

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO



IVES COLODETTI MOROSINI

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE COMPENSADOR
SÍNCRONO NO SOFTWARE DE TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS PSCAD/EMTDC**

VITÓRIA – ES

2017

IVES COLODETTI MOROSINI

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE COMPENSADOR SÍNCRONO NO SOFTWARE
DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS PSCAD/EMTDC**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Ives Colodetti Morosini**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para aprovação na disciplina “ELE08553 – Projeto de Graduação 2”.

Prof. Dr. Paulo J. M. Menegáz

Professor da disciplina

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação

Orientador

Msc. Alcebíades Rangel Bessa

Orientador

Prof. Msc. Renner Sartório Camargo

Membro da banca

Prof. Dra. Jussara Farias Fardin

Membro da banca

VITÓRIA – ES

2017

RESUMO

Este projeto consiste na modelagem e simulação de um compensador síncrono presente na subestação de Vitória, pertencente às Centrais Elétricas de Furnas (FURNAS) em Carapina, Serra - ES. Esta máquina é utilizada para o controle de potência reativa e regulação de tensão da rede. Para a realização deste trabalho, foram levantados todos os dados presentes no manual da máquina que são utilizados pelo PSCAD/EMTDC para a modelagem. Os parâmetros exigidos por esse *software* que não foram encontrados neste manual da máquina foram obtidos através da literatura de apoio ou pela análise de curvas de ensaios. Primeiro foi feita a modelagem do circuito de potência da máquina, em seguida foi desenvolvido um circuito de campo, responsável pela magnetização da máquina, então o modelo da máquina foi validado através da realização das curvas características do compensador presentes no manual do mesmo e por último foram feitas algumas simulações da máquina modelada com a variação da demanda de potência com entrada e saída de cargas em um barramento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura básica de uma máquina síncrona trifásica	13
Figura 2- Forma típica das curvas V de um gerador síncrono.....	15
Figura 3 - Curva V do manual do compensador síncrono.....	17
Figura 4 - Curva de perdas totais em função da potência reativa fornecida pelo compensador síncrono.....	19
Figura 5 - Diagrama de blocos para a partida do compensador síncrono	21
Figura 6 - Parametrização da inicialização do compensador síncrono	22
Figura 7 - Tela de inicialização do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC	23
Figura 8 - Curva de saturação magnética do núcleo do compensador síncrono.....	24
Figura 9 - Curva de saturação.....	25
Figura 10 - Diagrama de simulação do Compensador Síncrono no PSCAD/EMTDC	26
Figura 11 - Tela de configuração do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC.....	27
Figura 12 - Tela de dados básicos do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC.....	28
Figura 13 - Diagrama de blocos das perdas do circuito de campo	34
Figura 14 - Aba dos parâmetros elétricos do modelo do compensador síncrono	38
Figura 15 - Circuito de controle de campo do compensador síncrono	39
Figura 16 - Ajuste do controlador PI do circuito de campo do compensador síncrono.....	39
Figura 17 - Somatório das perdas totais	43
Figura 18 - Simulação do teste final do compensador síncrono	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das aplicações de uma máquina síncrona	14
Tabela 2 - Pontos principais da curva de perdas totais do manual do compensador síncrono	31
Tabela 3 - Levantamento da curva V ensaiada	41
Tabela 4 - Tabela de resultados para o ensaio de perdas totais	43
Tabela 5 - Sequência de acionamento das cargas na simulação final do compensador síncrono	47
Tabela 6 - Variáveis utilizadas para a modelagem do compensador síncrono	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação entre as curvas V do manual e ensaiada no <i>software</i>	42
Gráfico 2 - Comparação das curvas de perdas totais do manual e do ensaio no <i>software</i>	44
Gráfico 3 - Potência reativa consumida pelo compensador síncrono do barramento durante a simulação	47
Gráfico 4 - Tensão no barramento do compensador síncrono e na fonte de tensão ao longo da simulação	48
Gráfico 5 – E_F ao longo da simulação	48
Gráfico 6 - Frequência angular da máquina ao longo da simulação.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFES	<i>Universidade Federal do Espírito Santo</i>
Q	<i>Potência Reativa</i>
I_F	<i>Corrente do circuito de campo da máquina síncrona</i>
NOS	<i>Operador Nacional do Sistema</i>
DC	<i>Direct Current</i>
IEEE	<i>Institute of Eletrical and Eletronic Engeneers</i>
ES	<i>Espírito Santo</i>
V	<i>Volt – Unidade de medida de tensão elétrica no Sistema Internacional</i>
A	<i>Ampère – Unidade de medida de corrente elétrica no Sistema Internacional</i>
W	<i>Watt – Unidade de medida de potência ativa no Sistema Internacional</i>
VA	<i>Volt-ampère – Unidade de medida de potência aparente no Sistema Internacional</i>
VAr	<i>Volt-ampère reativo – Unidade de medida de potência reativa no Sistema Internacional</i>
J	<i>Joule – Unidade de medida de energia no Sistema Internacional</i>
ω	<i>Frequência angular</i>
rms	<i>Root mean square – raiz do valor quadrático médio</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Apresentação.....	10
1.2	Justificativa.....	10
2	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2.1	Objetivo Geral.....	11
2.2	Objetivos Específicos.....	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
3.1	Máquinas síncronas.....	12
3.2	Compensadores síncronos.....	14
3.3	Estudo da curva V.....	15
3.4	Estudo da curva de perdas.....	18
3.5	Modelagem do circuito de campo do compensador síncrono.....	20
4	MODELAGEM DO COMPENSADOR SÍNCRONO NO PSCAD/EMTDC.....	21
4.1	Ajuste da partida do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC.....	21
4.2	Modelagem da curva de magnetização.....	23
4.3	Modelagem do circuito de potência.....	26
4.3.1	Parâmetros do compensador síncrono.....	26
4.3.2	Circuito Elétrico do Compensador Síncrono.....	29
4.3.3	Utilização da curva de Perdas Totais para determinação de R_a , R_{nu} e R_f	30
4.3.3.1	P_{NU} – Perdas no núcleo.....	32
4.3.3.2	P_A – Perdas na armadura.....	32
4.3.3.3	P_{AV} – Perdas por atrito e ventilação.....	33
4.3.3.4	P_E – Perdas por espraçamento.....	33
4.3.3.5	P_F – Perdas no circuito de campo.....	33
4.3.3.6	Determinação de R_F , R_{NU} e R_A	34

4.4 Modelagem do controlador do circuito de campo.....	38
5 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DOS ENSAIOS DO <i>DATASHEET</i>	40
5.1 Ensaio da curva V	40
5.2 Ensaio da curva de perdas totais	42
5.3 Conclusões parciais	44
6 TESTE NO COMPENSADOR SÍNCRONO COM VARIAÇÕES DE CARGA EM UM BARRAMENTO.....	46
7 CONCLUSÃO.....	50
8 BIBLIOGRAFIA.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

As máquinas síncronas são máquinas que, como o próprio nome já diz, operam com velocidade de rotação constante sincronizada com a frequência da tensão elétrica alternada aplicada aos terminais da mesma. A máquina é constituída pelo circuito de campo, que se encontra no rotor, e pelo circuito de armadura, presente no estator da máquina. A tensão aplicada no circuito de campo é contínua e este circuito tem a função de produzir um campo magnético constante para interagir com o campo produzido pelo estator. Já a tensão aplicada no circuito do estator é alternada trifásica e tem a função de produzir um campo girante. (KOSOW, 1979)

Uma das aplicações da máquina síncrona é como motor síncrono. Para o caso desse trabalho, a máquina ainda pode ser chamada de compensador síncrono, pois é um motor síncrono que opera sem carga, que é utilizado para fornecer potência reativa para a rede elétrica dinamicamente. Basicamente, quando o circuito de campo do compensador síncrono está sobre-excitado ele fornece energia reativa para a rede e quando ele está subexcitado consome energia reativa da rede. (FITZGERALD, 2006)

1.2 Justificativa

A modelagem e simulação de uma máquina como essa se fazem importantes, pois via *software*, pode-se obter o comportamento aproximado da máquina para certas situações extraordinárias na rede, que não poderiam ser verificadas na prática pelo risco de avarias tanto na máquina quanto no sistema de modo geral. Entre as situações extraordinárias que podem ser estudadas estão: entrada e saída de uma carga de grande porte da rede, curto-circuito, variações de tensão de curta duração, quedas de fase e variação de demanda de carga da rede ao longo do dia.

2 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é de modelar o compensador síncrono da subestação de Vitória, pertencente à FURNAS, em Carapina, Serra - ES, através dos componentes presentes no *software* PSCAD/EMTDC e simular sua atuação para algumas contingências que podem ocorrer no sistema de energia elétrica no qual esteja inserido. Essa modelagem consiste tanto na parte de potência da máquina, onde são levados em conta todos os parâmetros mecânicos e elétricos da mesma, assim como a saturação magnética de seus núcleos e outros diversos tipos de perdas.

2.2 Objetivos Específicos

- Na modelagem da parte de potência da máquina, obter a curva V da potência reativa fornecida/consumida pela máquina em função de sua corrente de campo I_F e a curva de perdas totais pela potência reativa fornecida pelo compensador síncrono, para uma potência ativa de saída nula. Nas curvas modeladas obter um erro médio percentual inferior a 2%.
- Na modelagem da parte de controle de campo da máquina, desenvolver um circuito de controle para que a máquina possa fazer regulações de tensão e de potência reativa fornecida/consumida de forma dinâmica, atendendo pré-requisitos definidos pelo operador.
- Obter as respostas da máquina para situações de contingência que podem ocorrer na rede de energia que ela esteja inserida, através do chaveamento de cargas na rede.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento desse trabalho aprofundando os conhecimentos em tópicos como as características e o significado das curvas de ensaios a serem comparadas, as características da máquina síncrona exigidas para a modelagem pelo PSCAD/EMTDC e os modelos básicos de circuitos de controle de campo disponíveis nesse *software*.

3.1 Máquinas síncronas

Uma máquina síncrona gira a uma velocidade constante em seu regime permanente. De forma diferente das máquinas de indução, o campo girante no entreferro e o rotor giram à mesma velocidade, denominada velocidade síncrona. As máquinas síncronas são usadas na maioria das vezes como geradores de potência elétrica, neste caso elas são chamadas de geradores síncronos ou alternadores, são geralmente máquinas de grande porte gerando potência elétrica em usinas hidrelétricas, nucleares e termoelétricas. Geradores síncronos são os principais dispositivos de conversão primária de energia na atualidade e geradores de centenas de MVA são comuns em estações de geração. (SEN, 1996)

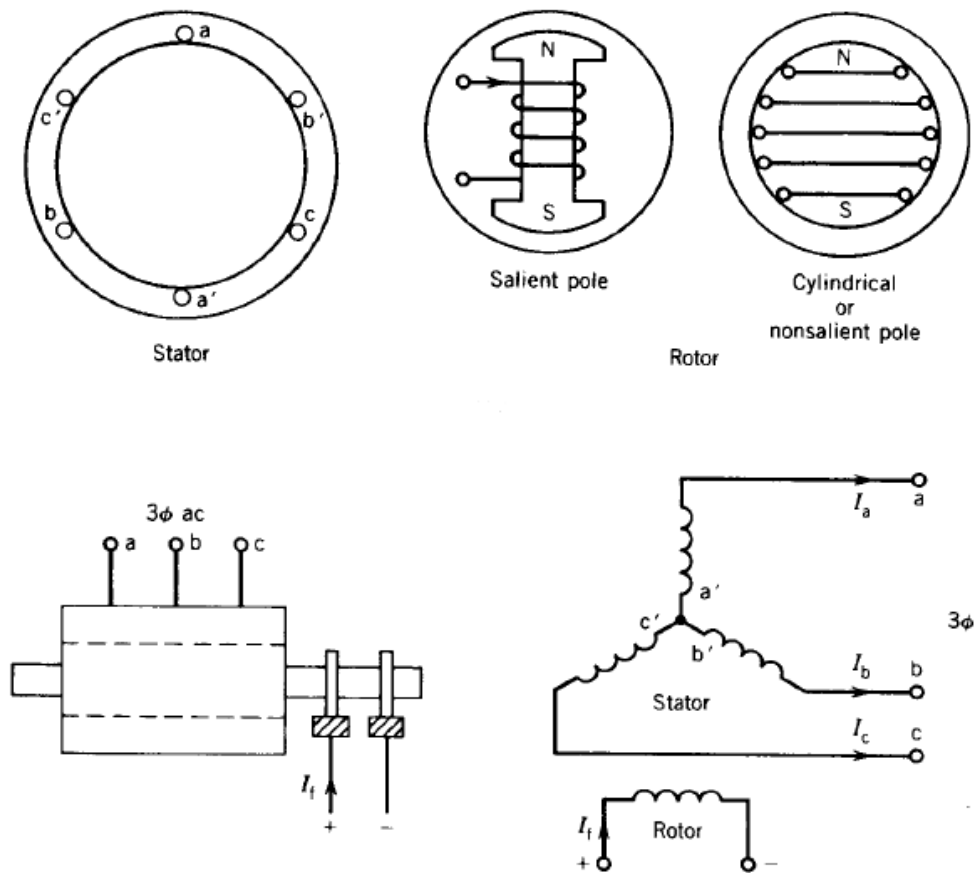
Como a maioria das máquinas rotativas, uma máquina síncrona pode operar tanto como gerador, tanto como motor. Na indústria, os motores síncronos são utilizados quando uma velocidade constante de operação é desejada, porém não possuem tantas aplicações como os motores de indução ou até mesmo os de corrente contínua. Por outro lado, uma característica importante dos motores síncronos é a capacidade de fornecer potência reativa com fator de potência atrasado ou adiantado para um sistema de corrente alternada. O rotor desses motores é excitado através de uma fonte de corrente contínua e seus enrolamentos do estator são conectados a uma fonte de corrente alternada. O fluxo do entreferro é, portanto, o resultante dos fluxos de ambos rotor e estator. Em máquinas de indução, a única fonte de excitação é a corrente do estator, pois as correntes do rotor são correntes induzidas. Portanto, motores de indução sempre operam com o fator de potência atrasado porque corrente reativa em atraso é necessária para o estabelecimento do fluxo na máquina. Por outro lado, no motor síncrono, se o enrolamento de campo do rotor fornece apenas a excitação necessária, o estator não absorverá nenhuma potência reativa da rede, de modo que o motor vá opera com fator de

potência unitário. Se a corrente de excitação de campo do rotor diminuir, potência reativa indutiva será absorvida da rede para ajudar a prover a magnetização do rotor e o motor vai operar com fator de potência indutivo. Se a corrente de excitação de campo do rotor aumentar, uma potência reativa capacitiva será solicitada da rede para que se oponha à magnetização excedente do rotor e o motor vai operar com fator de potência capacitivo.

Portanto, variando a corrente de campo, o fator de potência do motor síncrono pode ser controlado. Se o motor opera a vazio conectado a uma rede de corrente alternada, ele terá o comportamento de um indutor e um capacitor variáveis a medida que a corrente de campo do rotor varia. Um motor síncrono operando sem carga é conhecido como compensador síncrono ou ainda condensador síncrono. Essas máquinas podem ser usadas em linhas de transmissão para a regulação da tensão de linha e na indústria para compensar a potência reativa absorvida da rede pelos motores de indução. (SEN, 1996)

Na Figura 1, pode ser observada a estrutura básica de uma máquina síncrona trifásica.

Figura 1 - Estrutura básica de uma máquina síncrona trifásica



Fonte: SEN, 1996.

Na Tabela 1 é mostrado o resumo das aplicações de uma máquina síncrona.

Tabela 1 - Resumo das aplicações de uma máquina síncrona

Gerador síncrono	- Aplicação mais utilizada para a máquina síncrona - Principais dispositivos de conversão primária de energia - Utilizados em usinas de energia elétrica
Motor síncrono	- Utilizados em processos onde velocidade constante é requerida
Compensador síncrono	- É um motor síncrono operando com seu eixo a vazio - Utilizados para regulação de tensão e controle de potência reativa em sistemas de energia

3.2 Compensadores síncronos

Até meados dos anos 1970, os compensadores síncronos eram os únicos equipamentos de controle de potência reativa utilizados em sistemas de energia elétrica de potência. Os compensadores de grande porte são refrigerados a hidrogênio, assim como o compensador estudado neste trabalho. Comercialmente, já foram relatados compensadores síncronos de mais de 345 MVA de potência. (GRAINGER, 1994)

Os compensadores síncronos são caracterizados por respostas de controle relativamente lentas devido a sua grande constante de tempo de campo. Como são máquinas rotativas, requerem manutenções periódicas e se tornam mais caras que compensadores estáticos de mesmo porte. (GRAINGER, 1994)

Os compensadores estáticos de energia reativa são dispositivos que podem ser implementados em diferentes tipos de circuitos: circuitos paralelos com capacitores, indutores ou ambos controlados por tiristores e ainda circuitos série controlados por tiristores. Esses dispositivos tem a saída ajustada para a variação de correntes capacitivas e indutivas, de modo a manter ou controlar parâmetros específicos do sistema elétrico de potência. (BESSA, 2015)

Uma aplicação importante dos compensadores síncronos é a atuação em mudanças repentinas na tensão terminal. Por exemplo, sob condições severas de sobretensão, intrinsecamente um compensador síncrono absorve uma quantidade substancial de potência reativa mesmo não variando a sua corrente de campo (na verdade o controle de campo fornece um acompanhamento mais lento). Isso se deve porque geralmente a constante de tempo térmica é geralmente grande e permite que o compensador seja sobrecarregado com segurança por um curto período de tempo. (GRAINGER, 1994)

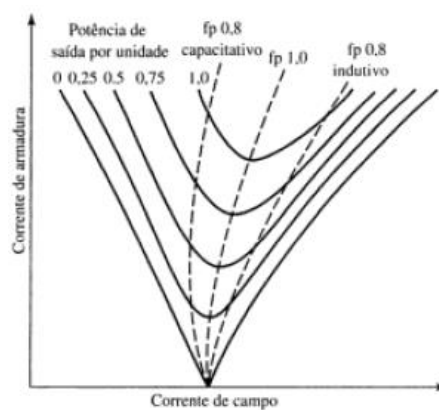
3.3 Estudo da curva V

De acordo com Fitzgerald (2006, p.269, grifo do autor):

Para uma dada potência ativa de carga, o fator de potência, com o qual uma máquina síncrona opera e conseqüentemente a sua corrente de armadura, pode ser controlado ajustando a excitação do campo. A curva que mostra a relação entre as correntes de armadura e o campo, para uma tensão terminal e uma potência ativa constantes, é conhecida como *curva V*, devido a sua forma característica.

Uma família de curvas V para um gerador síncrono tem a forma mostrada na Figura 2:

Figura 2- Forma típica das curvas V de um gerador síncrono



Fonte: FITZGERALD, 2006.

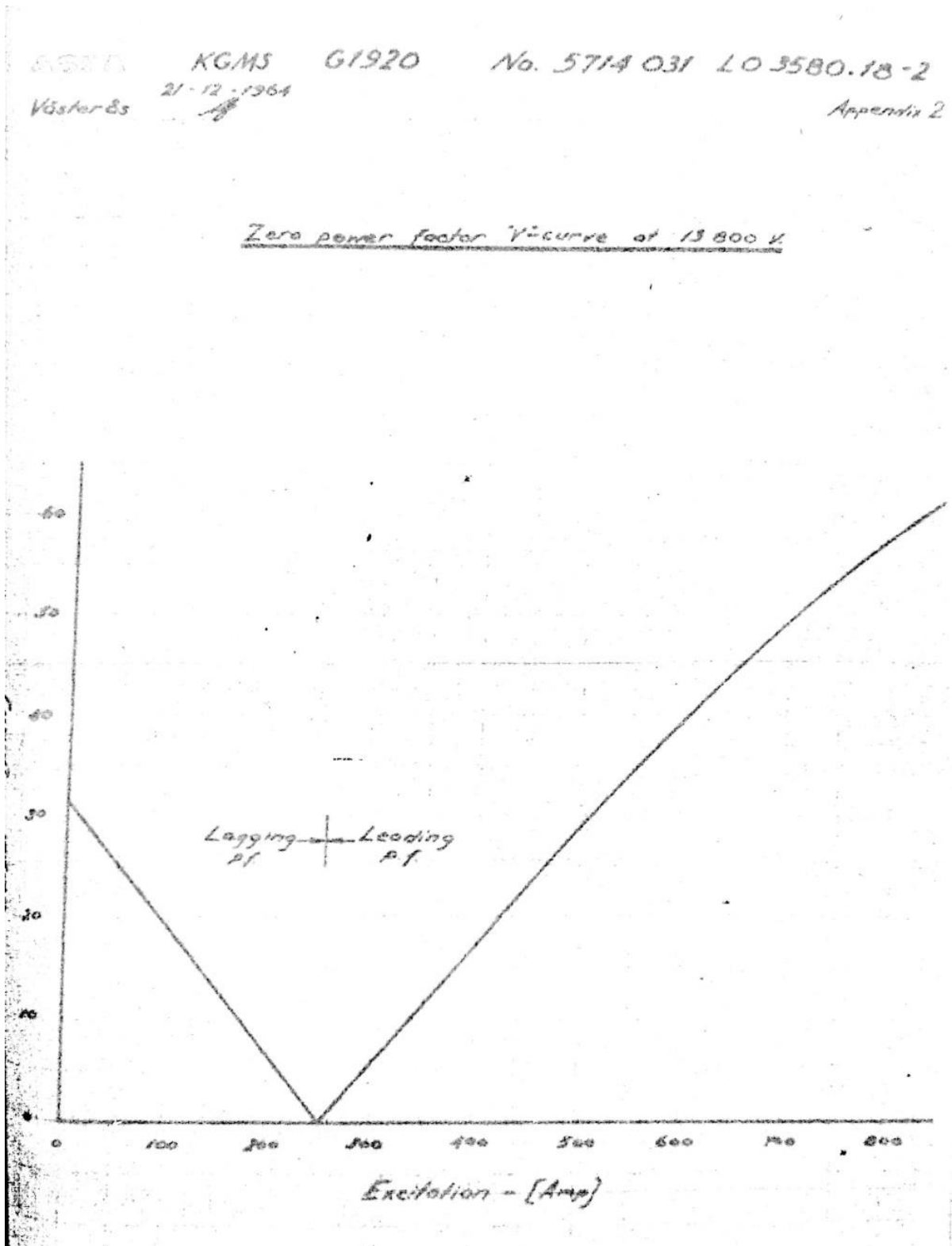
“Para uma potência de saída constante, a corrente de armadura é mínima quando o fator de potência é unitário, e aumenta à medida que o fator de potência diminui. As linhas tracejadas representam os pontos de fator de potência constante” (FITZGERALD, 2006).

“Pontos à direita da curva composta, para fator de potência unitário, correspondem a uma sobre-excitação e a um fator de potência indutivo; pontos à esquerda correspondem a uma subexcitação e a um fator de potência capacitivo” (FITZGERALD, 2006).

Se não fosse pelos pequenos efeitos causados pela corrente de armadura, as curvas compostas de motores e geradores seriam idênticas. Vale lembrar que para as curvas V de motores, que é o caso trabalhado, os fatores de potência indutivo e capacitivo são permutados. Ainda, para o ensaio da curva V presente do manual da máquina estudada, a curva é dada pela potência reativa fornecida pelo compensador síncrono em função da corrente de campo, porém, como

para ambos os casos a tensão de linha é constante e as perdas são pequenas, de modo que a curva do manual da máquina se assemelha muito à curva da Figura 2 para a potência ativa fornecida pelo compensador síncrono nula, como pode ser visto na Figura 3:

Figura 3 - Curva V do manual do compensador síncrono

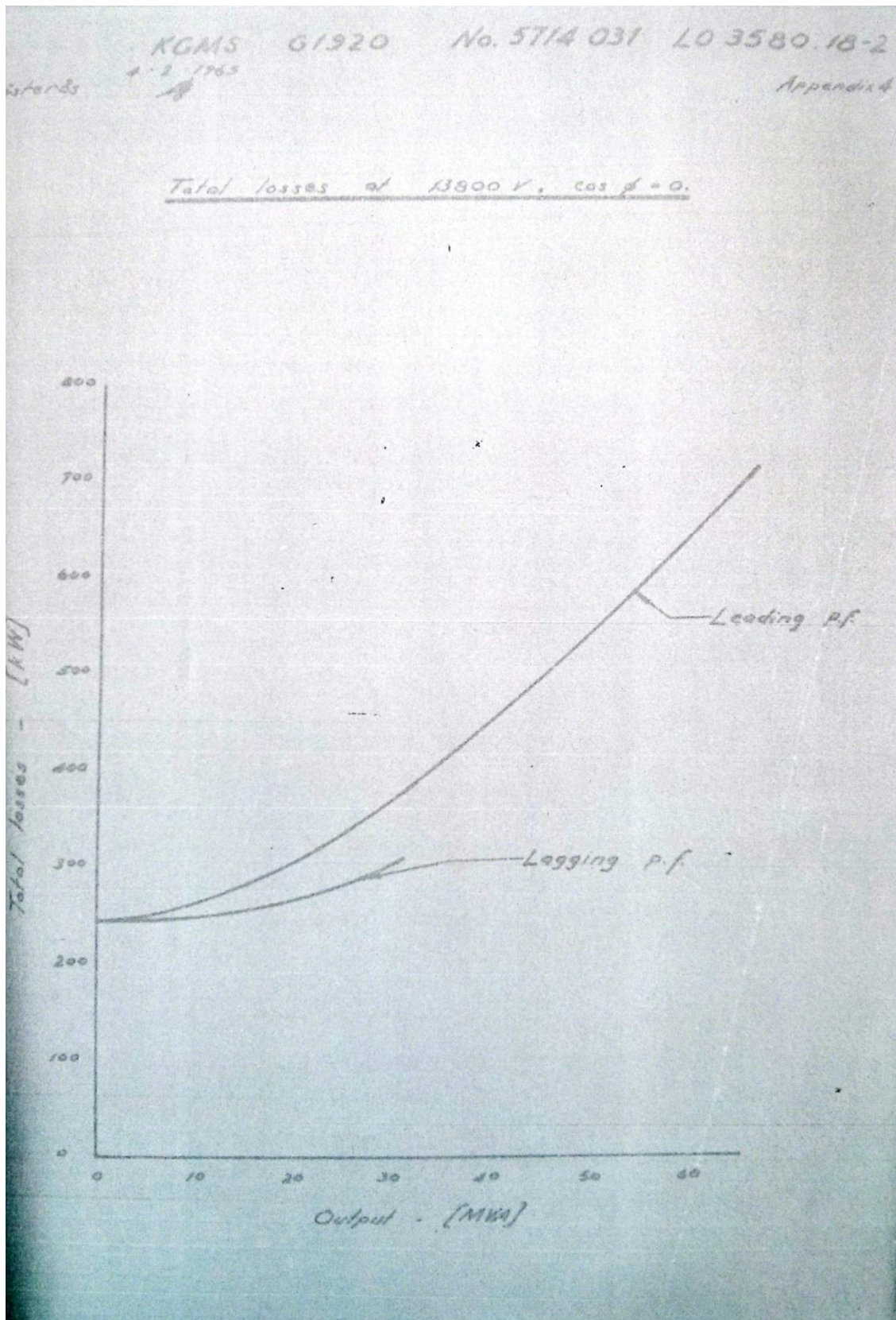


Fonte: Manual ASEA KGMS G1920, 1964.

3.4 Estudo da curva de perdas

Outra forma de comparar o modelo simulado com a máquina real é levantando, em simulação, a curva de perdas totais da máquina para dadas potências reativas fornecidas pelo compensador síncrono, considerando a potência ativa fornecida pelo compensador síncrono nula. Essa curva de perdas totais está disponível no manual da máquina e é apresentada na Figura 4:

Figura 4 - Curva de perdas totais em função da potência reativa fornecida pelo compensador síncrono



Fonte: Manual ASEA KGMS G1920, 1964.

3.5 Modelagem do circuito de campo do compensador síncrono

O *software* PSCAD/EMTDC possui vários modelos de excitadores pelo padrão IEEE, nesses modelos, todos os parâmetros são ajustados em segundos (constantes de tempo) e por unidade (todas as outras entradas). O detalhamento do significado de cada parâmetro da máquina exigido pelo *software* é encontrado na função *help* do mesmo.

No modelo de excitação real da máquina, há um pequeno gerador DC auxiliar que recebe o sinal de controle do regulador de tensão. No regulador de tensão está a malha de controle PID que recebe o sinal de entrada de tensão ou potência de referência escolhido pelo operador na sala de controle. A partir desse regulador de tensão é enviado um sinal para um gerador DC auxiliar - excitação auxiliar, de pequena potência localizado no cubículo de excitação. A corrente do gerador é então ampliada por outro gerador DC - Excitação Principal - localizado no eixo da máquina. Esta corrente DC amplificada é a corrente de campo da máquina síncrona.

O sistema de controle real do compensador síncrono permite duas formas de controle, uma na qual a tensão de saída é indicada como referência e a variação de potência é ajustada pela malha de controle e a outra na qual é ajustada diretamente a potência reativa fornecida pelo compensador síncrono e a tensão é que varia. Atualmente, a opção da ONS é a de potência fornecida pelo compensador síncrono fixa.

Por essa razão, apesar de toda estrutura oferecida pelo *software* para a modelagem do circuito de campo do compensador síncrono, decidiu-se projetar um controlador de circuito de campo para essa etapa do projeto.

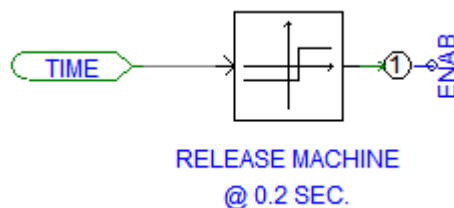
4 MODELAGEM DO COMPENSADOR SÍNCRONO NO PSCAD/EMTDC

Com base nos dados do *Datasheet* do compensador síncrono e com alguns cálculos realizados através de dados nominais da máquina, foram inseridos os dados de entrada e os parâmetros do compensador síncrono no PSCAD. Nos subtópicos a seguir, serão detalhadas as configurações utilizadas no modelo.

4.1 Ajuste da partida do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC

Para a partida do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC é necessário bloquear seu rotor por um pequeno intervalo de tempo e depois deixá-lo no modo normal de transição. Essa partida foi tratada como pode ser mostrado na Figura 5.

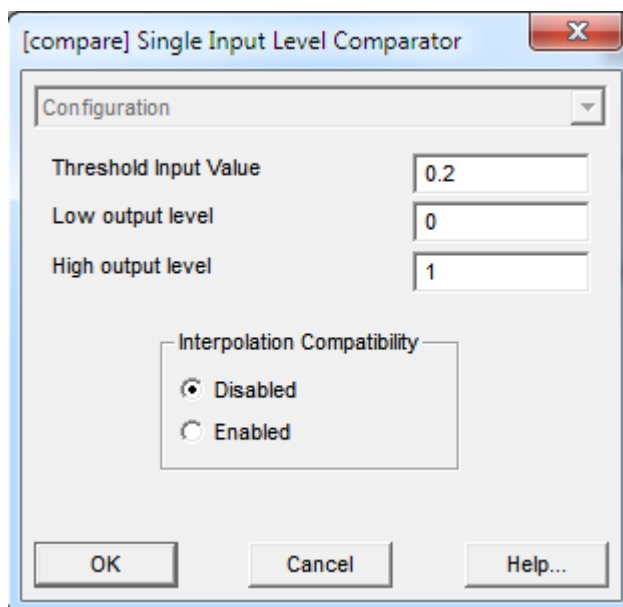
Figura 5 - Diagrama de blocos para a partida do compensador síncrono



Fonte: Produção do próprio autor

Nesse degrau, a saída é 0 (zero) para o tempo menor que 0,2 segundos e igual a 1 para o tempo maior ou igual a 0,2 segundos, como pode ser visto na Figura 6.

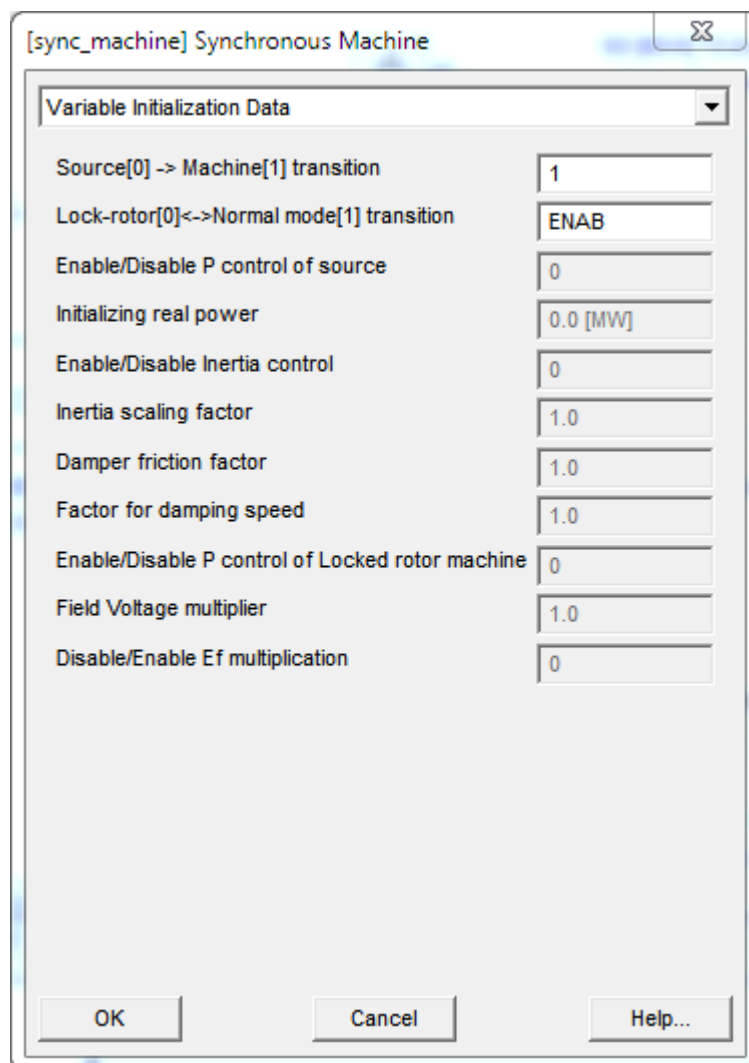
Figura 6 - Parametrização da inicialização do compensador síncrono



Fonte: Produção do próprio autor

Como pode ser observado na Figura 5, a saída do degrau é recebida pela variável “ENAB”, que é inserida na aba *Lock-rotor[0]<->Normal mode[1] transition* da tela *Variable Initialization Data*. Também na tela *Variable Initialization Data*, pode ser observado que o modelo de máquina síncrona do PSCAD foi inicializado como máquina (de acordo com o objetivo deste trabalho), como pode ser visto na aba *Source [0] -> Machine [1] transition*. O ajuste dos parâmetros citados neste parágrafo pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Tela de inicialização do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC



[sync_machine] Synchronous Machine

Variable Initialization Data

Source[0] -> Machine[1] transition	1
Lock-rotor[0]<->Normal mode[1] transition	ENAB
Enable/Disable P control of source	0
Initializing real power	0.0 [MW]
Enable/Disable Inertia control	0
Inertia scaling factor	1.0
Damper friction factor	1.0
Factor for damping speed	1.0
Enable/Disable P control of Locked rotor machine	0
Field Voltage multiplier	1.0
Disable/Enable Ef multiplication	0

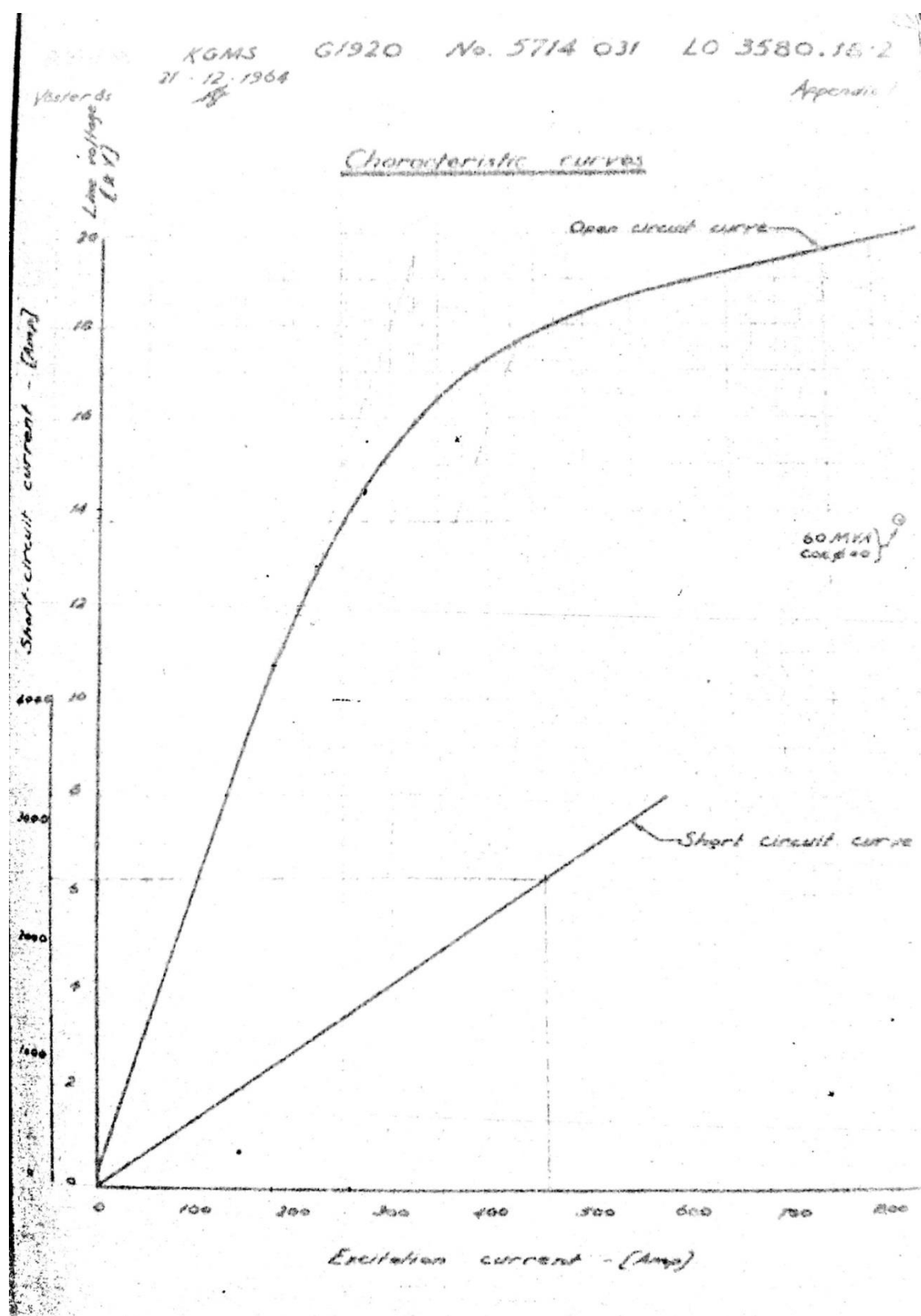
OK Cancel Help...

Fonte: Produção do próprio autor

4.2 Modelagem da curva de magnetização

A primeira parte do compensador síncrono a ser modelada no projeto foi a sua curva de magnetização. A modelagem dessa curva é feita escolhendo-se a opção *Enabled* na aba *D axis Saturation* da tela *Configuration*. Escolhendo-se essa opção, a tela *Saturation Curve* é habilitada para a inserção de pontos estratégicos da curva de magnetização da máquina. A curva de magnetização foi extraída do manual da máquina e pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 - Curva de saturação magnética do núcleo do compensador síncrono



Fonte: Manual ASEA KGMS G1920, 1964.

Para o preenchimento da tela *Saturation Curve* o PSCAD/EMTDC indica que o primeiro ponto da curva de saturação deve ser (0;0) e que o segundo ponto deve ser de uma região da curva onde ainda não haja saturação magnética do núcleo da máquina. A modelagem da curva é feita com no máximo 10 (dez) pontos da mesma.

Apesar da utilização da curva de saturação presente no manual do compensador síncrono, a curva V da máquina modelada apresentou uma diferença para a V do manual do compensador síncrono. Dessa maneira, foi necessário o ajuste de alguns pontos dessa curva. Depois dos ajustes da curva de saturação, conseguiu-se uma representação mais fiel da curva V da máquina. A configuração final da curva de saturação do compensador pode ser vista na Figura 9 e os valores em pu nesta figura são em relação a tensão de base (13,8 kV).

Figura 9 - Curva de saturação

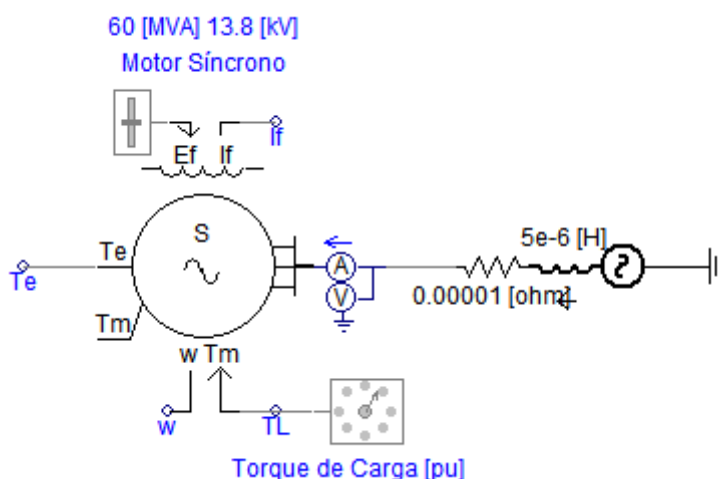
Current [pu]	Voltage [pu]
0.0	0.0 [pu]
0.71	0.78 [pu]
1	1 [pu]
1.2	1.08 [pu]
1.5	1.167 [pu]
1.8	1.185 [pu]
2.2	1.20 [pu]
2.7	1.21 [pu]
3.2	1.225 [pu]
3.7	1.23 [pu]

Fonte: Produção do próprio autor

4.3 Modelagem do circuito de potência

Ao longo de todo o projeto, quando for feita a referência de valores em pu, deve-se considerar como tensão de base a tensão de linha de alimentação do compensador síncrono de 13,8 kV, e como potência de base a potência nominal do compensador de 60 MVA. Para a modelagem do circuito de potência do compensador síncrono, foi utilizado um barramento infinito de alimentação da máquina em 13,8 kV e um modelo de máquina síncrona presente no *software* como pode ser observado na Figura 10:

Figura 10 - Diagrama de simulação do Compensador Síncrono no PSCAD/EMTDC



Fonte: Produção do próprio autor

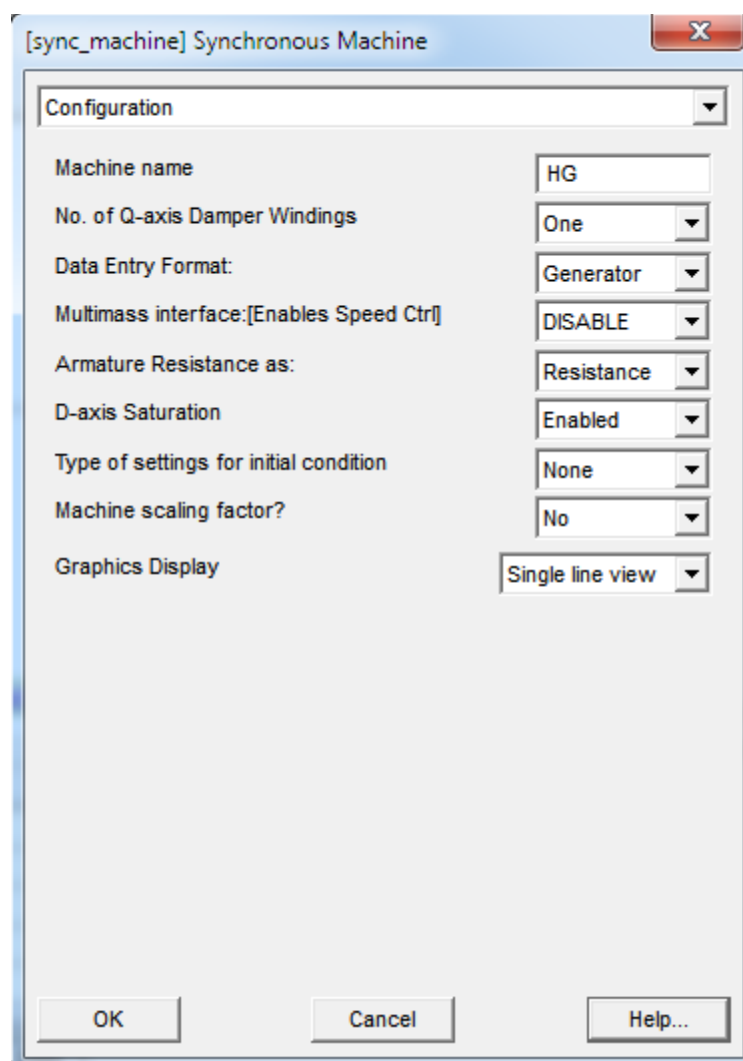
4.3.1 Parâmetros do compensador síncrono

O compensador síncrono modelado possui pólos salientes conforme relatório de manutenção obtido com o corpo técnico de FURNAS. Este dado foi inserido na tela *Configuration* do modelo do compensador, na aba *Number of Q-axis Damper Windings*. Nesta aba deve ser inserido o valor *One* para máquinas de pólos salientes e *Two* para máquinas de pólos lisos.

Como no *Datasheet* da máquina foi disponibilizada a curva de saturação de seu núcleo, na aba *D-axis Saturation* foi selecionada a opção *Enable*.

A Figura 11 ilustra o que foi mencionado nos parágrafos acima.

Figura 11 - Tela de configuração do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC



Fonte: Produção do próprio autor

Nos três primeiros campos da tela *Basic Data* foram inseridos, respectivamente, os valores de tensão de fase RMS, corrente de linha e frequência de operação da máquina. Como a tensão fornecida pelo *Datasheet* da máquina é a tensão de linha, teve-se que dividir este valor por $\sqrt{3}$ como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Tela de dados básicos do compensador síncrono no PSCAD/EMTDC

Parameter	Value
Rated RMS Line-to-Neutral Voltage	7.967 [kV]
Rated RMS Line Current	2.51 [kA]
Base Angular Frequency	376.991118 [rad/]
Inertia Constant	1.28 [s]
Mechanical Friction and Windage	0.0000 [pu]
Neutral Series Resistance	497 [pu]
Neutral Series Reactance	0 [pu]
Iron Loss Resistance	261 [pu]
Number of coherent machines	1.0

Fonte: Produção do próprio autor

No campo *Inertia Constant* foi inserida a constante de inércia na máquina, que segundo Grainger (1994) é dada pela Equação 1.

$$H = \frac{1/2 J \omega^2}{S_{mach}} \left[\frac{MJ}{MVA} \right] \quad (1)$$

Onde:

H – Constante de inércia da máquina síncrona;

J – Momento de inércia total da massa do rotor, obtido no relatório de manutenção da máquina, com um valor de 17250 [kg.m²];

ω – Velocidade síncrona da máquina, com um valor de 94,25 [rad/s] (900 rpm);

S_{mach} – Potência aparente nominal da máquina síncrona, com um valor de 60 [MVA].

Substituindo os valores das variáveis na Equação 1, Tem-se que o valor da constante de inércia do compensador síncrono é de aproximadamente 1,28 segundos.

No campo *Mechanical Friction and Windage* devem ser inseridas as perdas por atrito e ventilação do compensador síncrono. Porém, a máquina possui eixo horizontal, com dois mancais, totalmente fechada e resfriamento à hidrogênio, sendo projetada para um resfriamento do gás e dos mancais através de circulação fechada de água, que troca o calor com o ambiente externo através de sistema de resfriamento a água. Com tudo isso, em discussão com o corpo técnico de FURNAS foi definido que essas perdas do compensador síncrono podem ser desconsideradas.

4.3.2 Circuito Elétrico do Compensador Síncrono

Para a modelagem do circuito elétrico do compensador síncrono, foi escolhida a entrada de dados como gerador. Optou-se por esse modo de entrada de dados porque era o que mais se adequava com os dados presentes no *Datasheet* do compensador síncrono. Nesse formato de entrada de dados de circuito elétrico, são considerados os seguintes parâmetros:

Resistência e Reatância de neutro – É a impedância de aterramento da máquina. No *Datasheet* foi mencionado apenas o valor da resistência de neutro que é de 1577 Ohms. Como esse parâmetro deve ser inserido em pu, o valor anotado pode ser visto na Figura 9. Como o valor da reatância de neutro não foi mencionada pelo *Datasheet*, foi considerado o valor padrão do PSCAD/EMTDC. De qualquer forma, os valores desses parâmetros não influenciaram nos resultados das simulações, pois o Compensador Síncrono foi ensaiado apenas a vazio ou com cargas equilibradas.

Reatância de potier – X_p – De acordo com Jordão (2013), com o ensaio de saturação a vazio da máquina, é possível obter esse parâmetro através do gráfico desse ensaio. Como o gráfico desse ensaio pelo manual da máquina não está completo o suficiente de modo que se possa usar esse artifício, a solução escolhida para o valor desse parâmetro foi considerar a fórmula disponibilizada pelo *software*:

$$X_L = X_p \cdot AGP \quad (2)$$

Onde:

X_L - Reatância de dispersão que segundo o *Datasheet* da máquina possui o valor de 0,177 pu;

AGP - Air Gap Factor – Que seria o fator de entreferro. Como o valor desse parâmetro não foi disponibilizado no *Datasheet* da máquina, foi utilizado o valor padrão do *software* de 1.

Desse modo o valor de X_p foi considerado com o mesmo valor de X_L de 0,177.

Reatância síncrona de eixo de quadratura – X_q – Fornecida pelo *Datasheet* do compensador com um valor de 1,25 pu.

Reatância síncrona de eixo direto – X_d – Fornecida pelo *Datasheet* do compensador com um valor de 1,98 pu.

Reatância subtransitória segundo o eixo de quadratura – X_q' – Fornecida pelo *Datasheet* do compensador com um valor de 1,25 pu.

Reatância transitória segundo o eixo direto – X_d' – Fornecida pelo *Datasheet* do compensador com um valor de 0,43 pu.

Reatância subtransitória segundo o eixo de quadratura – X_q'' – Fornecida pelo *Datasheet* do compensador com um valor de 0.23 pu.

Reatância subtransitória segundo o eixo direto – X_d'' – Fornecida pelo *Datasheet* do compensador com um valor de 0.25 pu.

A resistência de armadura (R_a), a resistência de perda no ferro (R_{nu}) e a Resistência de perda no campo (R_f) foram definidos segundo o gráfico do ensaio de *Total Losses* que no inglês significa perdas totais e a sistemática será mostrada no tópico seguinte.

Os demais parâmetros de modelagem da máquina como um gerador (*Generator Data Format*) não foram fornecidos pelo manual da máquina e, portanto, foram considerados os valores padrões do PSCAD/EMTDC.

4.3.3 Utilização da curva de Perdas Totais para determinação de R_a , R_{nu} e R_f

A curva de Perdas Totais ilustrada pela Figura 4 pode ser utilizada para a determinação dos parâmetros elétricos R_a , R_{nu} e R_f . Para começar, alguns pontos estratégicos dessa curva foram

levantados manualmente em uma tabela para realização dos cálculos necessários. A Tabela 2 apresenta os pontos da curva de perdas totais:

Tabela 2 - Pontos principais da curva de perdas totais do manual do compensador síncrono

Data Sheet	
Output [MVA]	Total losses [kW]
-30	310
-25	285
-20	270
-15	260
-10	250
-5	245
0	245
5	255
10	265
15	290
20	310
25	340
30	375
35	410
40	450
45	495
50	540
55	590
60	650

As perdas totais de um compensador síncrono podem ser definidas através da Equação 3:

$$P_T = P_{NU} + P_A + P_{AV} + P_E + P_F \quad (3)$$

Onde:

P_T – Perdas totais do compensador síncrono;

P_{NU} – Perdas no núcleo da máquina, também conhecidas como perdas no ferro;

P_A – Perdas na armadura;

P_{AV} – Perdas por atrito e ventilação;

P_E – Perdas por espraiamento;

P_F – Perdas no circuito de campo.

4.3.3.1 P_{NU} – Perdas no núcleo

As perdas no núcleo ocorrem quando existe uma variação do fluxo concatenado numa estrutura de ferro ou quando uma estrutura de ferro de armadura ou rotor gira num campo magnético. A energia elétrica necessária para superar a retentividade do ferro no caminho do fluxo magnético é denominada perda por histerese. As perdas no núcleo compreendem as perdas *Foucault* e as perdas histeréticas. (KOSOW, 1979)

Essas perdas no núcleo da máquina podem ser calculadas, em pu, pela Equação 4:

$$P_{NU} = \frac{V^2}{R_{NU}} \quad (4)$$

Onde:

V – Tensão de linha sob a qual o núcleo da máquina está submetido;

R_{NU} – Resistência de núcleo da máquina, que no PSCAD/EMTDC é identificada pelo nome de *Iron Loss Resistance*.

4.3.3.2 P_A – Perdas na armadura

As perdas na armadura são causadas pelo calor gerado pela passagem da corrente nos enrolamentos de cobre da máquina síncrona. Geralmente é expressa pelo produto $R \cdot I^2$. Usualmente, a perda no cobre de um enrolamento é especificada para uma temperatura de 75°C.

Para efeito de cálculo do rendimento das máquinas, é costume adotar a convenção de que as perdas no cobre se resumam àquelas que ocorrem nos enrolamentos do indutor e do induzido, excluindo delas as perdas nos reostatos de campo e excitatrizes. Estas últimas passam a ser consideradas perdas da instalação completa. (JORDÃO, 2013).

Como mencionado por Jordão, as perdas na armadura podem ser representadas, em pu, pela Equação 5:

$$P_A = R_A \cdot I_A^2 \quad (5)$$

Onde:

I_A – Corrente de armadura, em pu;

R_A – resistência de armadura, em pu, que no PSCAD/EMTDC é identificada pelo nome de *Armature resistance*.

4.3.3.3 P_{AV} – Perdas por atrito e ventilação

Perdas por atrito e ventilação tratam-se de perdas mecânicas, causadas pelos atritos dos mancais e escovas e das partes girantes, como comutadores e anéis coletores. São provenientes também da ventilação (natural ou forçada), provocadas pelas partes rotacionais das máquinas. Estas perdas não são de fácil mensuração, e dependem de diversos fatores, como o tipo de mancal utilizado, do estado de lubrificação deste mancal, da área de superfície de contato com comutador e anéis girantes, da pressão nesta superfície e da velocidade periférica do comutador ou anéis. (JORDÃO, 2013)

Como já foi mencionado no tópico 4.1.1, para esse compensador síncrono essas perdas são consideradas desprezíveis.

4.3.3.4 P_E – Perdas por espraçamento

Perdas por espraçamento resultam de correntes parasitas que circulam no seio das massas de cobre dos enrolamentos. Tais correntes provêm de variações do campo magnético nas regiões ocupadas pelos enrolamentos. Elas possuem a mesma natureza das correntes de Foucault, responsáveis por parte das perdas no núcleo das máquinas elétricas (JORDÃO, 2013).

O modelo de máquina síncrona do PSCAD/EMTDC não contempla um campo para inserir esses tipos de perda. Além disso, no manual da máquina também não é mencionado esse tipo de perda. Desse modo, decidiu-se não considerar essa perda no modelo simulado.

4.3.3.5 P_F – Perdas no circuito de campo

Segundo Jordão (2013) as perdas no circuito de campo são perdas joulicas ($R.I^2$), e que variam com o quadrado das correntes de campo, tais como ocorrem nos enrolamentos induzidos e eventuais enrolamentos a eles ligados em série (enrolamentos de campo-série, interpolos e enrolamentos compensadores).

Como mencionado por Jordão, as perdas no circuito de campo podem ser representadas, em pu, pela Equação 6:

$$P_F = R_F \cdot I_F^2 \quad (6)$$

Onde:

I_F – Corrente do circuito de campo, em pu;

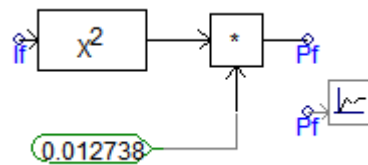
R_F – Resistência do circuito de campo, em pu.

4.3.3.6 Determinação de R_F , R_{NU} e R_A

4.3.3.6.1 Determinação de R_F

No modelo de máquina síncrona do PSCAD/EMTDC não são contempladas as perdas no circuito de campo. Porém, as mesmas foram consideradas para que se pudesse reproduzir com fidelidade a curva de perdas totais. A representação das perdas no circuito de campo foi feita na simulação através do diagrama de blocos mostrado na Figura 13:

Figura 13 - Diagrama de blocos das perdas do circuito de campo



Fonte: Produção do próprio autor

Para a determinação dos valores de P_F e R_F foram utilizados os valores da Tabela 1 e a Equação 3. Mais especificamente, da tabela 1, foram utilizados os pontos (valores em MVA):

(Pout; Total losses) = (-30; 0,310), chamado de ponto 1;

(Pout; Total losses) = (30; 0,375), chamado de ponto 2;

Escrevendo-se a Equação 3 para esses dois pontos:

$$P_{T1} = P_{NU1} + P_{A1} + P_{AV1} + P_{E1} + P_{F1} \quad (7)$$

$$P_{T2} = P_{NU2} + P_{A2} + P_{AV2} + P_{E2} + P_{F2} \quad (8)$$

Considerando-se que as perdas por atrito e ventilação (P_{AV}) e as perdas por espraçamento (P_E) podem ser desconsideradas independentemente do ponto de operação da máquina, esses valores se anulam em ambas as equações acima. Além disso, considerando que a máquina está em um barramento infinito (a tensão a qual a máquina está submetida não varia), as perdas no núcleo do ponto 1, são as mesmas perdas no núcleo do ponto 2, assim como as perdas no núcleo de qualquer outro ponto da curva ($P_{NU1} = P_{NU2} = P_{NU}$). Por último, a escolha desses dois pontos ocorreu, pois nesses a potência reativa fornecida pelo compensador síncrono é a mesma, resultando em um mesmo valor de I_A e, conseqüentemente, um mesmo valor de perda P_A para esses dois pontos. Com essas considerações, pode-se concluir que a diferença das perdas de potência nesses dois pontos se deve exclusivamente à perda no circuito de campo (P_F). Subtraindo a equação do ponto 2 da equação do ponto 1 tem-se:

$$P_{T1} - P_{T2} = P_{NU} - P_{NU} + P_{F1} - P_{F2} \quad (9)$$

$$P_{T1} - P_{T2} = P_{F1} - P_{F2} \quad (10)$$

Substituindo P_{T1} e P_{T2} na Equação 10 pelos seus valores da Tabela 1 e P_{F1} e P_{F2} por suas equações, tem-se:

$$0,375 - 0,310 = K_F \cdot I_{F1}^2 - K_F \cdot I_{F2}^2 \quad (11)$$

Por falta de alguns dados do circuito de campo do compensador síncrono, como os valores de tensão e corrente de base, resolveu-se chamar a resistência de campo R_F de constante K_F . Essa constante desempenha a mesma função da resistência na modelagem matemática da perda P_F , a única diferença é em relação ao valor de base considerado para o parâmetro. Pelas simulações, $I_{F1} = 2,26$ pu e $I_{F2} = 0,07$ pu. Desse modo, substituindo os valores das variáveis na Equação 11.

$K_F = 0,012738$ – valor escolhido para a constante que multiplica I_F na figura 10.

4.3.3.6.2 Determinação de R_{NU}

Para o cálculo de R_{NU} , escolheu-se o ponto da Tabela 1 onde a potência reativa fornecida pelo compensador síncrono (P_{out}) é nula (valores em MVA):

(Pout; Total losses) = (0; 0,245)

Nessa condição, a corrente I_A que circula pela máquina é desprezível, tornando também a perda de armadura P_A também desprezível. Considerando ainda P_{AV} e P_E também nulas, a Equação 3 pode ser escrita da forma da Equação 12:

$$P_T = P_{NU} + P_F \quad (12)$$

Substituindo na Equação 12, as Equações 4 e 6:

$$P_T = \frac{V^2}{R_{NU}} + R_F \cdot I_F^2 \quad (13)$$

Transformando a P_T para valores em pu como o resto dos valores dos parâmetros da equação:

$$P_T = \frac{0,245}{60} \cong 0,00383 \text{ pu}$$

Considerando $V = 1$ pu, por a máquina estar ligada em um barramento infinito, a corrente $I_F = 1,09$ pu para a máquina ter essa potência fornecida e substituindo R_F pelo valor de K_F (=0,012738) encontrado no tópico anterior:

$$R_{NU} = 261,34 \text{ pu}$$

4.3.3.6.3 Determinação de R_A

Para o cálculo de R_A , que é a variável que restou, escolheu-se o ponto da Tabela 1 onde a potência reativa fornecida pelo compensador é nominal (valores em MVA):

(Pout; Total losses) = (60; 0,650)

Nesse ponto de operação, considerando P_{AV} e P_E nulas, a Equação 3 pode ser escrita da seguinte forma:

$$P_T = P_{NU} + P_F + P_A \quad (14)$$

Substituindo na Equação 14, as Equações 4, 5 e 6:

$$P_T = \frac{V^2}{R_{NU}} + R_F \cdot I_F^2 + R_A \cdot I_A^2 \quad (15)$$

Transformado a P_T para valores em pu como o resto dos valores dos parâmetros da equação:

$$P_T = \frac{0,650}{60} \cong 0,01083 \text{ pu}$$

Considerando esse valor de P_T encontrado em pu, $V = 1$ pu, $I_A = 1$ pu, a corrente $I_F = 3,64$ pu para a máquina ter essa potência reativa fornecida nominal, e substituindo R_F pelo valor de $K_F (=0,012738)$ e $R_{NU} = 261,34$, o valor de R_A a partir da Equação 15 é de:

$$R_A = 0,0042 \text{ pu}$$

Esses valores encontrados para K_F , R_{NU} e R_A foram utilizados na modelagem do compensador síncrono como pode ser observado nas Figuras 12, 13 e 14.

Figura 14 - Aba dos parâmetros elétricos do modelo do compensador síncrono

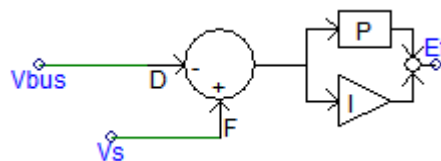
Parameter	Value
Generator Data Format	[Dropdown]
Armature Resistance [Ra]	0.0042 [pu]
Armature Time Constant [Ta]	0.278 [s]
Potier Reactance [Xp]	0.177 [pu]
D: Unsaturated Reactance [Xd]	1.98 [pu]
D: Unsaturated Transient Reactance [Xd']	0.43 [pu]
D: Unsat. Transient Time (Open) [Tdo]	5.2 [s]
D: Unsat. Sub-Trans. Reactance [Xd'']	0.25 [pu]
D: Unsat. Sub-Trans. Time (Open) [Tdo'']	0.029 [s]
D: Real Transfer Admit (Armat-Field)	1.0E+2 [pu]
D: Imag Transfer Admit (Armat-Field)	0.0 [pu]
Q: Unsaturated Reactance [Xq]	1.25 [pu]
Q: Unsaturated Transient Reactance [Xq']	1.24 [pu]
Q: Unsat. Transient Time (Open) [Tqo]	0.85 [s]
Q: Unsat. Sub-Trans. Reactance [Xq'']	0.23 [pu]
Q: Unsat. Sub-Trans. Time (Open) [Tqo'']	0.034 [s]
Air Gap Factor	1

Fonte: Produção do próprio autor

4.4 Modelagem do controlador do circuito de campo

De acordo com o que foi exposto no tópico 3.3, a fim de tornar mais simples essa parte do problema, foi desenvolvido um controlador PI que recebe o valor de referência de tensão do barramento e o valor de tensão atual da máquina para ajustar o valor da tensão de campo E_F na saída do controlador para o circuito de campo. Esse controlador pode ser observado na Figura 15.

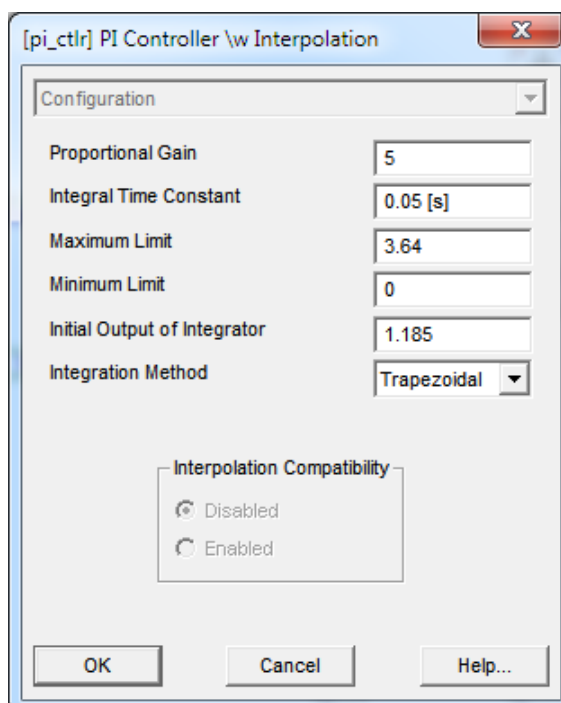
Figura 15 - Circuito de controle de campo do compensador síncrono



Fonte: Produção do próprio autor

De modo que a resposta da máquina fosse coerente com a realidade e satisfatória para uma análise de comportamento da mesma, os valores dos ganhos do controlador são os mostrados na Figura 16.

Figura 16 - Ajuste do controlador PI do circuito de campo do compensador síncrono



Fonte: Produção do próprio autor

O limite mínimo de saída do controlador PI escolhido foi 0 e o máximo foi 3,64, sendo esses, os valores em p.u. de E_f coerentes com a realidade da máquina estudada como pode ser observado no tópico 5.1.

5 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DOS ENSAIOS DO *DATASHEET*

A fim de validar a máquina que está sendo estudada em sua modelagem no PSCAD/EMTDC, foram feitos os ensaios para o levantamento das curvas V e de perdas totais, que se encontram presentes no manual da máquina, como pode ser visto nas Figuras 3 e 4.

Na comparação entre as curvas do manual da máquina e do ensaio no *software*, foi calculado o erro médio obtido através da Equação 16:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{V_r - V_e}{V_r} \right|}{n} \cdot 100\% \quad (16)$$

Onde:

V_r – Valor real;

V_e – Valor obtido no ensaio do *software*;

n – número de pontos considerados da curva.

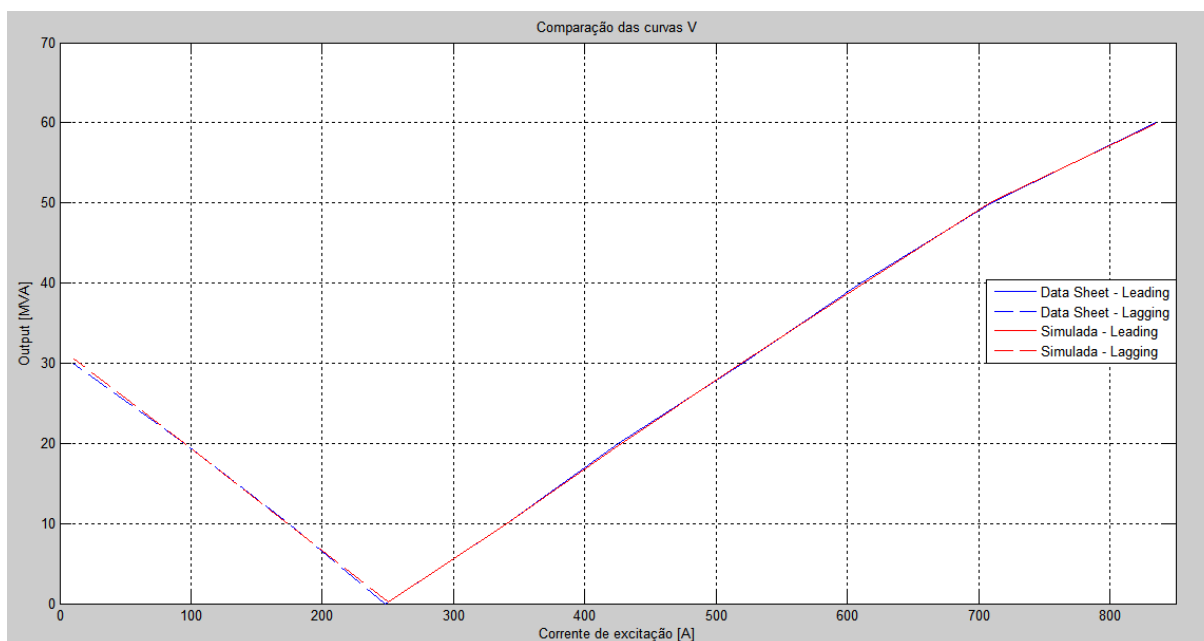
5.1 Ensaio da curva V

Para o ensaio da curva V, como citado no tópico 4.1 deste trabalho quando se tratou da modelagem da curva de magnetização do compensador síncrono, foi necessário um ajuste nos valores dessa curva de modo que a representação da curva V ficasse mais coerente com a curva real. Nesse ensaio, foram feitas 10 (dez) simulações de 30 segundos cada. Nas simulações o torque mecânico no eixo da máquina foi nulo e no final dos 30 segundos de cada simulação foi lida a potência reativa fornecida à rede pela máquina e a corrente aplicada no circuito de campo. Na Tabela 3 encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 3 - Levantamento da curva V ensaiada

Data Sheet		Ensaio		Erro	
If [A]	Qout [MVar]	If [A]	Qout [MVar]	Por ponto	Médio total [%]
10	30	10	30,71	2,37%	0,91%
95	20	95	19,97	0,15%	
175	10	175	9,81	1,90%	
248	0	250	0,23	1,39%	
340	10	340	9,98	0,20%	
425	20	425	19,65	1,75%	
520	30	520	30,12	0,40%	
610	40	610	39,79	0,53%	
710	50	710	50,18	0,36%	
835	60	835	59,95	0,08%	

Com o erro total médio de 0,91% calculado através da Equação 16, o resultado alcançado foi satisfatório. Ilustrativamente, as curvas V ensaiada e do manual do compensador síncrono podem ser comparadas no Gráfico 1. Neste gráfico, o eixo horizontal representa a corrente de campo em A, e o eixo vertical representa a potência reativa fornecida pelo compensador síncrono em MVA.

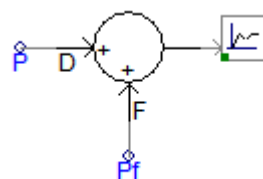
Gráfico 1 - Comparação entre as curvas V do manual e ensaiada no *software*

5.2 Ensaio da curva de perdas totais

Neste ensaio, foram feitas 19 simulações, com a potência reativa fornecida pela máquina variando entre 30 MVAr indutivos (compensador absorvendo potência reativa) e 60 MVAr capacitivos (compensador fornecendo potência reativa) de 5 em 5 MVAr entre uma simulação e outra. Cada simulação foi de 30 segundos, por ser um tempo considerado suficiente para que o compensador atingisse um regime de estabilidade das variáveis consideradas.

A máquina foi simulada com torque mecânico nulo aplicado em seu eixo, por se tratar de ensaio com o eixo da máquina a vazio. Para a leitura das perdas totais, foi considerada a leitura de potência ativa do multímetro ilustrado na Figura 10, somada com a potência ativa de perdas no campo, ilustrada na Figura 13. O somatório das perdas é representado na Figura 17.

Figura 17 - Somatório das perdas totais



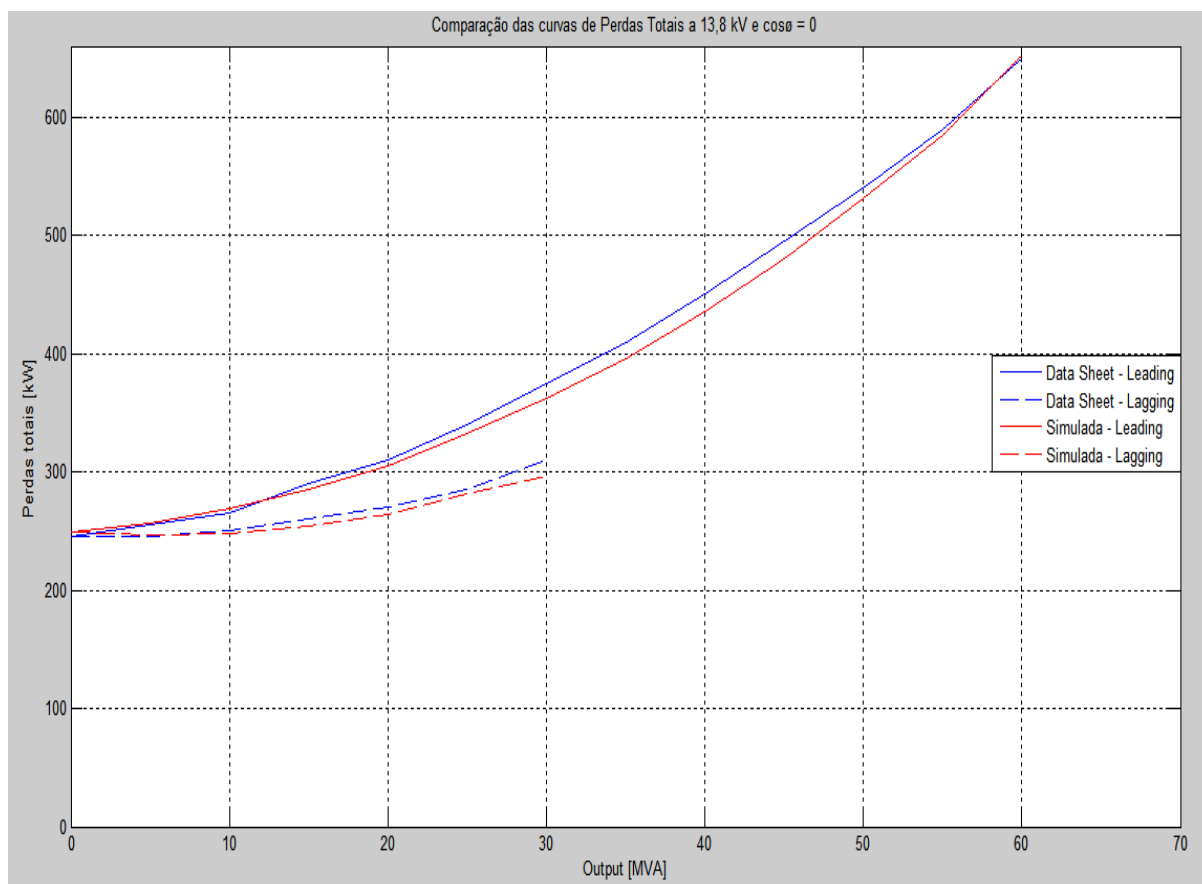
Fonte: Produção do próprio autor

Na Tabela 4, encontram-se os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 4 - Tabela de resultados para o ensaio de perdas totais

Data Sheet		Ensaio		Erro	
Output [MVA]	Total losses [kW]	Output [MVA]	Total losses [kW]	Por ponto [%]	Médio total [%]
-30	310	30	297	4,19%	1,95%
-25	285	25	281	1,40%	
-20	270	20	264	2,22%	
-15	260	15	254	2,31%	
-10	250	10	248	0,80%	
-5	245	5	247	0,82%	
0	245	0	249	1,63%	
5	255	5	257	0,78%	
10	265	10	269	1,51%	
15	290	15	285	1,72%	
20	310	20	305	1,61%	
25	340	25	332	2,35%	
30	375	30	362	3,47%	
35	410	35	396	3,41%	
40	450	40	436	3,11%	
45	495	45	481	2,83%	
50	540	50	531	1,67%	
55	590	55	585	0,85%	
60	650	60	652	0,31%	

Com o erro total médio de 1,95% calculado através da Equação 16, o resultado alcançado foi considerado satisfatório. Ilustrativamente, as curvas de perdas totais ensaiada e do manual do compensador síncrono podem ser comparadas no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Comparação das curvas de perdas totais do manual e do ensaio no *software*

No Gráfico 2, o eixo horizontal representa a potência reativa fornecida pelo compensador síncrono em MVA e o eixo vertical representa as perdas internas da máquina em kW.

5.3 Conclusões parciais

De acordo com a metodologia de cálculo apresentada neste trabalho para a modelagem do compensador síncrono, foram obtidos como resultados os ensaios das curvas do *Datasheet* da máquina para a validação do modelo projetado, como pode ser visto nos tópicos 5.1 e 5.2. Esses resultados geraram erros entre os valores encontrados e os esperados. O erro médio referente a curva V foi de 0,91% e o erro médio referente a curva de perdas totais foi de 1,95%. Entre os motivos para a existência desse erro encontrado, podem ser listados os seguintes:

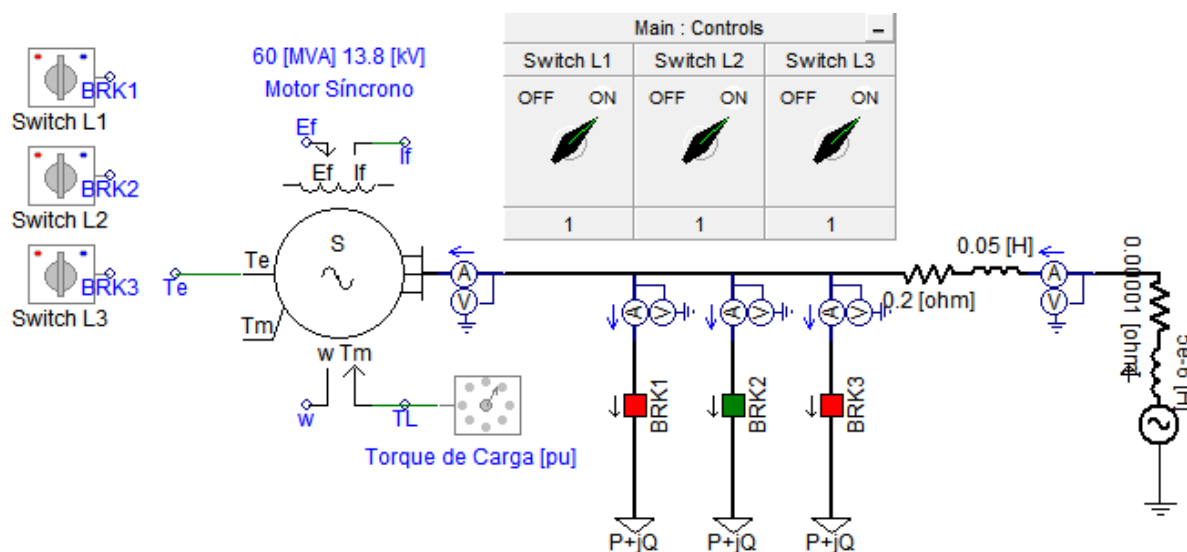
- As curvas do manual podem ser fontes de erro por sua conservação, no momento da leitura de seus dados.

- O tempo de simulação adotado foi de 30 segundos para o levantamento das curvas ensaiadas. Esse tempo foi escolhido pois um tempo maior não representaria uma grande diferença nos valores dos resultados. Porém, no instante final da simulação ainda se percebe uma diferença entre o valor da tensão de campo E_F ajustada e o valor que a corrente de campo I_F atinge, por exemplo.
- A falta de alguns dados importantes da máquina no *Datasheet* disponível, como pode ser visto no tópico 4.2.3 onde a curva de perdas totais foi utilizada para fazer uma estimativa dos parâmetros R_A , R_{NU} e R_F ; pode gerar uma fonte de erro por se tratar de parâmetros estimados.

6 TESTE NO COMPENSADOR SÍNCRONO COM VARIAÇÕES DE CARGA EM UM BARRAMENTO

O teste final da máquina e do seu circuito de controle de campo foi feito com o compensador síncrono ligado a uma fonte de tensão através de uma linha curta de transmissão e com a entrada e saída de cargas no seu barramento como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Simulação do teste final do compensador síncrono



Fonte: Produção do próprio autor

Na simulação representada pela Figura 18, as chaves L1, L2 e L3 acionam as cargas 1 (10 MVar reativos), 2 (20 MVar reativos) e 3 (10 MVar capacitivos). Para todas as chaves mencionadas, elas estão abertas quando seus botões estão na posição “ON” e fechadas quando seus botões estão na posição “OFF”. Aqui a máquina foi testada com torque de carregamento nulo em seu eixo.

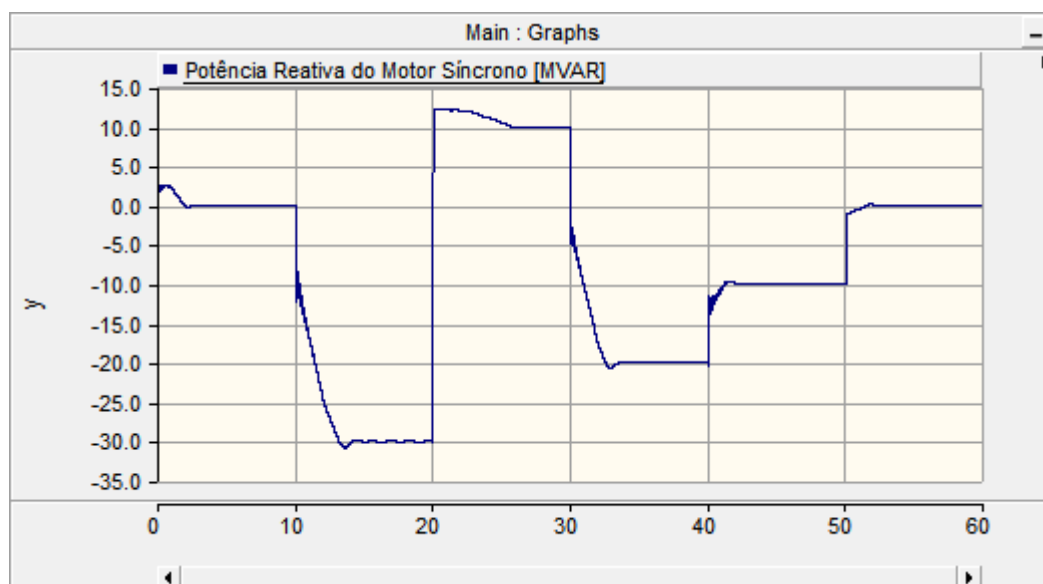
Nessa simulação, foi escolhido um tempo total de 60 segundos para que fosse feita a entrada e saída das cargas no barramento ao longo desse tempo como pode ser descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Sequência de acionamento das cargas na simulação final do compensador síncrono

Intervalo [s]	Switch L1	Switch L2	Switch L3	Potência reativa demandada [MVAR]
0 a 10	on	on	on	0
10 a 20	off	off	on	30
20 a 30	on	on	off	-10
30 a 40	on	off	on	20
40 a 50	off	on	on	10
50 a 60	on	on	on	0

A potência entregue pelo compensador síncrono ao longo da simulação pode ser vista no Gráfico 3.

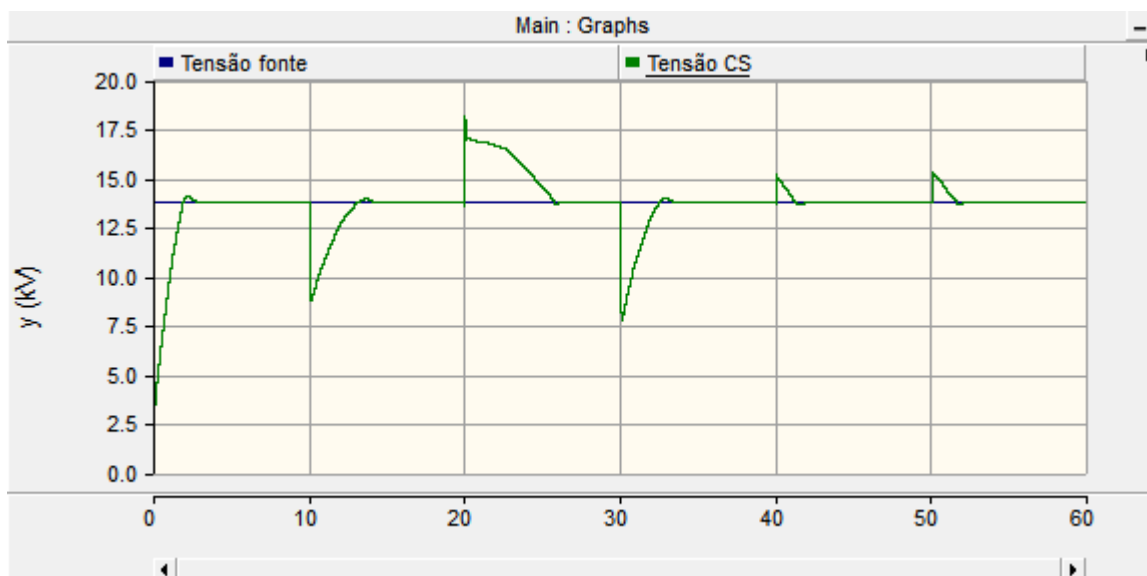
Gráfico 3 - Potência reativa consumida pelo compensador síncrono do barramento durante a simulação



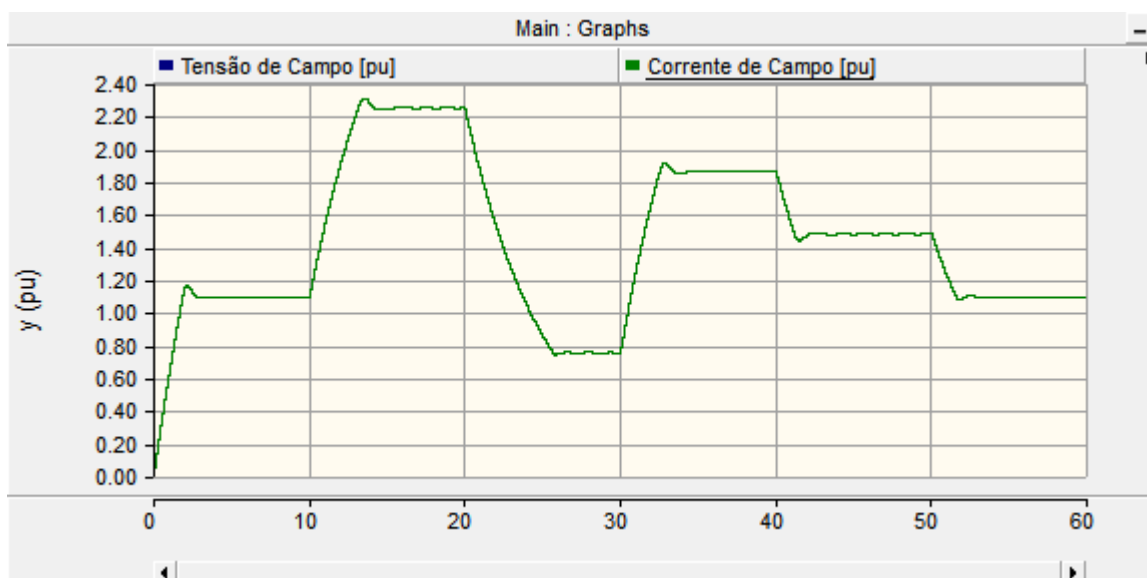
Como pode ser visto no Gráfico 3, a potência reativa entregue pelo compensador síncrono ao barramento condiz com a potência total solicitada pelas cargas ligadas ao barramento ao longo da simulação.

Ao longo da simulação, a tensão da fonte de tensão e a tensão do barramento do compensador síncrono podem ser vistas no Gráfico 4. Os valores das tensões estão em kV e o tempo está em segundos.

Gráfico 4 - Tensão no barramento do compensador síncrono e na fonte de tensão ao longo da simulação



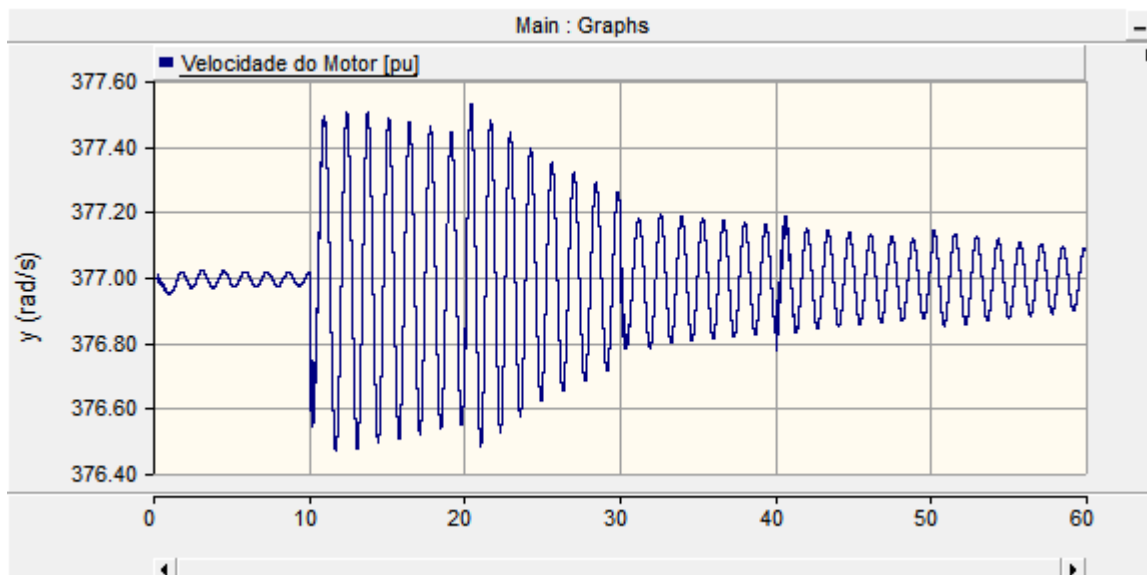
A tensão do circuito de campo E_F ao longo da simulação é representada no Gráfico 5.

Gráfico 5 – E_F ao longo da simulação

Observando o Gráfico 5, pode-se verificar que os valores de I_F para as potências fornecidas pelo compensador apresentadas no Gráfico 3 condizem com os valores da Tabela 3.

O valor da frequência angular do compensador síncrono ao longo da simulação pode ser vista no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Frequência angular da máquina ao longo da simulação



Pode-se observar no gráfico 6 que houve pouca variação da frequência angular do compensador síncrono ao longo da simulação mesmo com a variação de cargas no barramento e esse resultado foi satisfatório.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho visou desenvolver um modelo computacional para um compensador síncrono que pudesse ser utilizado em outros trabalhos envolvendo a utilização dessa máquina, de modo que o modelo do compensador tivesse uma representatividade fiel em relação ao comportamento real da máquina.

Para o levantamento do modelo, buscou-se extrair a maior quantidade possível de informações do próprio manual da máquina, que é uma das fontes mais confiáveis de informações para o primeiro. Justamente neste ponto, houve dificuldade para a obtenção de informações. Por se tratar de uma máquina antiga e também por já não se encontrar mais em linha de produção, a documentação disponível é antiga e as informações não foram suficientes para a elaboração do modelo. Frente a isso, para completar o modelo, algumas variáveis foram deduzidas através de cálculos e curvas do manual e com isso pôde-se levantar as curvas necessárias para a validação do modelo. Na Tabela 5 são apresentadas todas as variáveis do compensador síncrono utilizadas na modelagem.

Tabela 6 - Variáveis utilizadas para a modelagem do compensador síncrono

Variável	Unidade	Valor	Fonte
Tensão de linha	kV	13,8	Manual
Potência nominal	MVA	60	Manual
Frequência angular	rad/s	377	Manual
Constante de inércia	s	1,28	Cálculo
Perdas por atrito e ventilação	pu	0	Corpo técnico de FURNAS
Resistência de neutro	pu	497	Manual
Resistência de perda no ferro	pu	261	Cálculo
Resistência de armadura	pu	0,0042	Cálculo
Reatância de potier	pu	0,177	Cálculo
Reatância síncrona de eixo direto não saturada	pu	1,98	Manual
Reatância síncrona de eixo em quadratura não saturada	pu	1,25	Manual
Reatância transitória de eixo direto não saturada	pu	0,43	Manual
Reatância subtransitória de eixo direto não saturada	pu	0,25	Manual
Reatância subtransitória de eixo em quadratura não saturada	pu	0,23	Manual

Depois de validado pelo ensaio das curvas do manual, o modelo respondeu conforme o esperado para a regulação de tensão em um barramento de corrente alternada, comprovando

que o mesmo está adequado com o comportamento real do compensador síncrono e pronto para ser utilizado em outros trabalhos.

Para a complementação desse trabalho, seria importante o estudo do comportamento da máquina em regimes transitórios da rede de energia no qual a mesma está inserida. Para isso seria necessário o levantamento de um histórico dos parâmetros relativos a essa rede de energia e as respostas da máquina frente a esse histórico levantado. Além disso, a parte do modelo referente à excitação do circuito de campo pode ser melhorada, com a implementação de diversos componentes existentes no circuito real do compensador.

8 BIBLIOGRAFIA

ASEA. **KGMS G1920 No. 5714031 LO 3580.18-2**. Carapina: ASEA, 1964.

BESSA, Alcebíades Rangel. **Estudo de Aplicação de Compensador Estático em Derivação do Tipo SVC na Linha de Transmissão Mesquita-Viana II em 500 kV**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória. 2015.

BESSA, Alcebíades Rangel; HENRIQUES, Fabrício de Souza; ÁVILA, Flávio C. Guimarães; JÚNIOR, Luiz C. de Menezes; OLIVEIRA, Rodney Cypreste. **Monitoramento do Baixo Isolamento do Mancal do Compensador Síncrono CS01 STVT.O**. Curitiba: 2017.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GRAINGER J. J & STEVENSON JR, W. D., **Power System Analysis** – International Editions, 1994.

JORDÃO, R. G. **Máquinas Síncronas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

KOSOW, I. L.. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 3. ed. Porto Alegre: Globo, 1979.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Mapas do SIN – Rede de Operação Sistêmica Regional/Local – Região Sudeste-Centro-Oeste**. Rio de Janeiro: ONS, 2015. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/download/mapas_rede_operacao/s_se_co/DU-CT.SE.01_r88.pdf>.

Acesso em: 23 mar. 2017.

SANTOS, Justino Hackbart Abreu dos. **Estudo e Modelagem dos Turbogeneradores na Planta de Produção de Óleo e Gás da Plataforma P-5**. Projeto de graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória, 2015.

SEN, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. 2. ed. Nova Iorque: John Wiley and Sons, 1996.