-3

562,5E-3 / 0,625

0,625 / 687,5E-3

687,5E-3 / 0,75

0,75 / 812,5E-3

812,5E-3 / 0,875

0,875 / 937,5E-3

937,5E-3 / 1



Escala de linhas equi-fluxo
da máquina *air-core*

Isovalues Results

Quantity : Equi flux Weber

Time (s.) : 0,002 Pos (deg): 18

Line / Value

2 / -3,16552E-3

3 / -2,93103E-3

4 / -2,69655E-3

5 / -2,46207E-3

6 / -2,22759E-3

7 / -1,9931E-3

8 / -1,75862E-3

9 / -1,52414E-3

10 / -1,28966E-3

11 / -1,05517E-3

12 / -820,68966E-6

13 / -586,20691E-6

14 / -351,72416E-6

15 / -117,24138E-6

16 / 117,24138E-6

17 / 351,72416E-6

18 / 586,20691E-6

19 / 820,68966E-6

20 / 1,05517E-3

21 / 1,28966E-3

22 / 1,52414E-3

23 / 1,75862E-3

24 / 1,9931E-3

25 / 2,22759E-3

26 / 2,46207E-3

27 / 2,69655E-3

28 / 2,93103E-3

29 / 3,16552E-3



**Escalas da Densidade de Fluxo
Magnético e das Linhas de Fluxo
Magnético da Máquina SAT com
Rotor Ferromagnético**

Escala de cor da densidade de fluxo da máquina SAT de rotor ferromagnético

Color Shade Results

Quantity : |Flux density| Tesla

Time (s.) : 0,002 Pos (deg): 18

Scale / Color

0 / 156,25E-3
156,25E-3 / 312,5E-3
312,5E-3 / 468,75E-3
468,75E-3 / 0,625
0,625 / 781,25E-3
781,25E-3 / 937,5E-3
937,5E-3 / 1,09375
1,09375 / 1,25
1,25 / 1,40625
1,40625 / 1,5625
1,5625 / 1,71875
1,71875 / 1,875
1,875 / 2,03125
2,03125 / 2,1875
2,1875 / 2,34375
2,34375 / 2,5



Escala de linhas equi-fluxo da máquina SAT de rotor ferromagnético

Isovalues Results

Quantity : Equi flux Weber

Time (s.) : 0,002 Pos (deg): 18

Line / Value

2 / -8,0991E-3
3 / -7,5E-3
4 / -6,8991E-3
5 / -6,2991E-3
6 / -5,7E-3
7 / -5,0991E-3
8 / -4,5E-3
9 / -3,8991E-3
10 / -3,2991E-3
11 / -2,7E-3
12 / -2,0991E-3
13 / -1,5E-3
14 / -899,99998E-6
15 / -300,00001E-6
16 / 300,00001E-6
17 / 899,99998E-6
18 / 1,5E-3
19 / 2,0991E-3
20 / 2,7E-3
21 / 3,2991E-3
22 / 3,8991E-3
23 / 4,5E-3
24 / 5,0991E-3
25 / 5,7E-3
26 / 6,2991E-3
27 / 6,8991E-3
28 / 7,5E-3
29 / 8,0991E-3