



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GAT/28
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE MÁQUINAS SÍNCRONAS COM REPRESENTAÇÃO EXPLÍCITA E DETALHADA DA EXCITATRIZ ESTÁTICA

Fernando Cattán Jusan (*)
FURNAS

Fernando Mendonça da Fonseca
FURNAS

Nilo Jose P. de Macedo
CONSULTOR

RESUMO

Este informe apresenta o desenvolvimento de um modelo de simulação detalhado de excitatriz estática para o programa de simulação em tempo real RTDS, com representação física de seus componentes (transformador de excitação, ponte retificadora, contator de campo, *crowbar*, etc.). É demonstrado que a representação da excitatriz através de um modelo convencional apresenta resultados equivalentes aos obtidos adotando-se a representação física e detalhada para distúrbios externos a excitatriz. São ilustrados ainda exemplos de simulação que só são possíveis de representar com precisão através de um modelo com representação explícita da excitatriz.

PALAVRAS-CHAVE

Máquinas síncronas, Sistemas de Excitação, Excitatriz Estática, RTDS, Simulação em Tempo Real

1.0 - INTRODUÇÃO

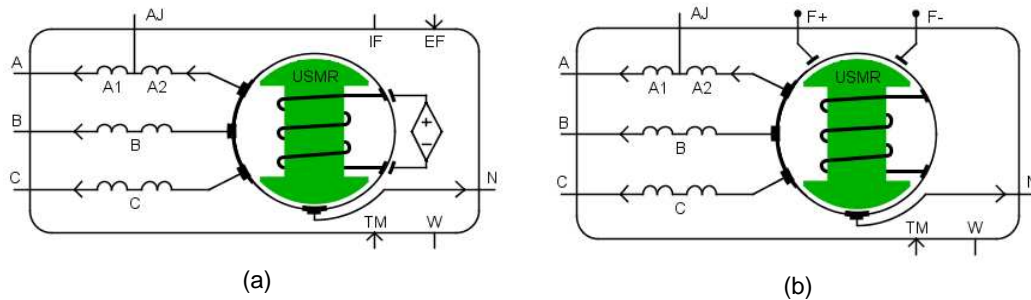
Os sistemas de excitação de máquinas síncronas são constituídos por duas partes principais: (i) Regulador Automático de Tensão (RAT), responsável pela regulação da tensão terminal ou da corrente de campo da máquina (etapa de controle) e (ii) Excitatriz, responsável pelo fornecimento de tensão e corrente contínua ao circuito de campo da máquina (etapa de potência). A forma de obtenção e de entrega desta corrente contínua ao campo define o tipo de excitatriz, que pode ser: rotativa, *brushless* ou estática. Neste informe serão consideradas apenas excitatrizes estáticas, ou seja, que alimentam o circuito de campo do gerador através de pontes retificadoras.

A representação do RAT em programas de estabilidade eletromecânica e de transitórios eletromagnéticos é geralmente realizada de forma bastante detalhada. Estes modelos incluem a malha principal do RAT, bem como a ação de sinais estabilizadores (PSS) e limitadores. Por outro lado, a representação da excitatriz estática é realizada de forma simplificada. A tensão de campo é dada por um sinal de controle (E_{FD}) proporcional ao sinal produzido pelo regulador de tensão (U_c) e que corresponde ao valor médio (em pu) da tensão CC aplicada ao circuito de campo. O sinal E_{FD} é então utilizado diretamente nas equações elétricas do modelo de Park da máquina síncrona.

O Simulador Digital em Tempo Real (RTDS® - *Real-Time Digital Simulator*) possui um modelo avançado de máquina síncrona para simulação de faltas internas (PDSM – *Phase-Domain Synchronous Machine*) [1], no qual é facultada ao usuário a seleção do tipo de entrada que deve ser aplicada ao campo do gerador, conforme ilustrado na Figura 1. A opção “Control System Input” corresponde ao tipo de entrada convencional, na qual a tensão de campo é determinada pelo sinal de controle EF, conforme ilustrado na Figura 1(a). Se a opção “Power System Node” é selecionada, dois nós elétricos (F+ e F-) são disponibilizados pelo modelo, Figura 1(b), os quais podem ser usados para energizar o enrolamento de campo através de componentes de sistema de potência (por exemplo,

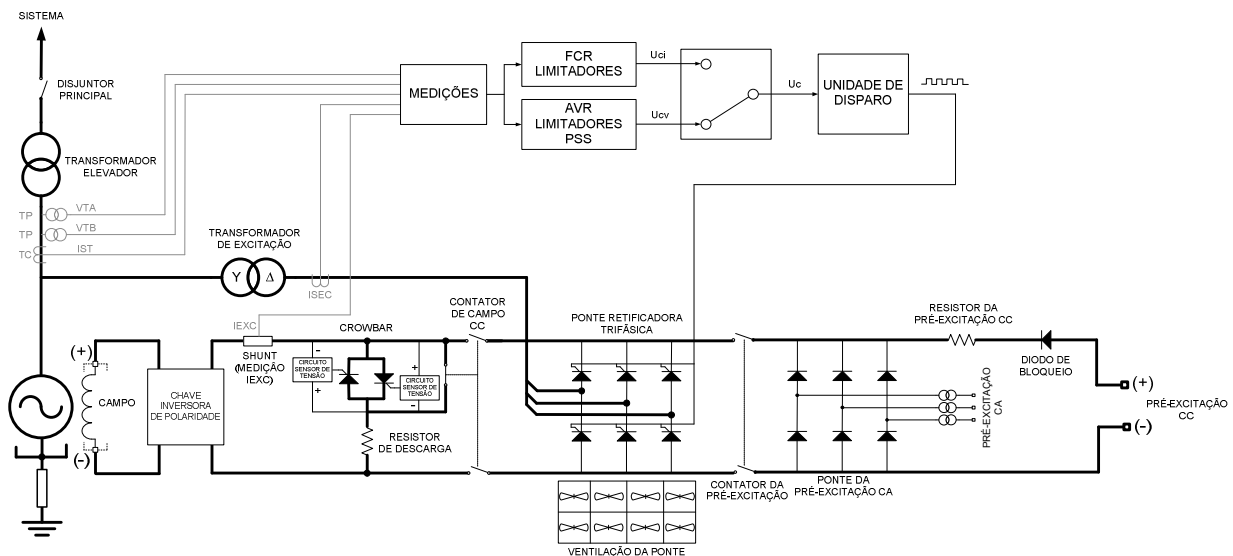
(*) Rua Real Grandeza, n° 219 – Sala 101 - Bloco E – CEP 22.281-900 Rio de Janeiro – RJ, Brasil
Tel: (+55 21) 2528-5451 – Fax: (+55 21) 2528-5528 – Email: cattan@furnas.com.br

Este trabalho tem dois objetivos principais: (i) demonstrar que a representação da excitatriz através de um modelo convencional apresenta resultados equivalentes aos obtidos adotando-se uma representação física e detalhada dos componentes de uma excitatriz estática para distúrbios externos a excitatriz (e.g. degraus nos sistemas de controle, curtos-circuitos na rede elétrica, rejeição de carga, etc.) e (ii) apresentar exemplos de simulações que só são possíveis de representar com precisão através de um modelo com representação explícita da excitatriz (e.g. perda de excitação, sequências de excitação e desexcitação, comutação entre pontes de tiristores positiva e negativa, atuação do *crowbar*, etc.).



2.0 - PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICO

Diferentes arranjos e configurações podem ser usados em sistemas de excitação estáticos, em função das características do gerador e das preferências do proprietário e do fabricante do sistema de excitação. A Figura 2 ilustra um diagrama esquemático típico de um sistema de excitação estático moderno.



Os principais elementos mostrados na Figura 2 são descritos a seguir:

Transformador de Excitação (TEX)→ É utilizado para isolar e reduzir a tensão dos terminais do gerador e aplicá-la à ponte retificadora (gerador auto-excitado). Os dados básicos necessários para simulação no RTDS são os mesmos usados para representação de transformadores convencionais.

Ponte Retificadora → É responsável pela conversão da tensão CA proveniente do transformador de excitação em tensão contínua a ser entregue ao circuito de campo. A configuração normalmente adotada é a ponte retificadora trifásica de seis pulsos totalmente controlada usando tiristores. A ponte retificadora tem capacidade de fornecer tensões de excitação positivas e negativas através do controle do ângulo de disparo dos tiristores, que normalmente é mantido na faixa de 10° a 150° . Por outro lado, a inversão da corrente de excitação não é possível.

uma vez que os tiristores são unidirecionais. Existem aplicações específicas em que é necessário prover o gerador com capacidade de corrente de excitação negativa. Neste caso, utilizam-se duas pontes retificadoras em conexão antiparalela: uma provendo corrente positiva e outra provendo corrente negativa. Apenas uma ponte pode estar conduzindo corrente em um determinado instante, de forma que deve ser prevista lógica para a comutação entre as pontes positiva e negativa. Cada tiristor possui um circuito de amortecimento (*snubber*) em paralelo, formado por um resistor em série com um capacitor, para supressão de transitórios associados à comutação e um fusível em série para proteção contra curto-circuito e sobrecorrente. Para a representação da ponte retificadora no RTDS são necessárias informações como: número de tiristores em série e paralelo, além de parâmetros básicos dos tiristores e dos elementos dos circuitos *snubber*.

Circuito de disparo → Os tiristores são disparados na sequência apropriada através de pulsos elétricos provenientes da unidade de disparo. O instante dos pulsos de disparo de cada tiristor é estabelecido pelo RAT por intermédio do ângulo de disparo ordenado, podendo utilizar diferentes técnicas para sincronizar estes pulsos com a tensão CA. A tensão contínua média na saída da ponte é função do ângulo de disparo, sendo dada pela equação a seguir:

$$E_{FD} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{SEC} \cdot \cos(\alpha) - R_C \cdot I_{FD} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde E_{FD} é a tensão contínua média na saída da ponte [V]; V_{SEC} é a tensão rms fase-fase do secundário do transformador de excitação [V]; α é o ângulo de disparo da ponte [°]; $R_C = (3/\pi) \cdot X_T$ é uma resistência equivalente para representar a queda de tensão contínua média devido ao processo de comutação [Ω], sendo X_T a reatância do transformador de excitação [Ω] e I_{FD} é a corrente contínua média na saída da ponte [A];

Contator de Campo (Função 41) → O contator de campo tem a finalidade de conectar a excitatriz aos anéis coletores do gerador e pode ser do tipo CC ou CA. O contator CC (mostrado na Figura 2) possui em geral três contatos, dois normalmente abertos (NA) ligados ao campo do gerador e um normalmente fechado (NF) ligado a resistência de descarga. Durante a transição entre os estados aberto/fechado há uma zona de superposição de aproximadamente 2 a 3ms (*mechanical overlap*) na qual todos os contatos estão fechados. Desta forma, a desconexão da ponte retificadora é feita sem interromper a circulação de corrente pelo campo. O contator CA (não mostrado na Figura 2) consiste basicamente em um disjuntor CA convencional conectado no secundário do transformador de excitação.

Resistência de Descarga de Campo → É parte fundamental do equipamento de desexcitação de campo do gerador. A ideia básica consiste em interromper a fonte CC que alimenta o campo do gerador e conectar um resistor em paralelo com o mesmo, servindo de caminho para a corrente de descarga que irá dissipar a energia armazenada no campo. Se a excitatriz é equipada com um contator CA, a inserção do resistor de descarga é feita obrigatoriamente através de uma chave estática (denominada *crowbar*). No caso de uma excitatriz equipada com contator CC, o resistor também pode ser inserido pelo contato NF do contator de campo. A resistência de descarga é representada no RTDS através de um resistor linear ou não-linear, dependendo da sua especificação.

Crowbar → O *crowbar* é uma chave estática bidirecional constituído por dois tiristores conectados em antiparalelo e disparados por um circuito elétrico dedicado. Quando algum dos tiristores é disparado, o *crowbar* entra em condução, conectando o resistor de descarga em paralelo com o campo do gerador. O *crowbar* pode ser disparado durante a sequência de desexcitação do gerador (normal ou de emergência) ou quando são detectadas sobretensões transitórias elevadas no campo do gerador. As sobretensões no campo podem ser originadas, por exemplo, por: perda de sincronismo da unidade geradora (escorregamento de pólos), faltas assimétricas com baixa corrente de campo, sincronização com elevada defasagem angular, etc. Nestas ocasiões, o estator induz tensões elevadas no rotor. O *crowbar* limita estas sobretensões abaixo dos níveis destrutivos dos equipamentos, criando um caminho para os semi-ciclos positivos ou negativos da corrente induzida no campo até que seja comandado o desligamento do gerador pelo sistema de proteção. Para representação no RTDS são necessários os parâmetros básicos dos tiristores e circuitos *snubber* associados.

Pré-Excitação → Quando o sistema de excitação é alimentado pelos terminais do gerador, a tensão terminal residual (devido ao fluxo remanente) normalmente não é suficiente para iniciar o processo de excitação. Desta forma, é necessário suprir por alguns segundos o enrolamento de campo da máquina com uma corrente de excitação externa relativamente pequena para iniciar a elevação da tensão terminal a um nível suficiente para garantir o disparo e manter a condução dos tiristores da ponte retificadora. Quando houver tensão suficiente no terminal da máquina, inicia-se o processo de disparo da ponte de tiristores e a pré-excitação pode ser desconectada. A energia necessária para a pré-excitação pode vir tanto do banco de baterias (pré-excitação CC) quanto dos serviços auxiliares CA da usina (pré-excitação CA). A pré-excitação é conectada à ponte retificadora através de um contator (Função 31). Este contator permanece fechado somente durante os poucos segundos no qual a pré-excitação permanece ligada. Um diodo de bloqueio em série com a pré-excitação CC previne que uma corrente de retorno seja injetada no banco de baterias. A pré-excitação CC conta ainda com um resistor em série para adequar o nível de tensão do banco de baterias à tensão necessária ao campo. A pré-excitação é também chamada de “circuito de excitação inicial”, “escorva de campo” ou “*field flashing*”.

Regulador Automático de Tensão → O equipamento responsável pelo controle da excitação é rotineiramente chamado de Regulador Automático de Tensão (RAT), apesar de a regulação de tensão ser apenas uma das muitas funções realizadas por estes controladores. Atualmente, os RATs são equipamentos digitais micro-processados providos de redundância de canais. Além da função de básica de regulação da tensão, outras ações importantes do controle excitação são desempenhadas pelo RAT: regulação da corrente de campo (controle “manual”), compensação de corrente reativa (CCR), limitadores (sub e sobre-excitação, V/Hz e corrente estatórica), PSS, controle de fator de potência, controle de potência reativa, bem como controle e coordenação das sequências automáticas durante o processo de partida e parada da excitação.

3.0 - DADOS DO SISTEMA TESTE

O diagrama unifilar do sistema-teste representado no RTDS é mostrado na Figura 3. O sistema é constituído por um gerador síncrono de pólos salientes conectado a uma barra infinita através de um transformador elevador de 13,8/500 kV e uma impedância de curto-circuito (Z_{inf}). O gerador é equipado com uma excitatriz estática e um regulador de velocidade (RV). As impedâncias de curto-circuito do transformador elevador e do sistema são mostradas na própria figura (em % na base 100 MVA).

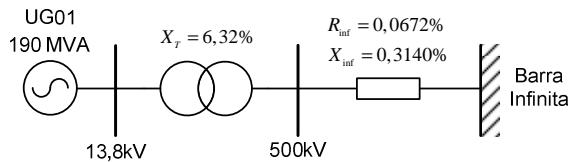


Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema teste

Das curvas de saturação do gerador é possível extrair alguns valores notáveis de tensão e corrente de campo, conforme apresentados na Tabela 1. No RTDS, quando a opção “Power System Node” é selecionada, deve ser fornecido ao modelo o valor de corrente de campo, em kA, que produz 1.0 pu de tensão terminal na linha do entreferro com o gerador em vazio (IF_{AG}). Este valor também corresponde a base de corrente de campo do gerador no RTDS ($IF_B = IF_{AG}$) (sistema recíproco). A base adotada para a tensão de campo é $UF_B = UF_{AG}$.

A relação entre tensão e corrente de campo para uma determinada condição operativa é dada pela resistência de campo ($R_F = U_F / I_F$). Esta resistência varia em função da temperatura do enrolamento do rotor e, portanto, depende da própria condição operativa do gerador. Isto representa um fator complicador nas análises práticas. Por simplicidade, assumiu-se neste trabalho uma resistência de campo fixa, como é prática usual na representação de geradores em estudos de estabilidade.

Tabela 1 – Tensão e corrente de campo obtidas das curvas de saturação do gerador a tensão nominal

Parâmetro	UF		IF	
Tensão e corrente de campo na linha do entreferro	UF_{AG}	230 V	IF_{AG}	575 A
Tensão e corrente de campo em vazio	UF_0	248 V	IF_0	620 A
Tensão e corrente de campo nominal em carga	UF_N	436 V	IF_N	1090 A

Os parâmetros do sistema de excitação apresentados na Tabela 2 podem ser extraídos da memória de cálculo do sistema de excitação, de folhas de dados ou das placas dos equipamentos. Estes dados foram utilizados para modelar a excitatriz estática no RTDS.

Tabela 2 – Parâmetros do sistema de excitação

Parâmetro		Valor	
UF_{P+}	Tensão de teto positiva	981 Vcc	4,3 pu
UF_{P-}	Tensão de teto negativa	-785 Vcc	-3,4 pu
IF_D	Corrente de campo de projeto (regime permanente)	1254 Acc	2,18 pu
IF_P	Corrente de teto transitória (10 segundos)	1744 Acc	2,81 pu
$S_{3\phi_TEX}$	Potência trifásica nominal do TEX	1500 kVA	
V_{P_TEX}	Tensão nominal no primário (Y) do TEX	13,8 kV	
V_{S_TEX}	Tensão nominal no secundário (Δ)	780 V	
X_{T_TEX}	Reatância de dispersão do TEX	6%	
R_T	Resistência do tiristor da ponte retificadora no estado ligado	0,127 m Ω	
R_S	Resistência do circuito snubber da ponte retificadora	0,47 Ω	
C_S	Capacitância do circuito snubber da ponte retificadora	47 μ F	
R_D	Resistência de descarga	0,32 Ω	
$S_{3\phi_PRE_CA}$	Potência trifásica nominal do transformador da pré-excitação CA	7,5 kVA	
$V_{S_PRE_CA}$	Tensão nominal no secundário do transformador da pré-excitação CA	43 V	
$X_{T_PRE_CA}$	Reatância de dispersão do transformador da pré-excitação CA	3%	
$U_{F_PRE_CC}$	Tensão da pré-excitação CC	125 Vcc	
$R_{F_PRE_CC}$	Resistência série da pré-excitação CC	0,507 Ω	
$V_{CROWBAR}$	Tensão de disparo do crowbar	1900 Vcc	8,26 pu

4.0 - DESCRIÇÃO DOS MODELOS IMPLEMENTADOS NO RTDS

O sistema foi modelado utilizando os componentes existentes na biblioteca principal do RTDS. O modelo *rtds_SHARC_MAC_V3* foi utilizado para a representação do gerador da forma convencional, enquanto o modelo *rtds_PDSM_FLT_v2* representa o modelo de falta interna, que permite a modelagem explícita da excitatriz estática.

Foram representadas no RTDS três modelos de excitatriz com diferentes níveis de detalhamento:

- Modelo PDSM → Modelo físico, com representação explícita da excitatriz;
- Modelo CONV → Modelo convencional, com representação detalhada da excitatriz;
- Modelo SIMPL → Modelo convencional, com representação simplificada da excitatriz.

Em todos os modelos, a mesma representação é utilizada para o RAT, cuja malha principal é mostrada na Figura 4. Neste modelo os pontos de entrada dos limitadores (LSE e LIF) e do sinal adicional estabilizador (V_{SAD}) são indicados. A saída do RAT (U_c) é enviada ao módulo de disparo, que é responsável pela produção dos pulsos de disparo que são aplicados nos terminais de gatilho dos tiristores da ponte retificadora.

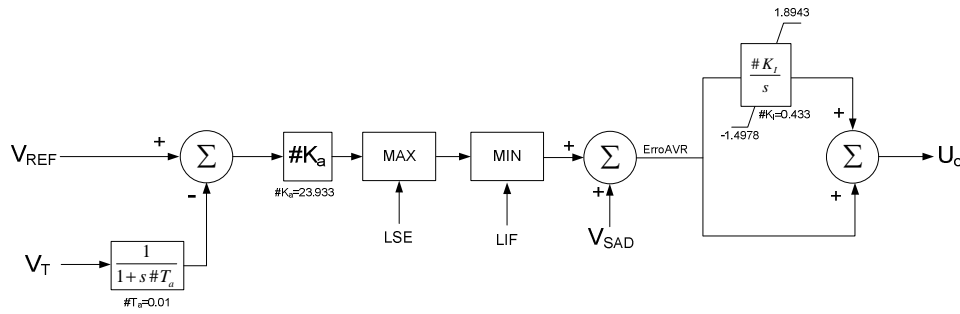


Figura 4 – Malha principal do RAT representada nos modelos PDSM, CONV e SIMPL

4.1 Modelo PDSM

Neste modelo, a excitatriz é representada de forma explícita e detalhada, ou seja, representam-se equipamentos como: transformador de excitação, contator de campo, ponte retificadora, circuito de disparo, *crowbar*, etc. A Figura 5 mostra a representação do modelo PDSM no RTDS, destacando-se o modelo da excitatriz.

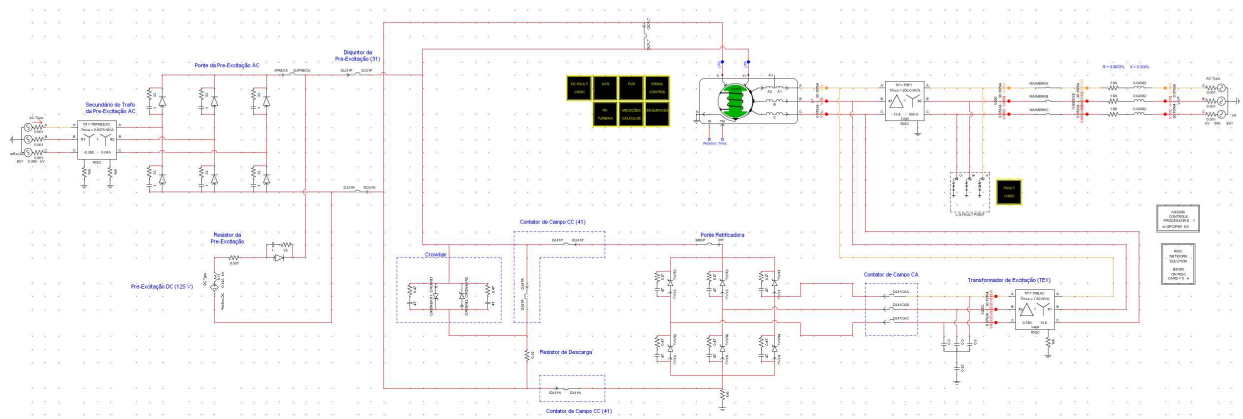


Figura 5 – Representação da excitatriz – Modelo PDSM

A geração e sincronização dos pulsos de disparo da ponte retificadora é realizada neste trabalho através de um circuito PLL ("Phase-Locked Loop"). O PLL requer como sinal de entrada o ângulo de disparo ordenado (α_{ORD}), que está diretamente ligado ao sinal de controle U_c produzido pelo RAT. A relação entre U_c e α é ajustável e pode ser levantada a partir de ensaios do sistema de excitação. Os circuitos de disparo são normalmente projetados de tal forma que haja uma relação linear entre a tensão de controle U_c e a tensão de campo E_{FD} . Como a relação entre α e E_{FD} é cossenoidal (Eq. 1), é prática usual aplicar uma função de linearização no sinal de controle U_c . Inicialmente, normaliza-se o sinal de controle em relação aos seus limites ($-1.4978 < U_c < 1.8943$), de forma que $-1.0 < U_{CNORM} < 1.0$. O ângulo de disparo ordenado é calculado pelo arco cosseno de U_{CNORM} e então submetido a limites práticos ($10^\circ < \alpha_{ORD} < 150^\circ$), que estabelecem a tensão de teto ("ceiling") positiva e negativa da excitatriz. A função de linearização usada neste trabalho é mostrada na Figura 6.

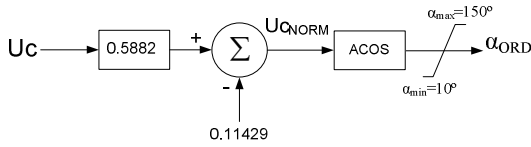


Figura 6 – Função de linearização ($\alpha \times Uc$)

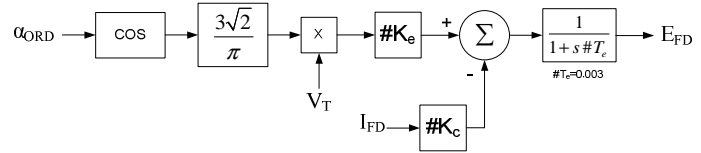


Figura 7 – Representação da excitatriz – Modelo CONV

4.2 Modelo CONV

A representação da excitatriz usada no modelo CONV é apresentada na Figura 7, onde todos os sinais estão em pu. O ângulo de disparo ordenado é determinado utilizando a mesma função de linearização do modelo PDSM, mostrada na Figura 6. Neste modelo representa-se a equação de conversão CA/CC e, como o gerador é auto-excitado, multiplica-se o resultado por V_T (em pu) para que variações na tensão terminal sejam refletidas na tensão de campo resultante. O ganho K_e representa o “ganho da excitatriz”, que está relacionado basicamente com as características do transformador de excitação. O ganho K_c representa uma resistência equivalente utilizada para contabilizar a queda na tensão média na saída da ponte devido ao efeito da comutação (que é basicamente função da impedância do transformador). Por fim, uma pequena constante de tempo é inserida no modelo para representar o atraso associado ao processo de disparo da ponte.

Os ganhos K_e e K_c podem ser calculados a partir dos parâmetros de projeto ou, mais comumente, ajustados com base em resultados de ensaios de campo do sistema de excitação. Neste trabalho, os resultados obtidos com o modelo PDSM foram utilizados como referência. Os valores finais usados foram $K_e=3.5$ pu/pu e $K_c=0.339$ pu/pu.

4.3 Modelo SIMPL

Neste modelo, não há representação da função de linearização $\alpha \times Uc$, da equação de conversão CA/CC, da parcela referente a queda de tensão devido a comutação e do atraso da ponte. O modelo é composto basicamente por um ganho e um offset que relacionam a tensão de controle Uc com a tensão de campo na saída da ponte, conforme mostrado na Figura 8. O “ceiling” da excitatriz é representado através de limites aplicados diretamente no sinal E_{FD} , cujos valores estão em conformidade com os apresentados na Tabela 2. O ganho K_e também foi ajustado com base nos resultados obtidos com o modelo PDSM, obtendo-se o valor $K_e=2.5$ pu/pu.

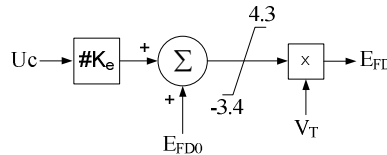


Figura 8 – Representação da excitatriz – Modelo SIMPL

5.0 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PDSM, CONV E SIMPL

Neste item será demonstrada a equivalência entre os três modelos (PDSM, CONV e SIMPL) para distúrbios externos a excitatriz do gerador. Foram realizados diversos testes de comparação e os resultados de dois deles são apresentados a seguir.

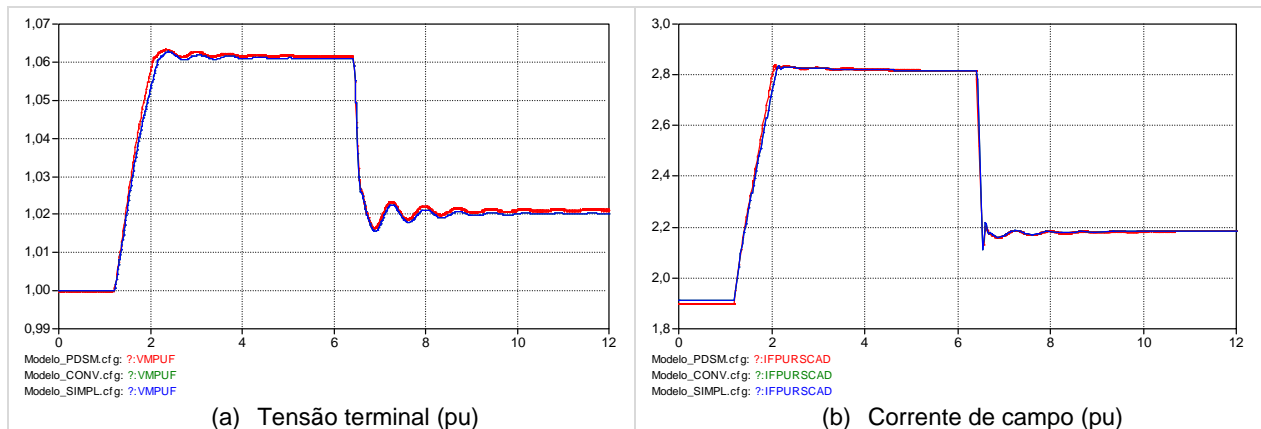


Figura 9 – Degrau de 10% em V_{REF} em carga: (a) Tensão terminal; (b) Tensão de campo

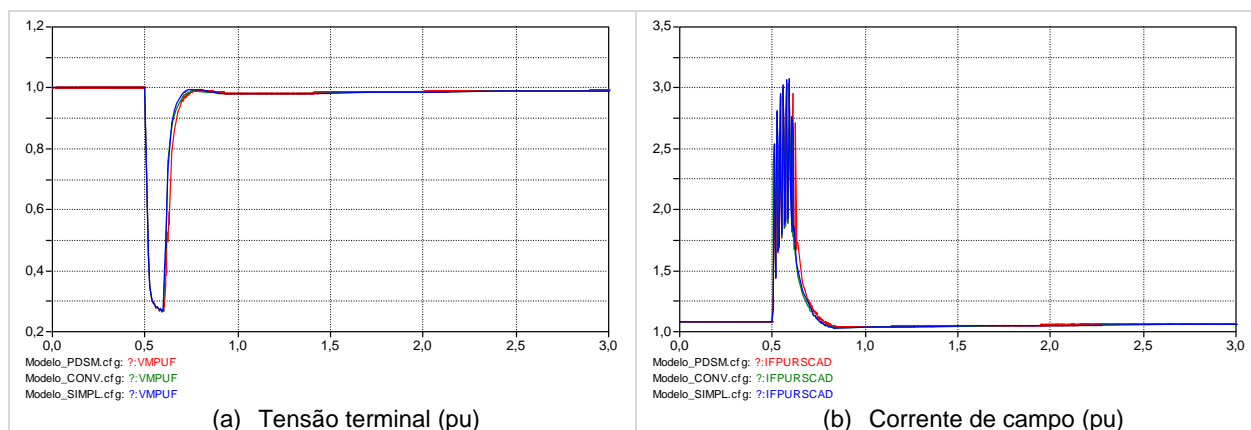


Figura 10 – Curto-circuito trifásico na barra de 500 kV em vazio: (a) Tensão terminal; (b) Corrente de campo

5.1 Degrau de +10% na Tensão de Referência do RAT

A Figura 9 apresenta os resultados da aplicação de um degrau de +10% na tensão de referência do RAT com o gerador em carga. Nota-se a atuação do limitador de sobre-excitação instantâneo em aproximadamente $T=2s$ e o temporizado em aproximadamente $T=6.5s$. Os resultados obtidos com os três modelos são bastante semelhantes.

5.2 Curto-Circuito Trifásico na Barra de 500kV

A Figura 10 apresenta os resultados da aplicação de um curto-circuito trifásico na barra de 500 kV do gerador por 100ms com o gerador em vazio. Os resultados obtidos com os três modelos são novamente bastante semelhantes.

6.0 - TESTES COM O MODELO PDSM

6.1 Sequência de Excitação

A sequência de excitação consiste basicamente em elevar a tensão terminal de forma controlada durante o processo de partida da máquina. Diferentes filosofias e estratégias podem ser adotadas, mas o princípio básico é o mesmo em todos os casos. A filosofia ilustrada neste informe é descrita a seguir.

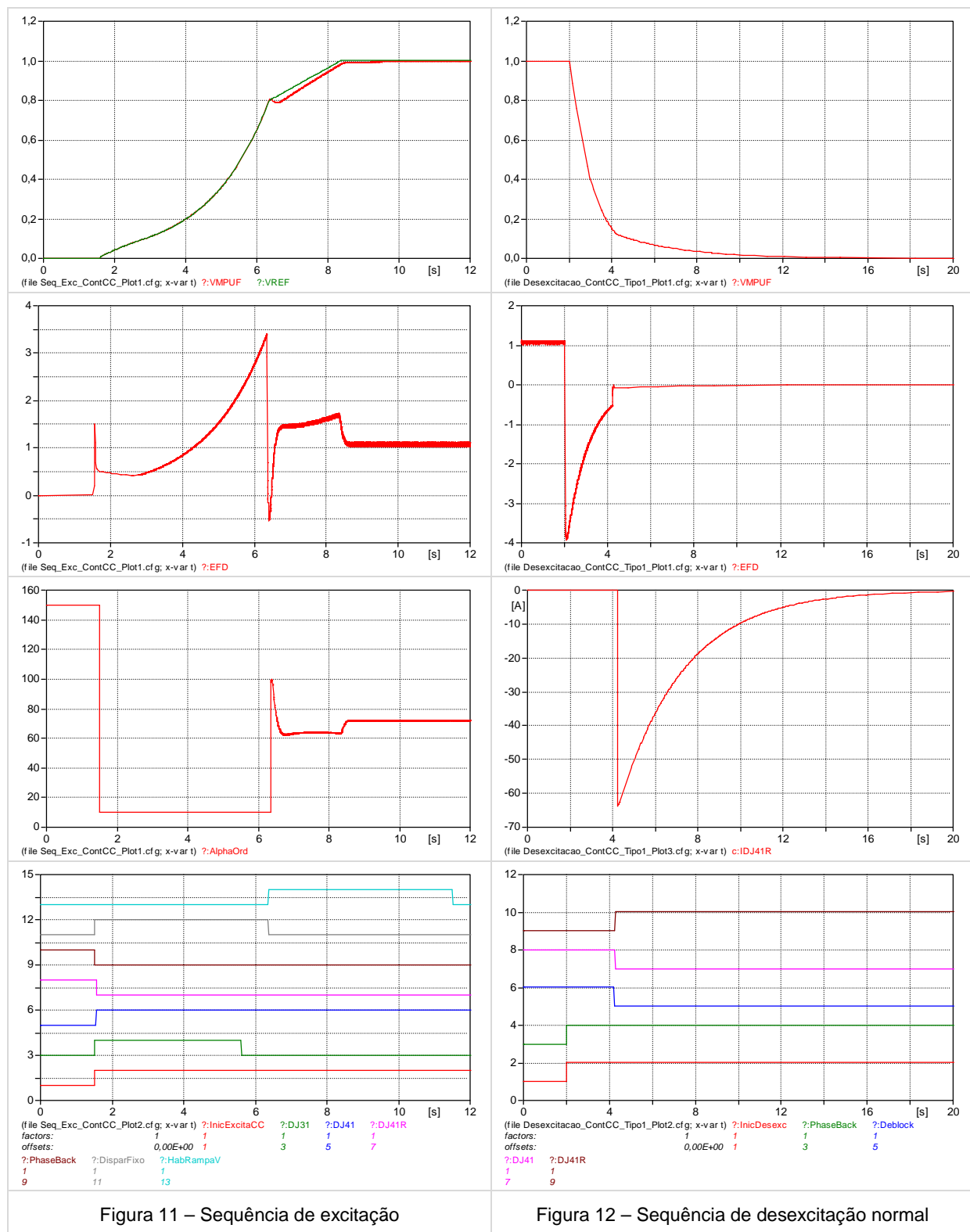
Ao receber o comando para ligar a excitatriz, são comandados simultaneamente o fechamento do contator de campo CC (DJ41) e do contator da pré-excitação (DJ31), bem como é ordenado o desbloqueio da ponte retificadora. A ponte é desbloqueada com o regulador em malha aberta forçando o ângulo de disparo no seu valor mínimo (10°), que corresponde a uma tensão máxima na saída da ponte. Como o gerador é auto-excitado, a corrente de campo é totalmente suprida pela pré-excitação durante os segundos iniciais. Assim, uma tensão contínua constante é aplicada ao enrolamento de campo, de forma que a tensão terminal cresce muito rapidamente. A medida que a tensão terminal se eleva, a tensão na saída da ponte retificadora também se eleva, até que supera o valor da tensão da pré-excitação. Neste ponto, a pré-excitação deixa de fornecer corrente ao enrolamento de campo, que passa a ser alimentado pela ponte retificadora principal (início da operação auto-excitada). O contator da pré-excitação é aberto quando a tensão terminal atinge 50%, estabelecendo-se o fim do estágio da pré-excitação. A tensão terminal continua a subir muito rapidamente, uma vez que a ponte retificadora está sendo disparada com alfa mínimo. Quando a tensão atinge 80%, inicia-se o processo de rampa da referência de tensão com o regulador em malha fechada, no qual a tensão terminal é levada de forma suave até o valor nominal. Os resultados da simulação no RTDS são mostrados na Figura 11.

6.2 Sequência de Desexcitação (parada normal)

O processo de desexcitação consiste basicamente em retirar a energia acumulada no campo do gerador de forma controlada. Diferentes sequências são previstas no caso de uma parada normal do sistema de excitação ou da atuação de uma proteção elétrica do gerador. A filosofia e sequências adotadas dependem das preferências do fabricante e do tipo de contator utilizado (CA ou CC). São empregados dois recursos básicos no processo de desexcitação do campo: (i) Aplicação de *phase-back*, que consiste em disparar os tiristores da ponte retificadora com um ângulo de 150° , invertendo a tensão sobre o campo do gerador e, consequentemente, forçando a redução rápida da corrente de campo (modo inversor); (ii) Conexão do resistor de descarga em paralelo com o campo do gerador, servindo de caminho alternativo para a corrente de campo (através do contator CC ou do *crowbar*).

A Figura 12 mostra os resultados obtidos no RTDS para uma desexcitação iniciada na parada normal do sistema de excitação. Inicialmente, é aplicado um *phase-back* na ponte retificadora, invertendo-se a tensão de campo e reduzindo rapidamente a corrente de excitação. Quando a corrente cai abaixo de 0.1 pu, comanda-se

simultaneamente o bloqueio da ponte e a abertura do contator de campo (inserindo a resistência de descarga através do contato auxiliar).



6.3 Perda de Excitação

Em condições normais, o limitador de sub-excitação garante a operação do gerador dentro dos limites da curva de capacidade, evitando potenciais danos ao gerador e à estabilidade do sistema elétrico. Porém, existem situações em que há perda total da excitação e não há nada que o RAT e seus limitadores possam fazer, como por exemplo: abertura intempestiva do contator de campo, curto-circuito nos terminais do rotor, abertura do circuito de campo

devido a mau contato nas escovas da excitatriz, etc. Nestes casos, é fundamental que o sistema de proteção (Relé 40) seja capaz de detectar estas condições precisa e rapidamente antes que ocorra perda de sincronismo, desconectando preventivamente o gerador do sistema elétrico.

A Figura 13 apresenta os resultados da simulação de perda de excitação por abertura intempestiva do contator de campo, obtidos com o modelo PDSM no RTDS. O gerador passa a absorver níveis crescentes de potência reativa do sistema, levando a uma queda acentuada na tensão terminal. Devido ao elevado carregamento inicial do gerador, inicia-se o processo de escorregamento de pólos e o gerador passa a operar como um gerador de indução, culminando na perda de sincronismo entre o gerador e o sistema de potência.

Mecanismo semelhante ocorre quando há um curto-circuito nos terminais do rotor, próximo aos anéis coletores. Neste caso, a tensão de campo é levada a zero devido ao curto-circuito. Diferentemente do caso anterior, este evento também pode ser reproduzido usando os modelos CONV e SIMPL, simplesmente fazendo E_{FD} igual a zero. Os resultados obtidos com os três modelos são mostrados na Figura 14.

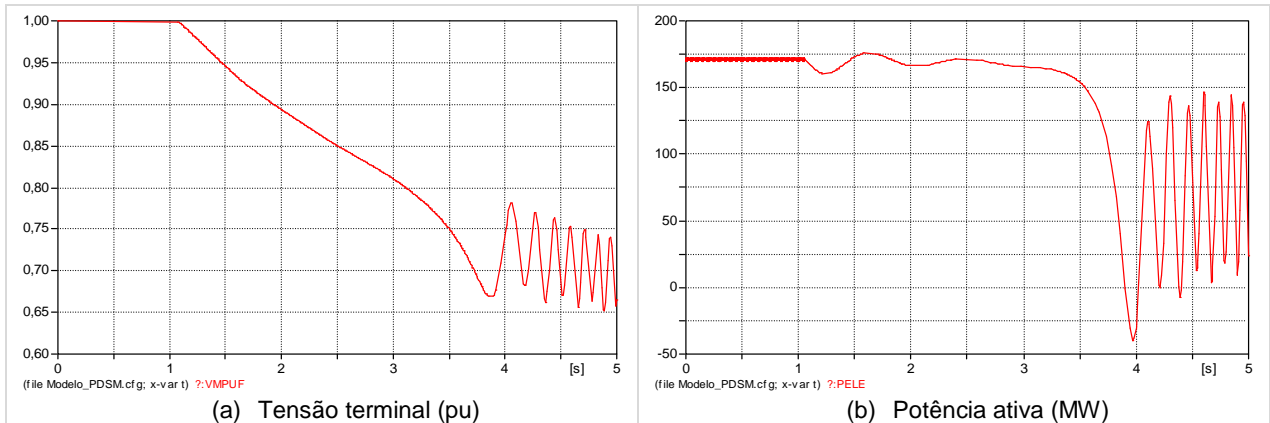


Figura 13 – Perda de excitação por abertura do contator de campo: (a) Potência ativa; (b) Potência reativa

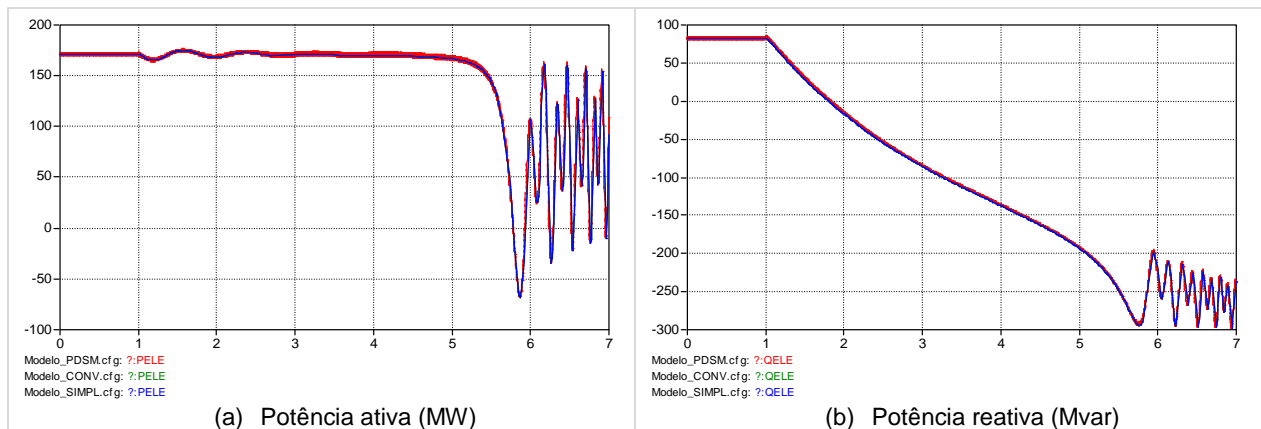


Figura 14 – Perda de excitação por curto-circuito no rotor: (a) Potência ativa; (b) Potência reativa

7.0 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este informe apresentou o desenvolvimento de um modelo de simulação detalhado de excitatriz estática, com representação física de seus componentes. A equivalência deste modelo com modelos convencionais, usados em programas de estabilidade e de transitórios eletromagnéticos, foi demonstrada a partir de perturbações externas a excitatriz. Em seguida foram ilustradas simulações que só são possíveis de representar com precisão através de um modelo com representação explícita da excitatriz.

O modelo desenvolvido permitirá a reprodução de eventos para análise de ocorrências que até então não eram analisadas ou eram analisadas de forma imprecisa com modelos convencionais. Permitirá ainda realizar estudos mais detalhados de otimização do ajuste de controladores e de coordenação com as proteções do gerador.

Como a simulação é executada em tempo real através de uma interface gráfica configurável e amigável, o trabalho desenvolvido também poderá servir como base para o desenvolvimento de um simulador para treinamento de operadores de usinas. A tela de execução do modelo pode ser configurada para reproduzir telas típicas de IHM de sistemas de excitação reais, nas quais o usuário interage com o equipamento através de botões, chaves e

comandos.

Nesta etapa do trabalho, as funções de transferência e lógicas do sistema de controle foram representadas no RTDS através de diagramas de blocos e de sequenciadores no modelo de simulação digital. A próxima etapa consiste em conectar o modelo desenvolvido a réplicas físicas de reguladores de tensão (simulação "*hardware-in-the-loop*"), permitindo o teste de equipamentos reais e ampliando a capacidade de análise.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. B. Dehkordi, P. Neti, A.M Gole, and T.L. Maguire, "Development and Validation of a Comprehensive Synchronous Machine Model for a Real-Time Environment", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 25, No. 1, March 2010.