

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Bruno Maciel Machado

**Ensaio em reguladores de tensão de geradores com sinais externos
aplicados ao transformador de potencial: concepção, análise, implementação e
testes de campo**

Florianópolis

2021

Bruno Maciel Machado

Ensaio em reguladores de tensão de geradores com sinais externos aplicados ao transformador de potencial: concepção, análise, implementação e testes de campo

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.
Coorientador: Rafael Bertolini de Paiva, M.Sc.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Machado, Bruno Maciel

Ensaio em reguladores de tensão de geradores com sinais externos aplicados ao transformador de potencial: concepção, análise, implementação e testes de campo / Bruno Maciel Machado ; orientador, Aguinaldo Silveira e Silva, coorientador, Rafael Bertolini de Paiva, 2021.

112 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Máquina síncrona. 3. Regulador de tensão. 4. Estabilizador do Sistema de Potência. I. e Silva, Aguinaldo Silveira . II. de Paiva, Rafael Bertolini. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Bruno Maciel Machado

Ensaio em reguladores de tensão de geradores com sinais externos aplicados ao transformador de potencial: concepção, análise, implementação e testes de campo

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 20 de maio de 2021.

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Aguinaldo Silveira e Silva
Data: 31/05/2021 13:35:01-0300
CPF: 344.792.879-49
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

A handwritten signature in black ink, appearing to be "AS" followed by a horizontal line.

Rafael Bertolini de Paiva, M.Sc.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Antonio Felipe da Cunha de Aquino
Data: 01/06/2021 14:05:52-0300
CPF: 044.652.117-59
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, Dr. (UFSC)
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo
Data: 01/06/2021 18:41:04-0300
CPF: 833.860.500-00
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Eng. Eletric. Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo, Me.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe por todo o esforço realizado para que eu pudesse ter acesso a uma boa educação e à minha avó e ao meu avô por todos os ensinamentos.

Aos professores do Centro Tecnológico da UFSC, sobretudo, os que compõem o departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, por serem os principais agentes no mantimento do ensino de qualidade do curso e no desenvolvimento profissional de inúmeros alunos.

Aos meus primeiros colegas de trabalho e pesquisa em engenharia, tanto no laboratório L3C, Prof. Mauro Roisenberg, Isaac Sacramento e Tcharlies Schmitz, assim como no INEP, Prof. Marcelo Heldwein, Gean de Sousa, Jacson de Oliveira e Márcio Moura, por me ajudarem a dar os meus primeiros passos na carreira e me darem as minhas primeiras oportunidades.

À empresa Reivax Controle e Automação por propiciar o tema deste trabalho, assim como por me dar acesso a informações e equipamentos. Desta forma, agradeço também aos profissionais que compõem a companhia, os quais foram significativos para o meu aprimoramento técnico e pessoal.

Realizo um agradecimento especial ao engenheiro Rafael Bertolini de Paiva, o qual foi o idealizador do método aqui apresentado e que me colocou, desde a sua concepção, junto ao projeto, gerando, assim, oportunidades únicas para o meu desenvolvimento profissional.

A todos aqueles que me ajudaram a compor a forma que eu enxergo a educação, a carreira profissional e o mundo como um todo, dentre eles, meus amigos, Tarcísio, Victor, Leonardo e Juliana e meus tios Fagner e Júlio.

Por fim, à Universidade Federal de Santa Catarina, pelo ensino e à sociedade brasileira, pelo seu financiamento.

Se não for possível ir de elevador, vá de escada, mas vá!
(Maria Lúcia Maciel, minha avó)

RESUMO

A máquina síncrona é peça-chave no sistema elétrico de potência. Contudo, para que esta desempenhe um funcionamento seguro e eficiente, ela deve ser regulada de forma a atender às suas próprias demandas e às do sistema elétrico. O regulador de tensão, por sua vez, é incumbido de, entre outras coisas, regular a tensão terminal do gerador, limitar sua operação e prover torque capaz de amortecer oscilações eletromecânicas através do estabilizador de potência. Assim, para que se possam ser realizados testes de comissionamento, de análise de desempenho e de modelagem desses equipamentos, uma série de ensaios é feita. Tais testes exigem, muitas vezes, a injeção de sinais, sejam eles para obter a resposta ao degrau ou resposta em frequência, por exemplo. Ademais, não é incomum, querer injetar sinais estabilizantes externos, dado que, por vezes, o estabilizador local é incapaz de estabilizar satisfatoriamente a unidade geradora. Portanto, este trabalho tem o objetivo de apresentar uma nova técnica desenvolvida pela empresa Reivax Controle e Automação, capaz de injetar sinais diversos ao regulador de tensão através do sinal de medição da realimentação da máquina síncrona, usando transformadores de potencial e malha de captura de fase. Desta forma, o trabalho traz, inicialmente, uma apresentação do contexto de geração de energia no qual o método se faz presente. Em seguida, é feita a discussão do método proposto, trazendo informações de seu funcionamento através de dados e discussões analítico-matemáticas, além de explicar sua estrutura e os equipamentos necessários para a sua aplicação. Logo após esta seção, são trazidos resultados obtidos a partir de simulações computacionais de forma a clarificar o funcionamento do método, além de submetê-lo a certas situações adversas. Por fim, são trazidos dados de utilização do método em campo em usinas hidrelétricas no Peru, onde o método foi utilizado para realizar a resposta em frequência da unidade geradora, além de injetar torque amortizante e sinal degrau externamente à malha local de regulação de tensão.

Palavras-chave: Máquina síncrona. Regulador de tensão. Estabilizador do Sistema de Potência.

ABSTRACT

The synchronous machine plays a key role in the power system. However, in order to ensure an efficient and secure functioning of the Synchronous Machine (SM) and of the electric grid as a whole, the first might be regulated so as to respect both the electric grid's demand and the Synchronous Machine's operation limits. The Automatic Voltage Regulator (AVR) has as functions the regulation of synchronous machine's terminal voltage, the assurance that the machine's operation is restricted to its operational limits and providing damping torque by means of the Power System Stabilizer (PSS) actuation. Therefore, in order to make commissioning, performance analysis and modeling tests of those equipments, a series of tests has to be performed. Those tests often demand the injection of different signals, such as to obtain the step and frequency response, for example. In addition, sometimes one might want to inject external stabilizing signals, once sometimes the native PSS is incapable of achieving the expected performance. Therefore, the author intends with this work to present a new technique developed by the company Reivax Control and Automation, that enables the injection of different signals to the AVR through the SM's terminal voltage measurement, this is achieved through the utilization of power transformers and phase locked loops. Hence, the work brings, initially, a presentation of the electric energy generation context, in which the technique is applicable. Then, a discussion about the proposed technique is made, informing about its functioning through data and mathematical analysis. After that, it is presented data generated with computational simulation in order to clarify the technique's functioning and to put it under unfavorable situations. Finally, it is presented some data generated while applying the technique in field tests, performed in hydroelectric power plants in Peru. The tests comprehend frequency response obtained through the technique and the injection of external stabilizing and step signal to the AVR loop.

Keywords: Synchronous machine. Automatic voltage regulator. Power system stabilizer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de geração de energia elétrica de uma máquina síncrona.	21
Figura 2 – Estrutura de regulação de tensão de uma máquina síncrona.	22
Figura 3 – Curva de capacidade de uma máquina síncrona.	23
Figura 4 – Algumas topologias de excitatrizes: (a) Geradores CC em cascata; (b) Máquina de relutância em cascata; (c) Gerador síncrono com retificador rotativo; (d) Retificador controlado alimentado pelo sistema auxiliar; (e) Retificador controlado alimentado pelos terminais do gerador; (f) Retificador controlado alimentado pelas corrente e tensão do gerador.	26
Figura 5 – Estrutura de excitatriz estática encontrada nos laboratórios da empresa Reivax S.A.	27
Figura 6 – Estrutura do RT e dos principais sinais que o alimentam.	29
Figura 7 – Resposta dinâmica da tensão diante a um sinal degrau no valor de referência.	29
Figura 8 – Registro de excitação gradativa.	31
Figura 9 – Registro de excitação automática em modo de controle automático.	32
Figura 10 – Registro de excitação automática em modo de controle manual.	32
Figura 11 – Registro de desexcitação.	33
Figura 12 – Dinâmica de resposta ao degrau em carga em modo automático.	34
Figura 13 – Registro do ensaio de limitador de subexcitação.	35
Figura 14 – Registro do ensaio de limitador de sobreexcitação.	36
Figura 15 - Conexão padrão de leitura da tensão terminal da MS pelo RT.	37
Figura 16 - Exemplo de RT com ponto de soma.	39
Figura 17 - Exemplo de RT com seletores.	39
Figura 18– Curva de Capacidade com limitadores de subexcitação e sobreexcitação.	40
Figura 19 – Estrutura simplificada de um RT clássico.	41
Figura 20 – Oscilação inter-área na frequência do SEP.	42
Figura 21 – Oscilação torsional na tensão de campo, frequência e potência ativa de uma UG.	43
Figura 22 – Estrutura de ESP de uma única entrada – PSS1A.	44
Figura 23 – Estrutura de ESP de potência acelerante – PSS2C.	45

Figura 24 – Estrutura de ESP multibanda – PSS4C.	46
Figura 25 – Resposta em frequência do sistema GEP.....	48
Figura 26 – Faixa aceitável de fase para o ESP.	49
Figura 27 – Faixa aceitável de fase para o ESP.	49
Figura 28 – Grandezas da MS com e sem GEP.	50
Figura 29 – Esquemático da metodologia proposta.	53
Figura 30 – Esquemático de distribuição da medição da tensão terminal da MS para o CLP e para o TP de soma.....	54
Figura 31 – Esquemático de conexão do sinal de V_t com o RT, através do TP de soma.	55
Figura 32 – Esquemático de conexão do sinal do CLP ao TP de soma.....	55
Figura 33 – Malha de Captura de Fase de Sequência Positiva utilizada.	57
Figura 34 – Malha de Captura de Fase de Sequência Positiva com representação no sistema de coordenadas dq	57
Figura 35 – Malha de Captura de Fase de Sequência Positiva com representação no sistema de coordenadas $\alpha\beta$	58
Figura 36 – Geração do sinal V_{pll} a partir de θ_{pll}	59
Figura 37 - Tensões sintetizadas pela PLL a partir de tensões ruidosas e desbalanceadas.	60
Figura 38 - Fasores trifásicos das tensões medidas pelo TP de medição, V	61
Figura 39 - Fasores trifásicos das tensões sintetizadas pela PLL, V_{pll}	61
Figura 40 - Sinal de amplitude A injetado na malha de controle do RT por meio de um ponto de soma.....	62
Figura 41 - Sinal de amplitude A injetado na malha de controle do RT por meio do método de realimentação.	62
Figura 42 – Fasores trifásicos da soma das tensões terminais com as tensões sintetizadas.	63
Figura 43 – Topologia do RT utilizado na simulação.....	67
Figura 44 – Tensão da fase A de V , Tensão Terminal da MS.....	68
Figura 45 – Fase Instantânea de V	68
Figura 46 – Frequência de V rastreada pela PLL.	69
Figura 47 – Implementação da PLL.	69
Figura 48 – Tensão da fase A de V_{pll} , antes e depois do degrau.....	70

Figura 49 – Tensão da fase A da Tensão Terminal da MS com aplicação na realimentação.....	71
Figura 50 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na realimentação.....	71
Figura 51 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na através de um ponto de soma.....	72
Figura 52 – Implementação do ESP na simulação.....	73
Figura 53 – Implementação do filtro rastreador de rampa usado na simulação.....	73
Figura 54 - Sinal de estabilização e degrau injetados na malha de controle do RT por meio do método de realimentação.	74
Figura 55 - Sinal estabilizante do ESP externo.	74
Figura 56 – Tensão da fase A da tensão sintetizada V_{pll}	75
Figura 57 – Potência Ativa entregue pela MS com PSS externo e sem PSS.	75
Figura 58 - Sinal do ESP e degrau injetados na malha de controle do RT por meio de um ponto de soma interno e através da referência, respectivamente.	76
Figura 59 - Sinal estabilizante do ESP local.....	76
Figura 60 – Potência Ativa entregue pela MS com PSS local.....	77
Figura 61 – Estrutura de inserção de harmônicas.....	79
Figura 62 – Tensão da fase A da tensão terminal do gerador com harmônicas.	80
Figura 63 – Fase instantânea terminal rastreada pela PLL.....	80
Figura 64 – Frequência instantânea terminal rastreada pela PLL.....	81
Figura 65 – Tensão de V_{pll} e de V sincronizadas entre si sob distorção harmônica.	81
Figura 66 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na realimentação sob efeitos de distorção harmônica.	82
Figura 67 – Frequência instantânea terminal rastreada pela PLL sob harmônicas mais severas.....	83
Figura 68 – Fase instantânea terminal rastreada pela PLL sob harmônicas mais severas.....	83
Figura 69 – Tensão da fase A de V_{pll} e de V sincronizadas entre si sob severa distorção harmônica.	84
Figura 70 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na realimentação sob efeitos de severa distorção harmônica.....	85

Figura 71 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na forma tradicional sob efeitos de severa distorção harmônica.....	85
Figura 72 – Resposta de fase realizada em uma das UGs.	88
Figura 73 – Tensão terminal (pu), ensaio de carga baixa.	89
Figura 74 – Tensão de excitação (pu), ensaio de carga baixa.	89
Figura 75 – Corrente de excitação (pu), ensaio de carga baixa.	90
Figura 76 – Potência ativa (pu), ensaio de carga baixa.	90
Figura 77 – Potência reativa (pu), ensaio de carga baixa.	90
Figura 78 – Tensão terminal (pu), ensaio de carga média.	91
Figura 79 – Tensão de excitação (pu), ensaio de carga média.....	91
Figura 80 – Corrente de excitação (pu), ensaio de carga média.....	91
Figura 81 – Potência ativa (pu), ensaio de carga média.	92
Figura 82 – Potência reativa (pu), ensaio de carga média.	92
Figura 83 – Tensão terminal (pu), ensaio de carga alta.	92
Figura 84 – Tensão de excitação (pu), ensaio de carga alta.....	93
Figura 85 – Corrente de excitação (pu), ensaio de carga alta.....	93
Figura 86 – Potência ativa (pu), ensaio de carga alta.	93
Figura 87 – Potência reativa (pu), ensaio de carga alta.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limitadores do regulador de tensão e relé 40.	23
Tabela 2 – Parâmetros da MS utilizado.	66
Tabela 3 – Parâmetros do RT utilizado.	67
Tabela 4 – Características dinâmicas do sinal de potência estabilizada.	77
Tabela 5 – Composição harmônica na tensão terminal do gerador.	78
Tabela 6 – Composição harmônica na tensão terminal do gerador para um caso mais extremo.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

RT	Regulador de tensão
MS	Máquina síncrona
UG	Unidade geradora
PLL	<i>Phase locked loop</i>
ESP	Estabilizador do sistema de potência
GEP	<i>Generator, excitation system, power system</i>
SEP	Sistema elétrico de potência
SE	Sistema de excitação
t_ϵ	Tempo de acomodação
ϵ_p	Sobressinal
t_r	Tempo de subida
ϵ	Erro em regime permanente
TP	Transformador de potencial
CLP	Controlador lógico programável
PSD	<i>Positive sequence detection</i>
pu	Por unidade
THD	<i>Total harmonic distortion</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
HVDC	<i>High voltage direct current</i>
FACTS	<i>Flexible alternate current transmission system</i>
SCL	<i>Statoric current limiter</i>
LCE	Limitador de corrente estatórica
OEL TH	<i>Thermic overexcitation limiter</i>
LCC TH	Limitador térmico de sobreexcitação
OEL PK	<i>Peak overexcitation limiter</i>
LCC PK	Limitador de pico de sobreexcitação
MEL	<i>Minimum excitation limiter</i>
LMCC	Limitador de mínima corrente de campo
UEL	<i>Underexcitation limiter</i>

LSE	Limitador de subexcitação
SM	<i>Synchronous machine</i>
PSS	<i>Power system stabilizer</i>
AVR	<i>Automatic voltage regulator</i>
V_g	Tensão terminal do gerador
R_c	Resistência de compensação
X_c	Reatância de compensação
I_g	Corrente terminal do gerador
Q_g	Potência reativa entregue pelo gerador
X_s	Reatância síncrona
δ	Ângulo de fase
SG	<i>Synchronous generator</i>
SR	<i>Slip rings</i>
ME	<i>Main exciter</i>
AE	<i>Auxiliary exciter</i>
RR	<i>Rotating rectifier</i>
ET	<i>Excitation transformer</i>
AS	<i>Auxiliary servisse</i>
CT	<i>Current transformer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	17
2	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	20
2.1	REGULAÇÃO DE TENSÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA	21
2.1.1	Excitatriz	25
2.1.2	Comissionamento do Regulador de Tensão.....	27
2.1.3	Topologias do regulador de tensão.....	37
2.2	ESTABILIZADOR DO SISTEMA DE POTÊNCIA.....	41
3	MÉTODO PROPOSTO	52
3.1	ESTRUTURA DO MÉTODO	52
3.2	GERAÇÃO DO SINAL	55
3.3	SOMA DOS SINAIS	60
4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO.....	66
4.1	ENSAIO DE RESPOSTA AO DEGRAU	67
4.2	INJEÇÃO DE UM SINAL ESTABILIZANTE	72
4.3	SIMULAÇÃO COM HARMÔNICOS.....	77
5	TESTES DE CAMPO	87
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	95
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	96
	REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

Iniciando sua história no final do século XIX, as Máquinas Síncronas (MS) têm ocupado um lugar de destaque no sistema elétrico de potência ao redor do mundo (HOOSHYAR, SAVAGHEBI e VAHEDI, 2007). Tal dispositivo é de fundamental importância na vida moderna, figurando peça-chave de usinas à base de carvão, gás, biomassa, energia nuclear e hidráulica (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008). Dado que essas fontes compõem a maior parte da geração de energia elétrica no cenário global (BURKE, 2010), o gerador síncrono está, portanto, entre as principais formas de se gerar energia elétrica atualmente. Além do mais, tais máquinas são utilizadas como motores síncronos em indústrias petroquímicas, siderúrgicas e no bombeamento, além de atuarem como compensadores síncronos, muito em voga atualmente devido ao ingresso crescente de fontes de energia renováveis na rede (IGBINOVIA, FANDI, *et al.*, 2018).

Contudo, para um funcionamento eficiente e seguro da MS e do sistema elétrico como um todo, aquela deve ser regulada para atender tanto às demandas do sistema elétrico, assim como às próprias restrições operativas.

Assim, surge a figura do Regulador de Tensão (RT), que tem como função primordial a regulação da tensão terminal da MS. Também é função do RT garantir que a MS atue dentro dos seus limites operativos, através da ação de limitadores. Além disso, o RT também é capaz de prover torque amortecedor mediante a ação do Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2014).

O ESP é um elemento de controle que pode ser intrínseco ao RT, ou um dispositivo externo. No caso do ESP externo, o sinal estabilizante deve ser somado, preferencialmente, ao sinal de erro da malha de controle do RT. Para isso, o RT deve disponibilizar uma entrada analógica dedicada, que se conecta a um ponto de soma, permitindo realizar a adição desejada. Quando essa entrada não se encontra disponível, uma alternativa é somar o sinal estabilizante junto ao sinal de controle na saída do RT. Entretanto, essa estratégia exige uma atenção especial na compensação do sinal do ESP, de forma a torná-lo compatível ao sinal de controle do regulador. Além disso, em hardwares mais modernos do RT, o acesso ao sinal de controle pode ser inviável.

Um dos motivos de se utilizar um ESP externo é que, por vezes, o ESP nativo do RT pode não responder de forma satisfatória, sendo incapaz de atingir a performance esperada, seja por problemas de hardware (medição), ou devido a limitações da topologia do próprio estabilizador.

Desta maneira, a existência de um método capaz de viabilizar, de forma relativamente simples, a injeção de sinais externamente ao aparato local de regulação de tensão é, certamente, uma ferramenta de grande utilidade em ensaios de comissionamento, modelagem e no diagnóstico de desempenho do conjunto RT – MS de unidades geradoras. O destaque a um método desta natureza se dá, sobretudo, quando este é capaz de propiciar a injeção de sinais comuns e imprescindíveis à grande parte dos testes feitos junto às máquinas síncronas (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2014). Portanto, quando sinais como o degrau na referência de tensão (muito úteis em ensaios de comissionamento de limitadores de excitação), sinais senoidais (os quais possibilitam a realização da resposta em frequência do sistema *GEP*) e sinais estabilizantes, oriundos de ESPs, podem ser satisfatoriamente gerados e injetados externamente ao sistema pré-estabelecido de regulação de tensão de uma UG, há a consolidação de uma ferramenta de valor e serventia ao profissional responsável pelos testes, o qual passa a ter uma maior flexibilidade e autonomia em seus ensaios.

1.1 OBJETIVOS

Foram identificados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho, apresentados nas subseções seguintes.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo de um novo método de injeção de sinais em reguladores de tensão, método este concebido pelo engenheiro Rafael Bertolini de Paiva, M.Sc, à época da empresa Reivax. Esta nova técnica se destaca dos procedimentos clássicos devido a, entre outras coisas, fazer o uso de malhas de captura de fase, assim como de transformadores de potencial em um arranjo inédito que viabiliza a inserção de sinais por meio da realimentação da MS.

Desta forma, o aluno, neste documento, retrata as peculiaridades, a relevância e o funcionamento da injeção de sinais modulantes feitos por meio deste novo procedimento.

Aliás, nota-se que o método está inserido no contexto de regulação de tensão de usinas de geração de energia elétrica baseadas no uso da MS. Portanto, tem-se também como objetivo neste trabalho realizar uma breve revisão dos sistemas de regulação, destacando suas principais topologias e atribuições. Aliado a isso, o autor discute o Estabilizador de Sistema de Potência. Desta forma, dada a relevância deste dispositivo para o controle do sistema de excitação e para o sistema elétrico como um todo (MURDOCH, VENKATARAMAN, *et al.*, 1999), o seu bom entendimento é fundamental, uma vez que uma das principais aplicações que se vislumbra para o método apresentado é a injeção de um sinal estabilizante, oriundo de um ESP externo.

1.1.2 Objetivos Específicos

O trabalho tem como finalidade trazer um estudo deste novo método de injeção de sinais no regulador de tensão, de forma a apresentar a sua relevância, os seus princípios de seu funcionamento e a validade que este detém no uso em casos práticos de ensaios em usinas geradoras de energia elétrica.

Nota-se que este documento trata de uma metodologia inédita. Desta forma, o autor visa, primeiramente, contextualizar o método no rol daqueles pré-existentes. Portanto, descreve-se sucintamente o sistema de regulação de tensão de MS em UGs, dando enfoque ao funcionamento do RT e às formas convencionais de injeção de sinais. Aliado a este ponto, levantam-se, brevemente, os principais testes de comissionamento, de modelagem e de análise de desempenho dinâmico do RT, os quais são comumente realizados em usinas baseadas em MS. Faz-se isso, uma vez que se vislumbra que uma das principais utilizações e, conseqüentemente, uma das vantagens do método surge no auxílio a estes testes. Em seguida, dada a sua relevância ao SEP e às UGs, o autor levanta as funções e as estruturas atuais do ESP.

Chega-se, então, ao estudo do método em si. Nesta parte, descreve-se o funcionamento da estrutura como um todo, dando destaque a alguns elementos relevantes, como a malha de captura de fase (PLL). Neste mesmo contexto, faz-se

uma descrição matemática do procedimento de forma a retratar sua validade. Uma vez que o método tenha sido devidamente explicado, o trabalho passa então a se concentrar em simulações computacionais, com o intuito de aclarar alguns pontos-chave do método e de testar seu funcionamento sob diferentes cenários, os quais são caracterizados, sobretudo, pela influência de composições harmônicas na rede e de oscilações sustentadas.

Apresenta-se, por fim, neste trabalho, exemplos desta nova técnica realizados na prática. Em outras palavras, são mostrados casos realizados no início de 2021, em duas centrais hidrelétricas no Peru, as quais juntas somam mais de 200 MW de capacidade instalada. Explicam-se, portanto, os resultados obtidos ao empregar o método nas três seguintes finalidades:

- a) Realização da resposta em frequência do sistema Gerador-Excitação-Sistema de Potência (GEP), de forma a ajustar o ESP externo;
- b) Injeção do seu sinal estabilizante por meio de um ESP extrínseco à estrutura local;
- c) Inserção de sinais do tipo degrau com o intuito de avaliar o desempenho de limitadores nativos ao RT das UGs.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia elétrica é hoje um ativo indispensável na vida da maior parte dos brasileiros. Isto é, indubitavelmente, esta, no decorrer do último século, tornou a figurar como um dos elementos fundamentais para o bom funcionamento da sociedade moderna. Desta forma, nota-se a presença desta nas atividades mais indispensáveis dos cidadãos, como na alimentação, higiene e, cada vez mais, no transporte, por exemplo. Ademais, a energia elétrica, além de propiciar o bem-estar de forma direta aos indivíduos, também é, evidentemente, um dos alicerces do desenvolvimento econômico de nações, ao “alimentar”, de forma idealmente ininterrupta e com qualidade, as indústrias e serviços. Desta maneira, a importância ímpar deste produto se evidencia, manifestando-se como ponto-chave na qualidade de vida dos cidadãos, assim como na emancipação e soberania da malha fabril de um país.

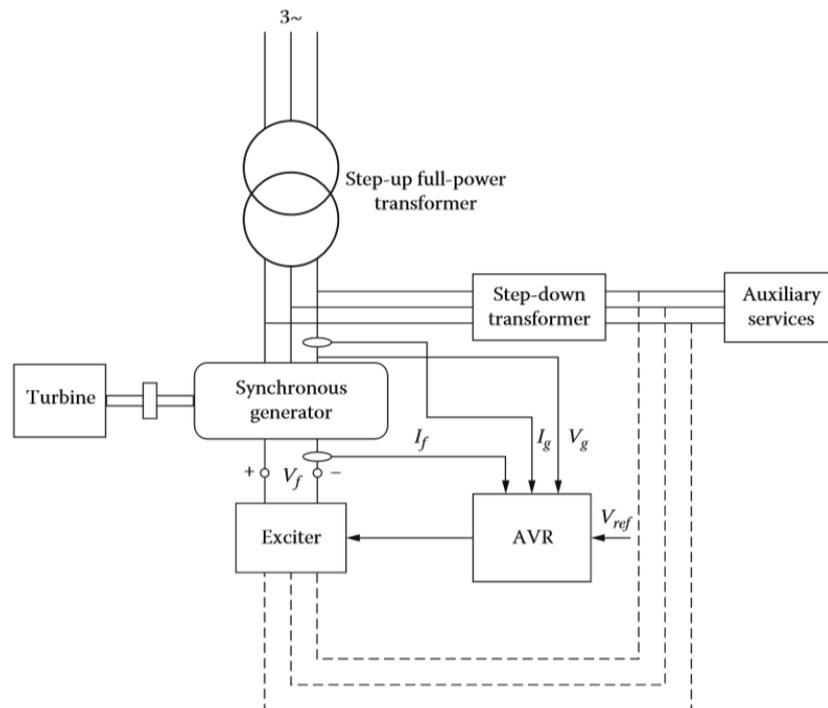
Ao colocar tais pontos em foco, nota-se a relevância da manutenção da qualidade da geração de energia elétrica. Desta maneira, ao perceber que a composição da matriz energética de geração de energia elétrica é majoritariamente composta por usinas hidrelétricas e térmicas, tanto no cenário global (BURKE, 2010) quanto no nacional (TOLMASQUIM, 2012), nota-se o destaque do gerador síncrono, uma vez que estas classes de usinas utilizam, em sua grande maioria, este tipo de máquina na geração de energia elétrica (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

Portanto, dada a relevância do gerador síncrono para o SEP, percebe-se que a qualidade e a estabilidade da energia transmitida e distribuída através da rede de transmissão e distribuição de potência se confundem com a própria qualidade e estabilidade nos terminais de cada gerador síncrono das UGs que alimentam a rede. Desta forma, sabendo que a magnitude da tensão deve se manter, idealmente, constante durante a operação do SEP (BOLDEA, 2016), nota-se que assim deve ser também a tensão terminal do gerador síncrono interconectado à rede. Neste contexto, com o intuito de preservar a operação satisfatória e estável desta grandeza terminal, surge a figura do regulador automático de tensão.

2.1 REGULAÇÃO DE TENSÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA

A Figura 1 mostra um esquema simplificado de geração de energia elétrica com um enfoque na regulação de tensão de uma unidade geradora de energia elétrica baseada no uso da máquina síncrona. A máquina síncrona converte a energia mecânica entregue à turbina em energia elétrica, a qual passa por um aumento de tensão e é, então, fornecida ao sistema de potência, por meio de um circuito trifásico. Nesta imagem, é apresentado também o chamado sistema de excitação.

Figura 1 – Estrutura de geração de energia elétrica de uma máquina síncrona.

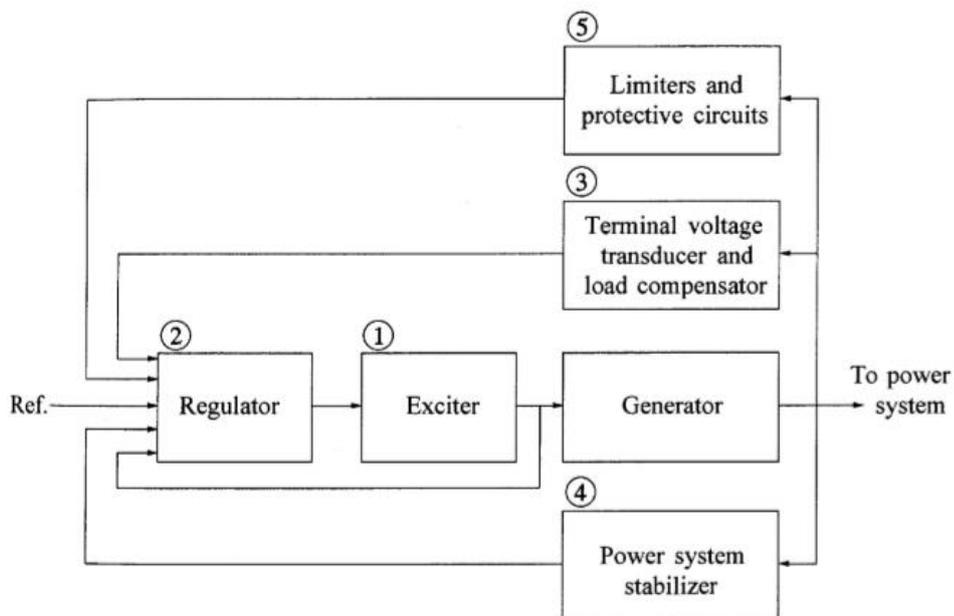


Fonte: (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

O sistema de excitação (SE) de uma máquina síncrona é composto, basicamente, pela excitatriz e pelo regulador automático de tensão (RT), como mostrado na Figura 2. Desta forma, estes têm como função primordial, respectivamente, fornecer e controlar a corrente contínua que chega aos terminais do enrolamento de campo do gerador (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008). Desta forma, o SE deve ser capaz de manter a tensão terminal do gerador no valor especificado pelo operador ou garantir que haja uma determinada relação entre

tensão e carga reativa em toda região de operação da máquina (ELETROBRÁS, 1984). Ademais, o conjunto é encarregado de auxiliar na proteção da máquina síncrona e do sistema elétrico como um todo (TARANTO, 2009), ao limitar a corrente fornecida pela excitatriz e, conseqüentemente, a tensão e a potência reativa fornecidas nos terminais do gerador. Portanto, o SE deve ser apto a manter a tensão terminal dentro dos limites aceitáveis de operação mesmo em rejeições de plena carga ou outros distúrbios severos no sistema de potência (ELETROBRÁS, 1984). Desta maneira, o sistema de excitação, sobretudo o RT, se encarrega de manter a operação da máquina síncrona restrita à região demarcada pela Curva de Capabilidade.

Figura 2 – Estrutura de regulação de tensão de uma máquina síncrona.



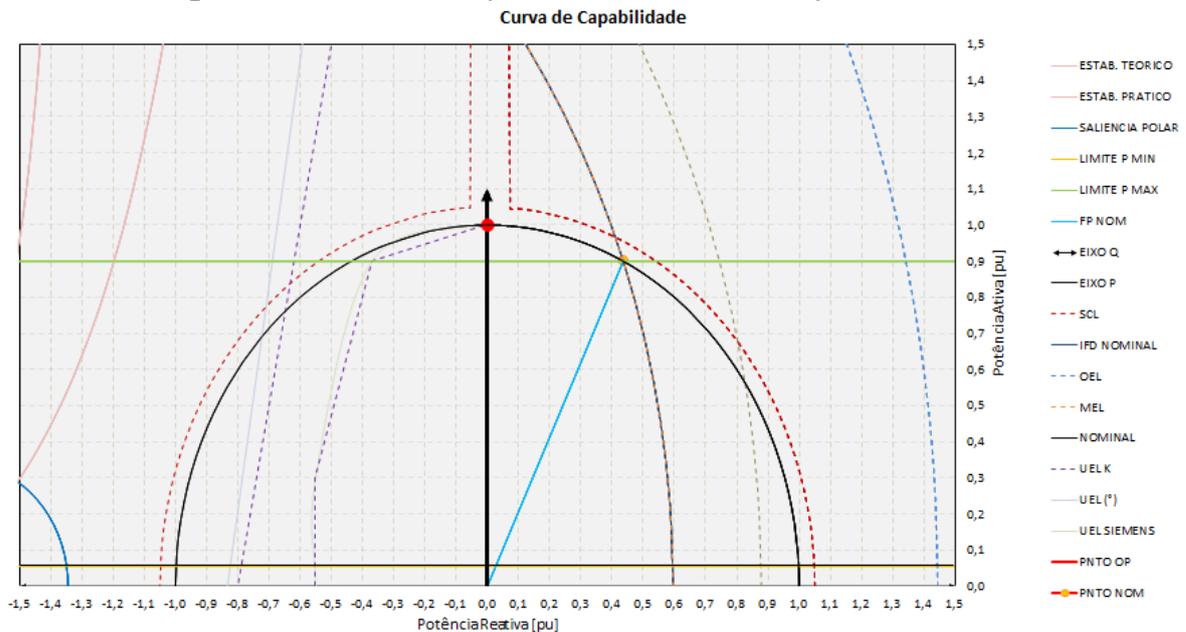
Fonte: (KUNDUR, 1994).

A Curva de Capabilidade de Potência Reativa, ou, simplesmente, Curva de Capabilidade, é uma ferramenta que indica em quais condições de carregamento de potências ativa e reativa a máquina é capaz de operar de forma segura e eficiente. Assim, definindo os limites de operação de forma que o gerador não exceda suas limitações térmicas em decorrência de efeitos da corrente de campo (HUNT, 1967), ajudando, assim, a proteger o RT, a excitatriz e o gerador. Entre estas limitações, tem-se que: tanto a corrente de armadura quanto a de campo não podem causar sobreaquecimento em seus respectivos enrolamentos, portanto estas devem ser

limitadas a um certo valor, além disso, o ângulo de potência não deve ultrapassar um certo limiar máximo, de forma a manter o gerador em uma região de estabilidade (BOLDEA, 2016). Ambas as limitações estão relacionadas ao valor da corrente de campo e, conseqüentemente, ao valor da tensão terminal do gerador. Na Curva de Capabilidade, há também representados limites relacionados à troca de potência reativa e ativa entre o gerador e a carga.

A Figura 3 traz um exemplo de uma Curva de Capabilidade típica. Nesta, percebem-se traços definidos por alguns dos limitadores, que podem ser nativos à estrutura do RT ou externos, como apresentado na Figura 2, atuando de forma a limitar a atuação do gerador em cenários de subexcitação e de sobreexcitação, garantindo assim a sua efetiva e segura operação. Alguns dos principais limitadores estão descritos na Tabela 1.

Figura 3 – Curva de capacidade de uma máquina síncrona.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 1 – Limitadores do regulador de tensão e relé 40.

Limitador	Símbolo	Descrição
-----------	---------	-----------

Limitador Térmico de Corrente Estatórica	SCL/LCE	Define o lugar geométrico que representa a máxima corrente estatórica permitida pelo limitador térmico. É calculada com base no valor da referência ajustado (SCL TH). O traçado considera a limitação para fator de potência por potência reativa.
Limitador Térmico de Sobreexcitação	OEL/LCC TH	Define o lugar geométrico que representa a máxima corrente de campo permitida pelo limitador térmico. É calculado com base na corrente de campo nominal e no valor ajustado de referência térmica do limitador de sobreexcitação (OEL TH).
Limitador de Pico de Sobreexcitação	OEL/LCC PK	Define o lugar geométrico que representa a máxima corrente de campo permitida pelo limitador de pico. É calculado com base na corrente de campo nominal e no valor ajustado de referência de pico do limitador de sobreexcitação (OEL PK).
Limitador de Mínima Corrente de Campo	MEL/LMCC	Define o lugar geométrico que representa a mínima corrente de campo permitida pelo limitador. É calculado com base na corrente de campo nominal e no valor ajustado de referência do limitador de mínima corrente de campo (MEL).
Limitador de Subexcitação	UEL/LSE – Tipo 1	Representa o limite de potência reativa que a máquina pode absorver.
Relé 40	MHO – Z1	Representa as zonas de atuação da proteção no plano P-Q.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A unidade geradora é suscetível a oscilações eletromecânicas de baixa frequência que surgem a partir da interação com o sistema elétrico de potência, devido a, sobretudo, transitórios em decorrência de variações de carga, faltas ou manobras em equipamentos elétricos na rede. Desta forma, estas oscilações podem vir a degradar a qualidade da energia elétrica, assim como o próprio funcionamento eficiente do sistema. Problemas que surgem em decorrência dessas oscilações são: variações nos fluxos de potência nas linhas de transmissão; redução das margens de estabilidade do sistema; limitação da capacidade de transmissão de potência elétrica; desgastes mecânicos dos geradores; interrupção de transmissão de energia e, até mesmo, perda de sincronismo das máquinas síncronas (NETO, 2013). Desta forma, o sistema de excitação deve ser capaz de contribuir de forma efetiva para o amortecimento dessas oscilações (ELETROBRÁS, 1984). Surge então a demanda pelo estabilizador do sistema de potência o qual tem se configurado, cada vez mais, como uma ferramenta imprescindível ao aparato do SE, ao garantir maior qualidade da energia que permeia o SEP por meio do aumento das suas margens de estabilidade (ABDALLA, 2015). O ESP é uma peça importante da estrutura do sistema

de excitação, podendo ser intrínseco à malha do RT ou não, como é o caso do sistema da Figura 2.

Portanto, nota-se a relevância da regulação de tensão do gerador síncrono, assim como a importância de cada dispositivo individual que compõe o regulador de tensão, para a manutenção da qualidade da energia elétrica que permeia o SEP. Desta forma, com o intuito de alcançar este objetivo, é evidente a pertinência de terem-se o RT, seus limitadores e o ESP bem ajustados, comissionados e ensaiados.

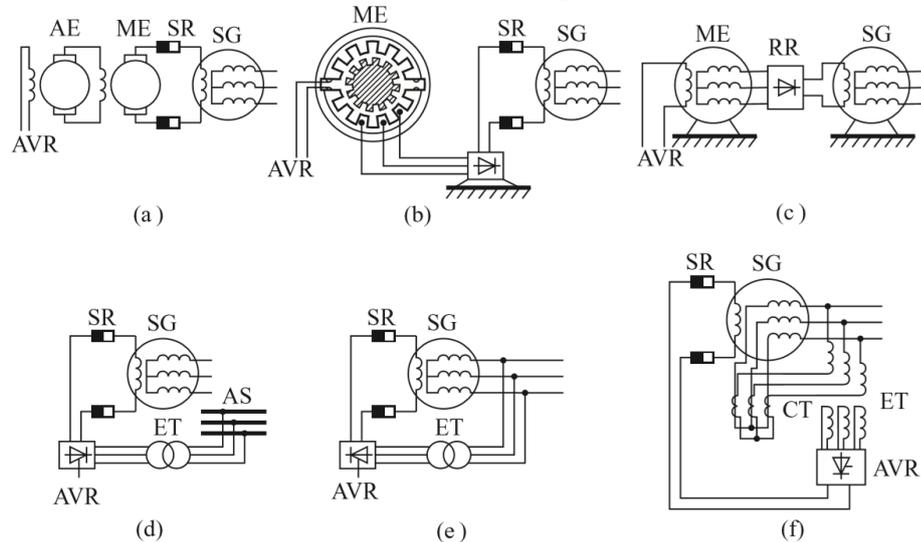
2.1.1 Excitatriz

Como discutido anteriormente, o sistema de excitação é composto, basicamente, pela excitatriz e pelo regulador automático de tensão. A função da excitatriz é suprir corrente contínua aos terminais de enrolamento de campo da máquina síncrona. Através do controle da tensão interna do gerador, a excitatriz também controla o fator de potência e a magnitude da corrente terminal da máquina (COSTA e SILVA, 2000).

Desta forma, existem diversas topologias que são empregadas na execução desta tarefa. Na Figura 4 são mostradas algumas dessas estruturas. Nesta figura, veem-se duas distintas classes de excitatrizes, aquelas do tipo rotativa (Figura 4a-c), as quais geram corrente de campo por meio de corrente contínua ou através de corrente alternada associada a um retificador, e as excitatrizes estáticas (Figura 4d-f).

As excitatrizes estáticas não fazem o uso de geradores de corrente contínua, mas, utilizam uma ponte de tiristores, que possuem seus ângulos de disparo controlados pelo regulador de tensão. Tal ponte é conectada à máquina por meio de escovas e anéis. Dentre as maiores vantagens que esta arquitetura oferece, está a rapidez de resposta frente às demandas de regulação de tensão, ajudando, assim, a diminuir as dinâmicas indesejadas nos terminais da armadura em possíveis rejeições de carga. Na Figura 5 é mostrada uma excitatriz do tipo estática encontrada nos laboratórios da empresa Reivax. As excitatrizes estáticas têm se tornado as estruturas mais comuns nos sistemas de excitação, sobretudo devido ao barateamento do preço de retificadores de alta potência e aumento da sua confiabilidade (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

Figura 4 – Algumas topologias de excitatrizes: (a) Geradores CC em cascata; (b) Máquina de relutância em cascata; (c) Gerador síncrono com retificador rotativo; (d) Retificador controlado alimentado pelo sistema auxiliar; (e) Retificador controlado alimentado pelos terminais do gerador; (f) Retificador controlado alimentado pelas corrente e tensão do gerador.



Fonte: (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

A alimentação dessas estruturas pode ser feita por meio de um sistema auxiliar de potência associado a um transformador, como é apresentado na Figura 4d. Ademais, uma outra alternativa é alimentá-lo diretamente a partir da tensão terminal do gerador, vide Figura 4e. Além disso, há a possibilidade de fazer a modificação da fonte para o retificador, como graficado na Figura 4f, desta forma, a fonte de tensão da excitação é reforçada por uma componente derivada da corrente de carga (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

As excitatrizes do tipo rotativas são compostas por dínamos e, em geral, são montadas sobre o eixo rotativo da máquina síncrona. Assim como no caso de excitatrizes estáticas, a entrega da corrente contínua aos terminais do enrolamento de campo é, em geral, feita por meio de escovas e anéis (ALMEIDA, 2000), embora existam algumas estruturas em que estas não são necessárias. Uma das desvantagens deste tipo de topologia é o tempo de resposta elevado diante as demandas da regulação de tensão (ALMEIDA, 2000), isto é, possuem elevadas constantes de tempo. Ademais, devido a problemas de comutação, este tipo de excitatriz não é utilizada em geradores de alta potência, os quais demandam corrente de excitação de magnitude elevada (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

Esta classe de excitatrizes possui diversas subestruturas. Desta forma, há topologias que funcionam a partir do cascadeamento de geradores de corrente contínua, Figura 4a. Caracterizam-se também como excitatrizes rotativas, aquelas da Figura 4b, nestas usa-se uma máquina de relutância atuando em frequências elevadas, em mais de 400 Hz (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008). Há também estruturas que não necessitam de escovas e anéis coletores, como a apresentada na Figura 4c. Aqui, vê-se como fonte do sistema de excitação, uma máquina síncrona com o enrolamento de campo no estator e a armadura no rotor. A corrente induzida é retificada por diodos os quais são montados no rotor e alimentam, diretamente, o enrolamento de campo do gerador (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

Figura 5 – Estrutura de excitatriz estática encontrada nos laboratórios da empresa Reivax S.A..



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além destas topologias de excitatrizes levantadas, há muitas outras, as quais podem ser encontradas no guia (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2016).

2.1.2 Comissionamento do Regulador de Tensão

Como previamente discutido, o regulador de tensão controla a magnitude da corrente entregue pela excitatriz ao enrolamento de campo do gerador síncrono, regulando a tensão terminal do gerador e, conseqüentemente, sua produção de potência reativa, dada a relação entre essas duas grandezas, dada por (HOMAE e JADID, 2014)

$$Q_g = \frac{V_g}{X_s} [E \cos(\delta) - V_g]. \quad (1)$$

O RT recebe como entrada a leitura da tensão terminal da máquina síncrona, V_g , a qual pode (ou não) receber compensação de carga (por meio da leitura da corrente terminal) fazendo assim com que V_g se torne V_c (KUNDUR, 1994), onde

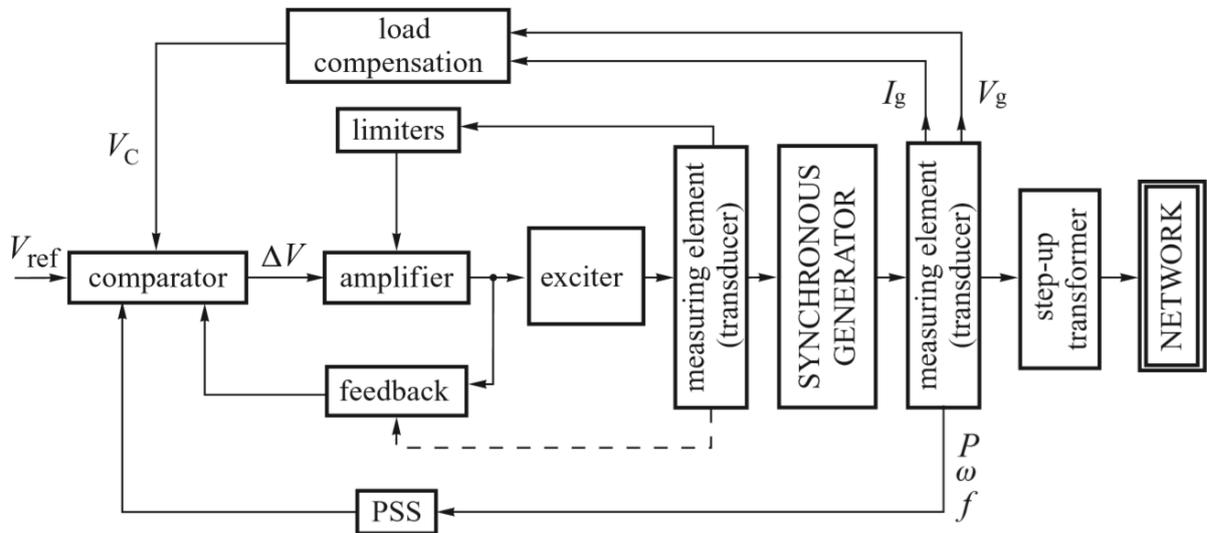
$$V_c = |V_g + (R_c + jX_c)I_g|, \quad (2)$$

com o intuito de tornar a medida de tensão que chega ao RT representativa daquela que se quer realmente controlar, por meio da impedância de compensação, $R_c + jX_c$ - nota-se, aliás, que se não houver compensação de carga V_c é igual a V_g .

O RT cumpre também a tarefa de aumentar os limites de estabilidade do gerador e limitar sua operação dentro de seus limites de capacidade. Por isso, muitas vezes este recebe um sinal estabilizante, V_s , gerado pelo ESP, dispositivo encarregado por amortecer as oscilações eletromecânicas do gerador, assim como uma série de sinais limitadores, com o intuito de proteger a máquina. Ademais, a estrutura do RT comumente é alimentada pela medida de corrente e/ou tensão de campo, de forma a aumentar a estabilidade da malha.

Desta forma, é gerado então o valor ΔV na malha do RT, o qual é uma composição de V_c , V_s , sinais dos limitadores e da realimentação da corrente/tensão de campo, de maneira a alcançar V_{ref} . ΔV é então amplificado e compensado. A Figura 6 traz uma representação simplificada da estrutura do RT e dos principais sinais que o alimentam.

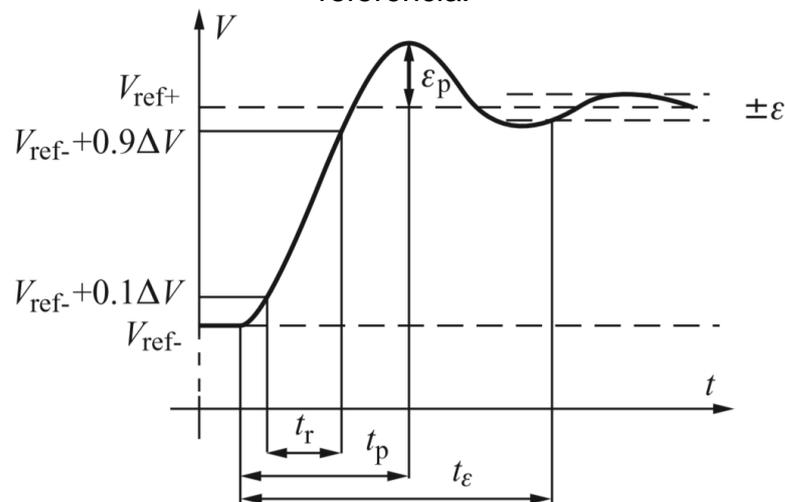
Figura 6 – Estrutura do RT e dos principais sinais que o alimentam.



Fonte: (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

Uma vez que o regulador de tensão nada mais é que uma malha de controle, seu desempenho pode ser avaliado tal qual uma estrutura de controle habitual. Desta forma, o RT deve ser ajustado de maneira a apresentar características transitórias e de regime permanente adequadas à sua função. Assim, métricas como tempo de acomodação t_ϵ , sobressinal ϵ_p e tempo de subida t_r são utilizadas para avaliar a performance do regulador. A Figura 7 mostra uma representação gráfica de tais métricas.

Figura 7 – Resposta dinâmica da tensão diante a um sinal degrau no valor de referência.



Fonte: (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

É sabido que para um mesmo ajuste de parâmetros do RT, diferentes topologias de sistemas de excitação e máquina síncrona proporcionam desempenhos diferentes. Contudo, é comum assumir que com um erro em regime permanente $\varepsilon \leq 0,5\%$, gerado por um degrau de 10% na referência de tensão, espera-se ter: tempo de acomodação $\leq 0,3$ s para uma excitatriz estática ou $\leq 1,0$ s para excitatrizes rotativas; sobressinal $\leq 10\%$ sob condição de máquina operando a vazio (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

Um bom ajuste do RT, de seus limitadores e do estabilizador é evidentemente crucial para um bom desempenho do sistema de excitação e, conseqüentemente, para a qualidade da energia gerada. Portanto, de forma a parametrizar estes dispositivos, são feitos os chamados ensaios de comissionamento.

Os ensaios de comissionamento são realizados dentro da usina junto a qual o SE irá operar. Estes ensaios consistem em estressar os equipamentos em operação sob a ação de procedimentos pré-estabelecidos, de forma a encontrar os ajustes que potencializam o desempenho do par controle-processo.

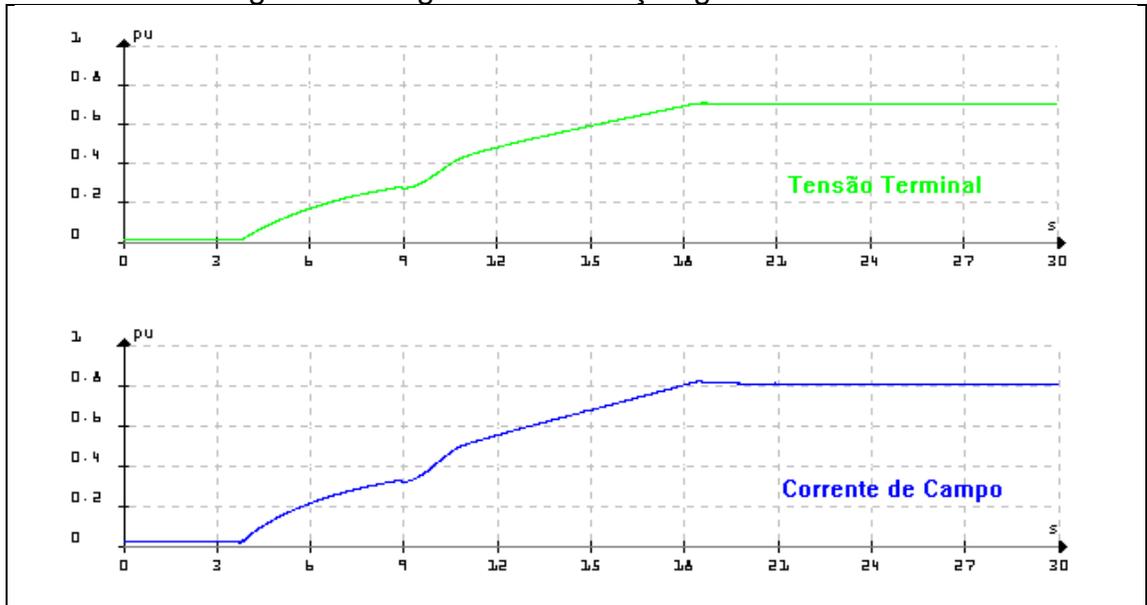
Os ensaios do regulador de tensão podem ser, de forma geral, divididos em duas categorias, ensaios a vazio e ensaios em carga. No primeiro, fazem-se testes com o intuito de garantir a excitação almejada da unidade geradora, de forma a deixar o par Turbina-Gerador apto para o sincronismo (JUNIOR, 2009). Os ensaios em carga, por sua vez, são feitos com a intenção de garantir bons desempenho e segurança da regulação de tensão da máquina síncrona em operação em carga.

Deseja-se que, ao operar em vazio, o regulador de tensão seja capaz de obedecer às seguintes condições: o sobressinal de tensão terminal não deve ultrapassar o limiar máximo do gerador; a resposta aos comandos deve ser rápida ou com reduzido sobressinal; o erro estático deve ser mínimo. Entre os principais ensaios a vazio do RT, tem-se:

- Excitação gradativa: muitos modelos de reguladores de tensão são capazes de permitir excitação gradual da unidade geradora. Isto é, aumenta-se progressivamente a referência de tensão, verificando, a cada passo, se as grandezas elétricas geradas são coerentes, ao mesmo tempo que se examina o comportamento da temperatura, nível de ruído e faiscamento na ponte de tiristores. A Figura 8 traz a plotagem de dados reais de um ensaio de excitação gradativa. Este ensaio pode ser realizado com o RT em regime de controle automático e manual, isto é, modos onde são controlados a tensão terminal ou a corrente de campo,

respectivamente. Esta imagem, contudo, mostra um ensaio feito em controle automático, com valor de final 0,7 pu de tensão terminal.

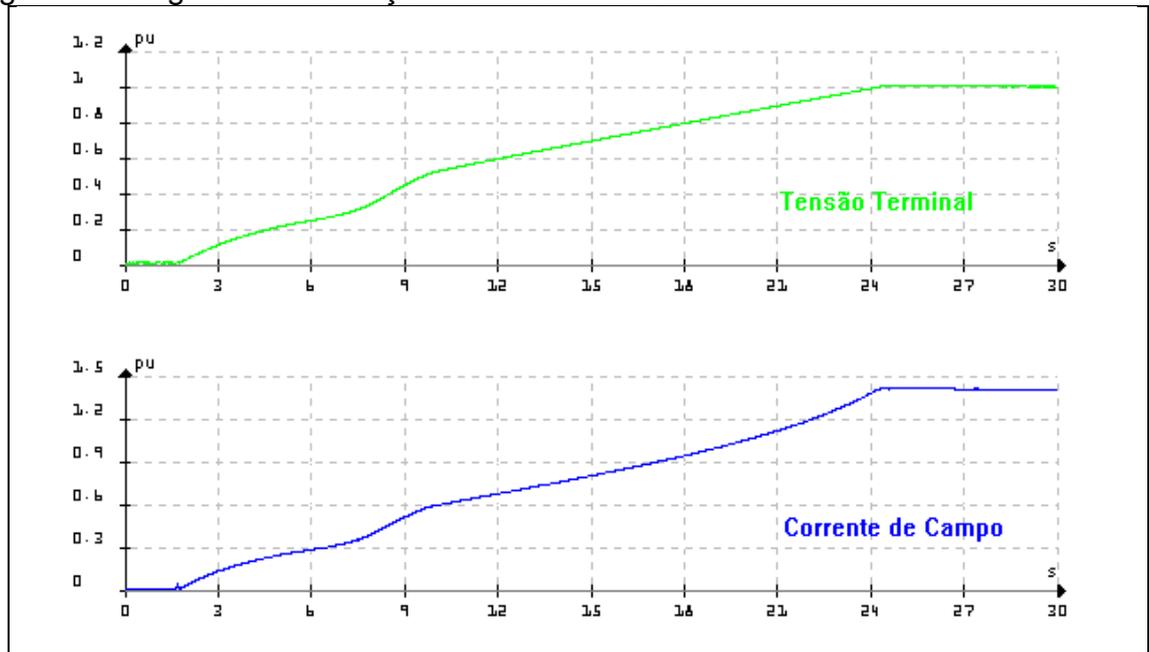
Figura 8 – Registro de excitação gradativa.



Fonte: (JUNIOR, 2009).

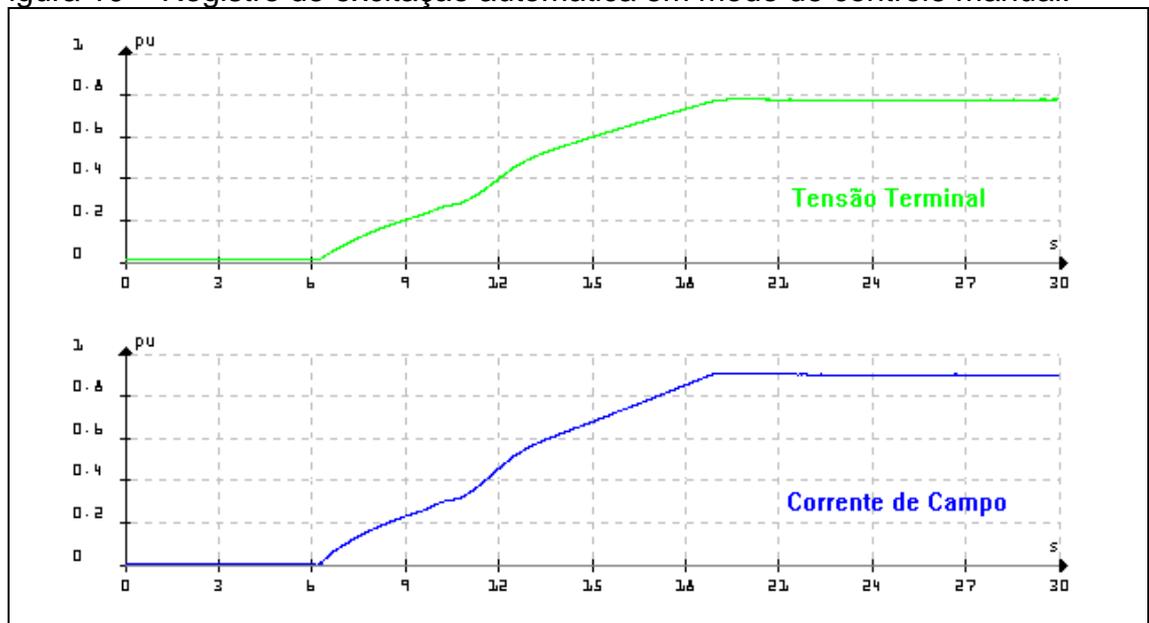
- Excitação automática: este ensaio consiste em excitar o gerador até que seu valor de tensão terminal chegue em 1 pu. Tem-se como objetivo, durante o processo, verificar se as grandezas elétricas da MS e SE estão coerentes e averiguar as grandezas térmicas. Este ensaio pode ser realizado em modo de controle automático e manual. As Figura 9 e Figura 10 trazem registros de ensaio de excitação automática em controle de tensão terminal e corrente de campo, respectivamente.

Figura 9 – Registro de excitação automática em modo de controle automático.



Fonte: (JUNIOR, 2009).

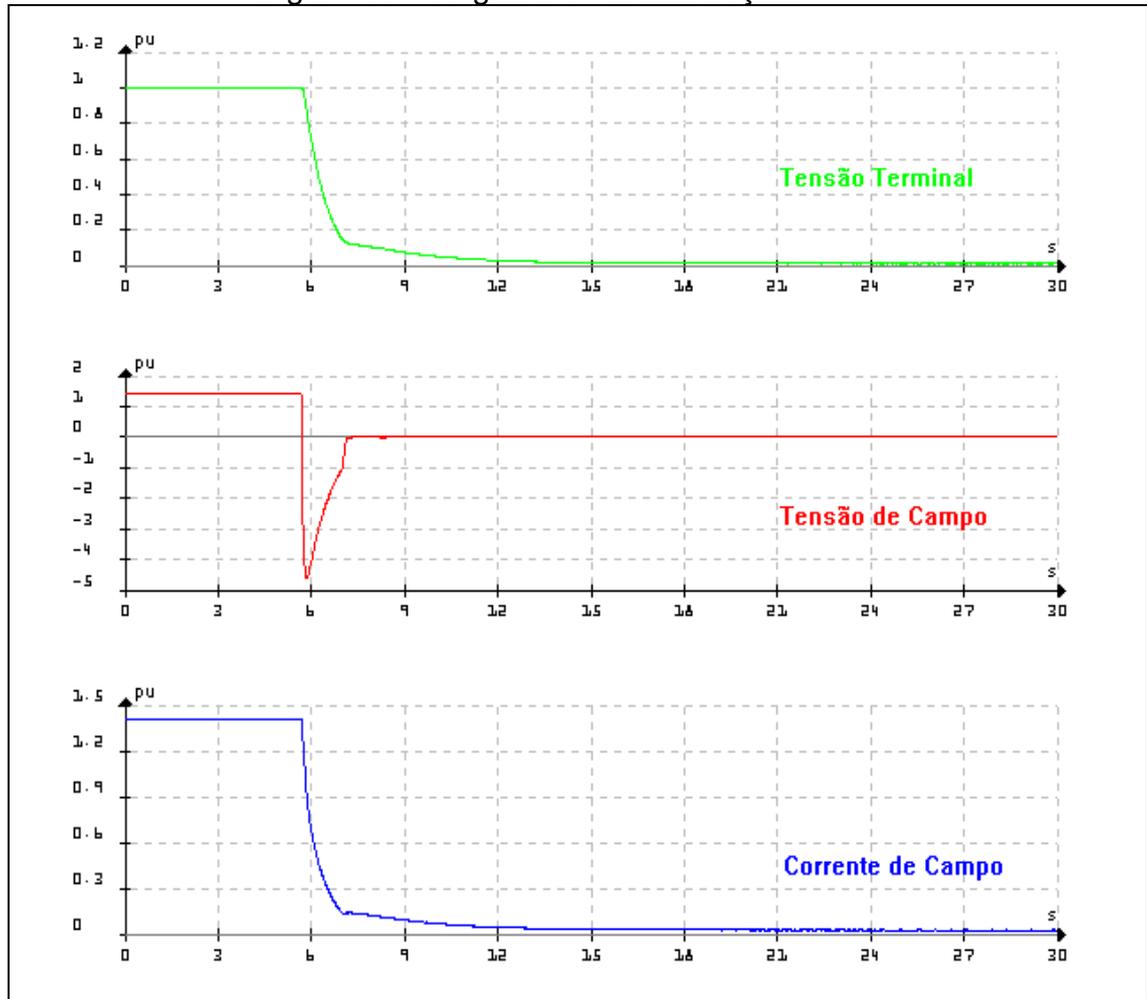
Figura 10 – Registro de excitação automática em modo de controle manual.



Fonte: (JUNIOR, 2009).

- Ensaio de desexcitação: com a máquina excitada, comanda-se a sua desexcitação e faz-se a abertura do contator de campo. Deste modo, verificam-se as dinâmicas e a coerência dos valores. A Figura 11 apresenta registros deste ensaio em uma UG.

Figura 11 – Registro de desexcitação.



Fonte: (JUNIOR, 2009).

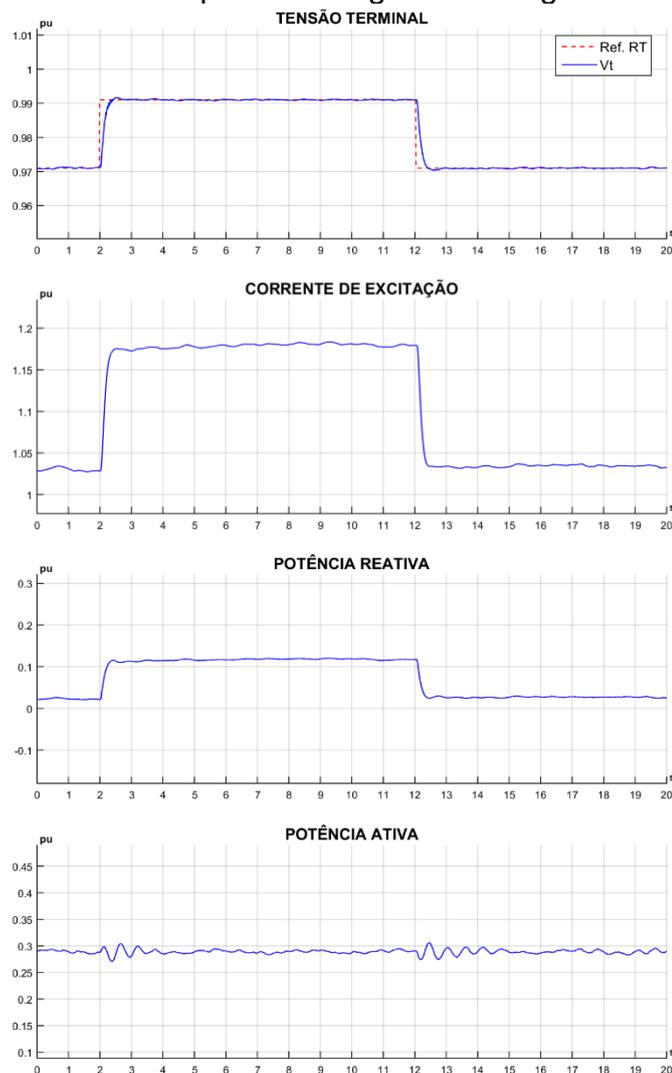
Os ensaios do regulador de tensão são muito importantes para assegurar, sobretudo, as boas dinâmicas de sincronismo do conjunto Turbina-Gerador, de forma a garantir um *feedback* adequado durante a excitação, a desexcitação e aos comandos do operador. Com estes testes, almeja-se ajustar os ganhos transitório e estático, de forma a potencializá-los, ao mesmo tempo em que se mantém baixo sobressinal das grandezas de controle (JUNIOR, 2009).

Aliados a estes, existe uma segunda classe de testes, que buscam, por sua vez, ajustar os parâmetros do RT para um bom desempenho em carga. Desta forma, deseja-se, a partir destes ensaios de comissionamento, alcançar alguns certos objetivos, como por exemplo: uma boa compensação de queda no transformador elevador; amortecimento satisfatório das oscilações eletromecânicas de baixa

frequência; realizar a operação de controle no limite de corrente e de subexcitação (JUNIOR, 2009). Alguns dos principais ensaios desta categoria são:

- a) Dinâmica de resposta ao degrau em carga: com este ensaio, tem-se como objetivo mensurar a dinâmica transitória e a estabilidade do SE no conjunto Gerador-SEP (U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1991). Nota-se que embora os ganhos estático e transitório tenham sido ajustados durante os ensaios em vazio, ao conectar a MS ao SEP, podem surgir oscilações indesejadas, que podem ser mitigadas através do ajuste desses parâmetros. Juntamente à resposta ao degrau, pode ser feita também a resposta em frequência do conjunto GEP para auxiliar no ajuste do regulador. Este teste pode ser feito em modo manual e automático, com ou sem ESP. A Figura 12 traz um registro de campo deste teste feito em regime automático.

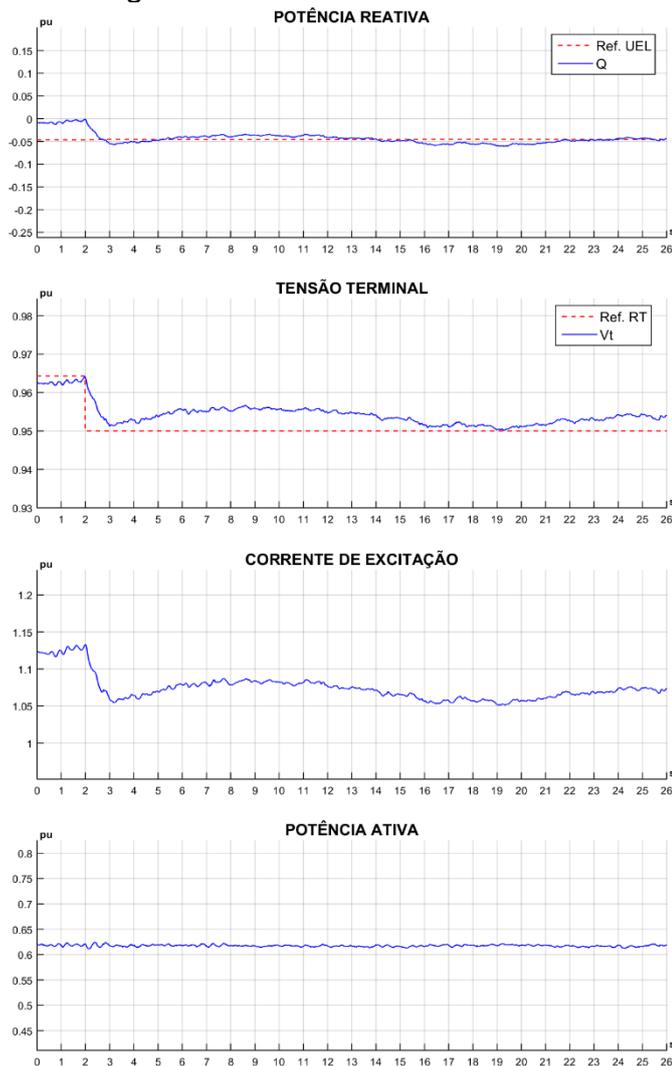
Figura 12 – Dinâmica de resposta ao degrau em carga em modo automático.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- b) Ensaio do limitador de subexcitação: o limitador de subexcitação (LSE ou UEL) tem como objetivo restringir a operação da máquina de modo a mantê-la em níveis de excitação adequados, com o intuito de garantir a estabilidade do gerador e evitar sobreaquecimento do estator (COELHO, SILVEIRA e BARACHO, 2018). Portanto, este ensaio tem como finalidade ajustar o limitador da melhor forma. A Figura 13 traz registros do ensaio do limitador de subexcitação feito na prática;

Figura 13 – Registro do ensaio de limitador de subexcitação.

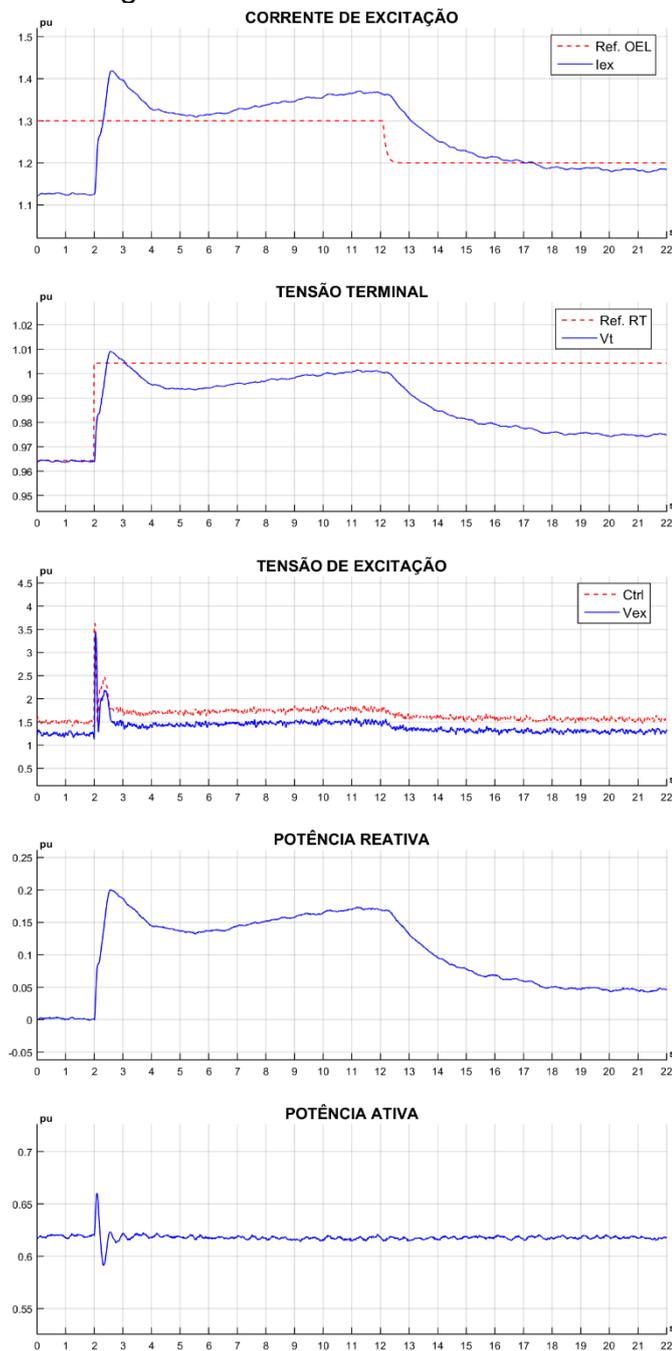


Fonte: Elaborada pelo autor.

- c) Ensaio do limitador de sobreexcitação: o limitador de sobreexcitação (LCC ou OEL) é encarregado de delimitar a operação da máquina de modo que a corrente de campo não cause sobreaquecimento no gerador. No LCC, há duas referências, a térmica e a de pico, que possuem diferentes valores os quais a corrente de campo deve obedecer. Desta forma, este ensaio

tem a função de permitir o ajuste deste limitador, com o intuito de, assim, proteger a máquina. A Figura 14 traz registros deste ensaio feito na prática;

Figura 14 – Registro do ensaio de limitador de sobrecitação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

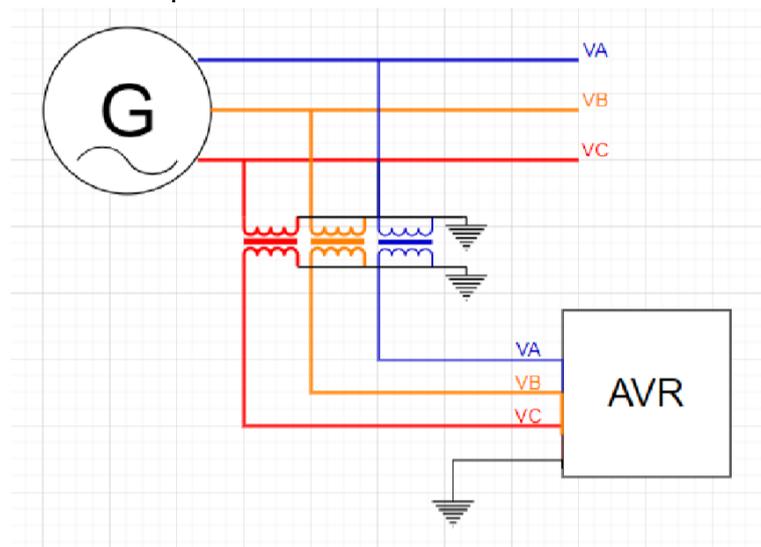
Além destes apresentados, inúmeros outros ensaios são empregados durante o comissionamento de uma unidade geradora, como destaque tem-se aqueles associados à estabilidade do gerador e, portanto, pertinentes ao ESP (alguns destes

testes serão explanados no decorrer do trabalho). Contudo, pode-se notar, a partir dos ensaios até aqui levantados, a importância da realização destes, uma vez que são essenciais para garantir a segurança da operação da planta, assim como trazem mais garantia da boa performance e qualidade da energia gerada. Desta forma, ao terem-se mais ferramentas e métodos que possibilitam expandir a capacidade destes ensaios, melhora-se certamente o trabalho do consultor encarregado pelos testes, assim como a confiança na planta se solidifica.

2.1.3 Topologias do regulador de tensão

A medição da tensão terminal adotada pela maioria dos fabricantes de sistemas de excitação se dá através da leitura da tensão senoidal oriunda do secundário dos transformadores de potencial conectados aos terminais da MS. Desta forma, como se vê na Figura 15, o enrolamento primário deste equipamento é ligado à saída da máquina síncrona, enquanto o secundário apresenta, com alta exatidão, uma leitura da tensão terminal em valores reduzidos e compatíveis à entrada do RT, isto é, variações pequenas na tensão do primária induz variações proporcionais no seu enrolamento secundário. Uma vez obtida esta medida, ela é retificada e então regulada pelo RT.

Figura 15 - Conexão padrão de leitura da tensão terminal da MS pelo RT.



Fonte: Elaborada pelo autor.

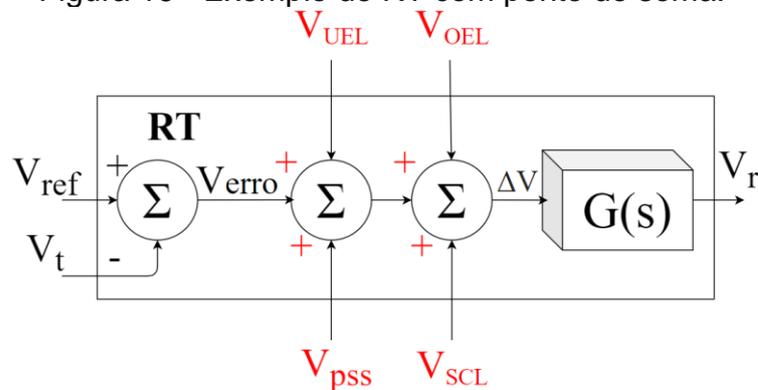
A norma (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2016) indica diversas topologias de sistemas de excitação e, por consequência, de reguladores de tensão também. As estruturas propostas pelo documento são classificadas, sobretudo, pela família da excitatriz que as compõe. Portanto, há SEs do tipo DC, os quais funcionam a partir de um comutador de excitatriz rotativa, do tipo AC, com base em alternadores alimentados por um retificador e, por fim, do tipo ST, que é composto pelas excitatrizes estáticas.

No que tange ao RT, por sua vez, podem ser encontradas diversas topologias também, com mudanças, por exemplo, na lógica e nos sinais utilizados para o controle. Contudo, o ponto em comum entre elas é a composição do erro de tensão, V_{erro} , elaborado a partir da diferença entre a referência de tensão com a tensão terminal, vide Figura 16, seja ela compensada ou não. A ação dos limitadores se dá por intermédio de duas formas diferentes. Desta maneira, pode-se utilizar o chamado ponto de soma, de forma a somar diretamente os sinais dos limitadores ao erro de tensão V_{erro} , esta estrutura é apresentada na Figura 16. Uma outra forma a qual o RT pode ser construído de maneira a receber influência dos limitadores, é por meio do uso de seletores do tipo *take-over*. Esta estrutura é apresentada pela Figura 17. Nesta, percebem-se dois blocos, o LV e o HV. No caso do LV, são comparados os sinais de limitadores e a malha passa a ser influenciada pelo valor mais baixo entre eles. Este seletor recebe como entrada os sinais de limitação da operação da máquina sobrecitada, de forma que ao selecionar o limitador de mais baixo valor, torna a operação da máquina mais restritiva. Como exemplo, pode-se ver a curva de Capacidade presente na Figura 18, onde há o limitador de corrente de campo nominal, de corrente estatórica e de sobrecitação atuando na região de potência reativa positiva, neste caso, ao utilizar esta configuração em um RT composto por seletores, a malha sofreria influência somente do limitador de corrente nominal, uma vez que este é o mais restritivo. O seletor HV, segue a mesma lógica, contudo atuando na região de subexcitação. Desta forma, o limitador de mais alta magnitude é o que terá influência sobre a malha de controle. Como exemplo, vê-se, novamente, a Figura 18, isto é, na região de subexcitação, há a atuação dos limitadores de corrente estatórica LCC e do limitador de subexcitação LSE, onde, neste caso será este o qual fará influência no controle. Nota-se também que a malha de controle com ponto de

soma faz com que os efeitos dos limitadores sobre a malha de controle sejam mais rápidos do que caso fossem utilizados seletores.

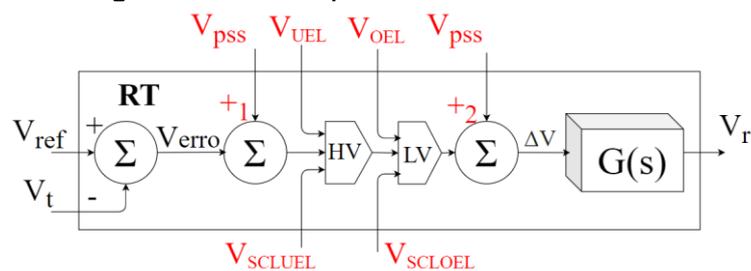
A ação do ESP na malha de controle, por sua vez, ocorre mediante um ponto de soma com o erro de tensão, de forma que V_{erro} é somado a V_{PSS} . No caso de uma malha com seletores, o local desse ponto de soma é capaz de trazer resultados diferentes em função da disposição dos blocos seletores na malha de controle. Isto é, o sinal do ESP pode ser somado antes ou depois dos seletores, como é apresentado na Figura 17, através do ponto de soma +1 e +2, o que acarreta em resultados diferentes.

Figura 16 - Exemplo de RT com ponto de soma.



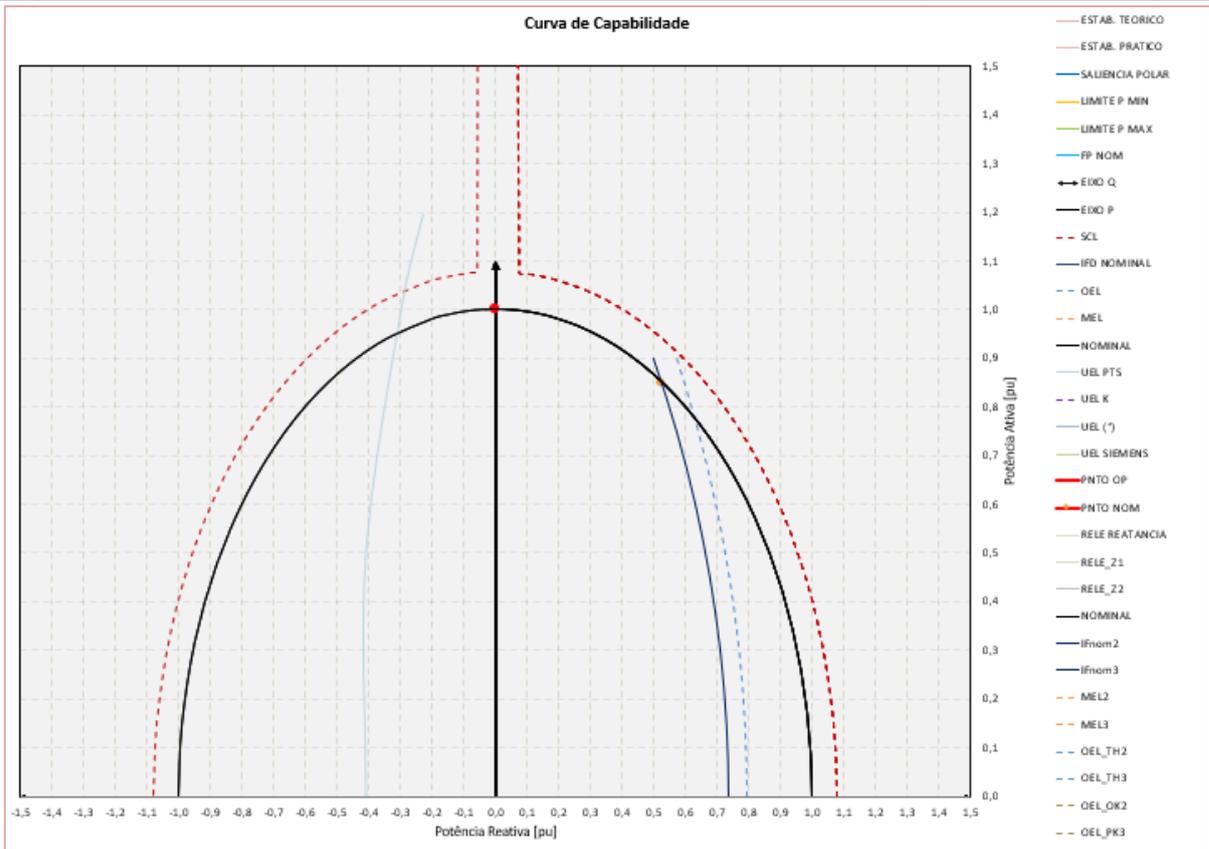
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 - Exemplo de RT com seletores.



Fonte: Elaborada pelo autor.

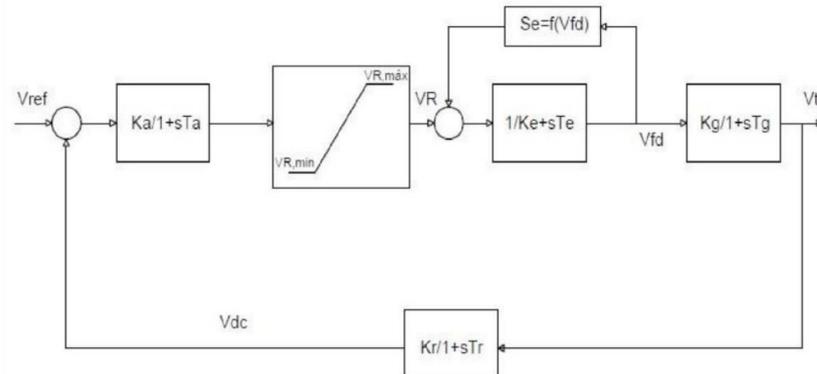
Figura 18– Curva de Capabilidade com limitadores de subexcitação e sobreexcitação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, com os sinais V_{erro} e os gerados pelos limitadores, compõe-se o sinal ΔV , como é apresentado na Figura 6. Juntamente a esta estrutura, o RT, em geral, é ainda composto por uma unidade de controle/amplificação, um bloco de saturação, além de receber um sinal de realimentação da excitatriz, por meio da medida de tensão ou de corrente de campo, como é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Estrutura simplificada de um RT clássico.



Fonte: (SOARES, 2017).

Desta forma, passa-se a ter um maior conhecimento acerca da estrutura de controle sobre a qual o método proposto de injeção de sinais pretende atuar. Neste contexto, percebe-se também que entender o funcionamento do ESP é deveras significativo para compor a contextualização do método e do valor que ele traz ao SEP. Portanto, tal dispositivo é o objeto de estudo da seção seguinte.

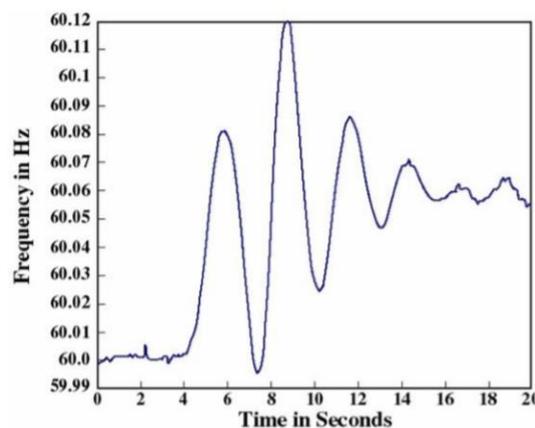
2.2 ESTABILIZADOR DO SISTEMA DE POTÊNCIA

O sistema elétrico de potência tem se tornado progressivamente mais complexo, devido ao aumento de interconexões, ao avanço da capacidade de geração por meio de novas fontes geradoras e devido ao crescente incremento na demanda (CASTRO, NETO e DANTAS, 2012). Desta maneira, é evidente que passe a se fazer presente um aumento das condições adversas no SEP, devido a, sobretudo, transitórios gerados por variações de carga, por manobras ou por faltas. Desta maneira, surgem oscilações eletromecânicas na máquina síncrona que, muitas vezes, a arquitetura do RT por si só não é capaz de amortecer, independentemente do ajuste realizado em seus parâmetros. Nota-se a gravidade destas oscilações, dado que em casos extremos, podem vir a tirar o gerador de sincronismo (TANG, 2011). Neste contexto, surge o ESP, que se posiciona como um instrumento capaz de gerar um sinal que ao ser somado a ΔV reduz as oscilações eletromecânicas no gerador.

As principais oscilações eletromecânicas as quais a MS está submetida são divididas por meio de faixas de frequência e são as que seguem (ROGERS, 2000):

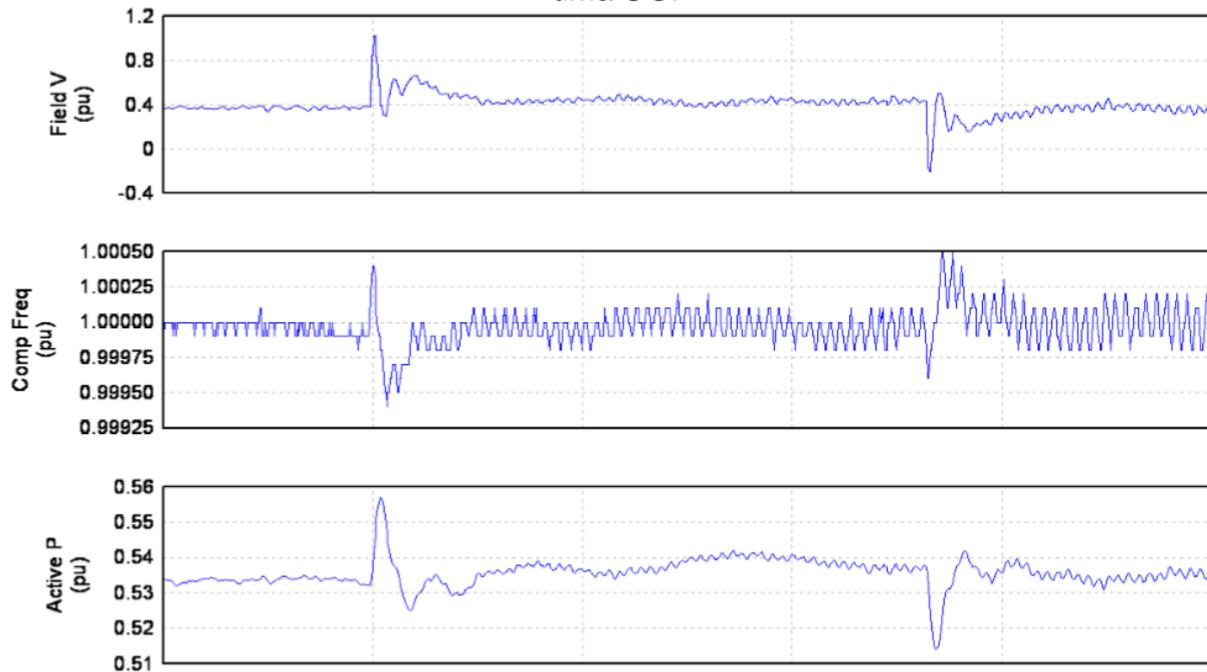
- a) Modos locais: esta classe compõe as oscilações na faixa de 0,8 e 2,0 Hz (ROGERS, 2000). Este modo surge devido à interação de uma ou mais máquinas oscilando contra um largo sistema de potência. Estas oscilações se tornam perigosas quando as UGs estão sob alto carregamento e conectadas ao sistema de alta reatância (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2014);
- b) Modos inter-área: a faixa de frequência a qual este modo compõe é entre 0,1 e 0,8 Hz (ROGERS, 2000). Este tipo de oscilação surge devido a grupos de máquinas síncronas oscilando em conjunto em diferentes partes do SEP (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2014). A Figura 20 traz uma imagem da influência deste modo sobre a frequência do SEP;
- c) Modos intra-planta: as oscilações são classificadas assim na faixa entre 1,5 e 3,0 Hz (ROGERS, 2000). Ocorre entre geradores próximos entre si, seja dentro de uma mesma usina ou em usinas próximas;
- d) Modos torsionais: esta classe compõe oscilações de mais de 4,0 Hz. Estes surgem devido a interações e movimentos relativos entre partes de uma mesma UG, como o rotor, os eixos e as turbinas. A Figura 21 mostra efeitos destes modos sobre algumas grandezas da máquina síncrona.

Figura 20 – Oscilação inter-área na frequência do SEP.



Fonte: (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2014).

Figura 21 – Oscilação torsional na tensão de campo, frequência e potência ativa de uma UG.



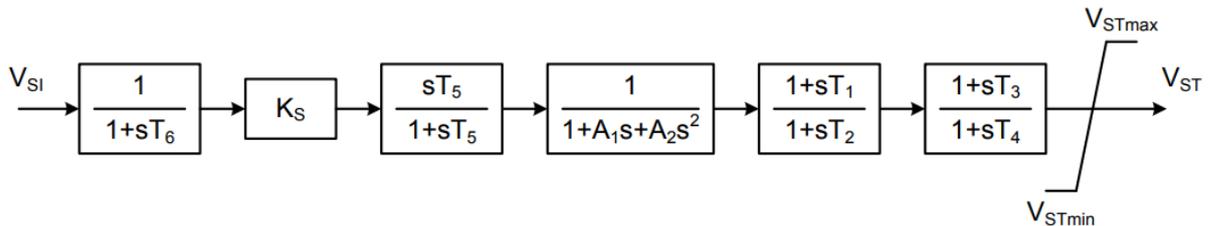
Fonte: (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2014).

Desta forma, o ESP é um elemento que se propõe a ser uma malha de controle adicional ao RT capaz de gerar torque amortecedor, visando diminuir as oscilações supracitadas e, assim, estender os limites de transferência de potência (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2009). O guia (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2016) traz diferentes topologias de ESP e cada uma delas traz desempenhos diferentes no cumprimento desta tarefa de amortecimento para os diferentes modos.

Uma vez que o ESP visa atingir o desvio de velocidade da máquina por meio de alterações na corrente de campo do gerador, este dispositivo é capaz de receber como entrada as seguintes grandezas: a variação da velocidade do rotor $\Delta\omega$, a variação do ângulo de potência do gerador $\Delta\delta$, a variação de potência ativa ΔP_e , a variação de potência acelerante ΔP_{acc} (KUNDUR, 1994) e a variação da frequência terminal do gerador (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008). Portanto, uma mistura destas grandezas pode ser utilizada para compor o conjunto de entradas de uma certa topologia de estabilizador. Desta maneira, as principais famílias de ESP são as que seguem:

- a) Família PSS1: esta família de estabilizadores usa como entrada apenas uma grandeza da máquina síncrona, sendo a velocidade do rotor, a frequência terminal do gerador, a frequência compensada ou a potência elétrica entregue na saída da MS (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2016). A Figura 22 traz uma representação de um dos integrantes dessa família, o PSS1A.

Figura 22 – Estrutura de ESP de uma única entrada – PSS1A.



Fonte: (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2016).

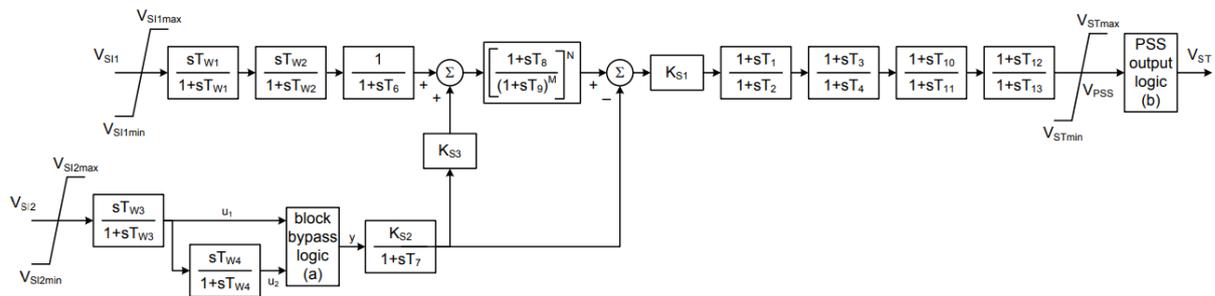
- b) Família PSS2: Uma das topologias de ESP mais comuns é a de potência acelerante, isto é, os da família PSS2. Nesta estrutura, apresentada na Figura 23, o ESP, de forma a minimizar as oscilações eletromecânicas no gerador, utiliza como base a Equação de *Swing*

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_D = P_{acc} \quad (3)$$

(MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008) da máquina síncrona, de forma a relacionar a potência acelerante (composta a partir da subtração das potências mecânica e elétrica, oriundas da energia mecânica entregue à turbina e da interação com a carga, respectivamente) com a velocidade no rotor. Nota-se que, outros valores podem ser usados como entradas nesta topologia, ao invés da potência acelerante e do desvio de velocidade. A estrutura comum de um PSS2 é composta por filtros de *wash-out* logo na entrada na topologia, estes se posicionam como filtros passa-alta, de forma a deixar passar somente as frequências de interesse. Desta maneira, este bloco é ajustado de forma a amortecer mais algum dos modos supracitados (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008). Usa-se também nesta topologia filtros rastreadores de rampa, os quais são utilizados para filtrar o sinal sintetizado de potência, tirando altas frequências indesejadas (MURDOCH, VENKATARAMAN, *et al.*, 1999).

Em seguida, tem-se o estágio de avanço-atraso de fase. Aqui, o intuito é compensar a defasagem gerada no SE, permitindo a geração de torque de amortecimento em fase com as oscilações de velocidade do rotor. Nota-se, aliás, que o Operador Nacional do Sistema (ONS) demanda que o sinal estabilizante deva ser gerado por uma estrutura dotada de um “filtro rastreador de rampa, capaz de propiciar um bom amortecimento na faixa de 0,2 a 2,0 Hz” (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, 2009).

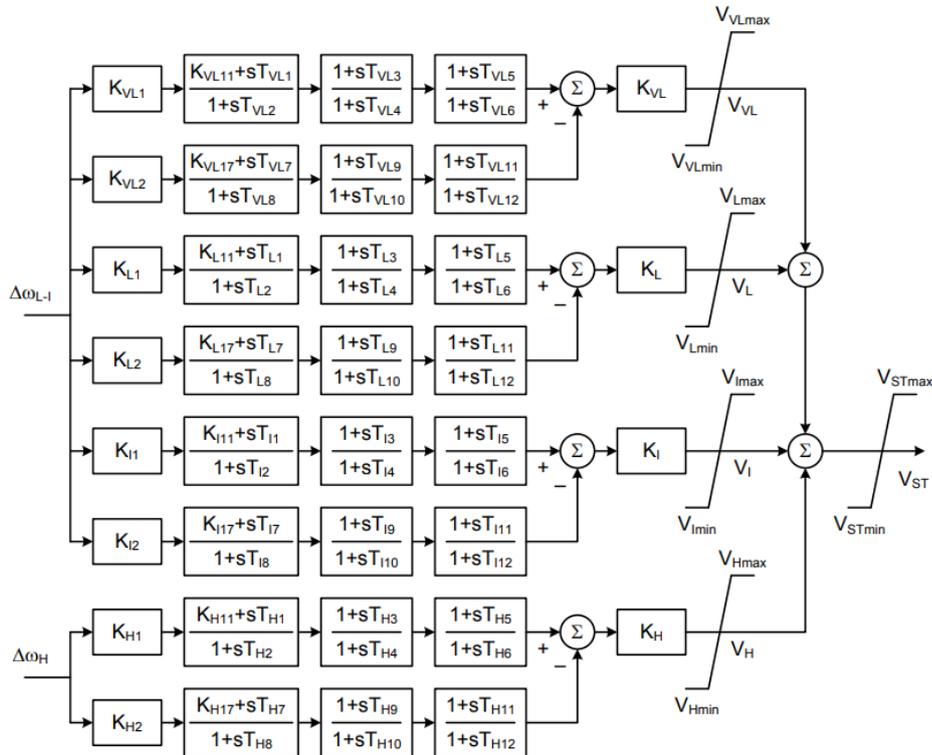
Figura 23 – Estrutura de ESP de potência acelerante – PSS2C.



Fonte: (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2016).

- Família PSS4: Em alguns sistemas de potência, devido à configuração da rede, podem surgir modos de oscilação com frequências muito baixas que podem ficar abaixo de 0,2 Hz, geralmente denominados modos globais. Frequências de oscilação nesta faixa surgem em linhas de transmissão que conectam unidades geradoras e cargas muito distantes entre si, além da configuração das linhas. Isso ocorre porque estes sistemas apresentam baixo nível de curto-circuito, tendo como consequência a diminuição do torque sincronizante. Durante a década de 90, enquanto o PSS2 estava ganhando espaço sobre os modelos de ESP primitivos que se baseavam na potência ativa, frequência ou velocidade, um outro conceito de estabilizador foi proposto, denominado PSS4 pela (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2016) (os modelos PSS4B e PSS4C são versões do mesmo conceito). Este modelo, também chamado de multibanda, possui uma estrutura de compensação de fase para cada modo de oscilação. A ideia básica é que se possa parametrizar a compensação partindo de uma função de transferência de alta ordem e com um número maior de parâmetros de sintonia, o que teoricamente permite que o PSS forneça exatamente a fase desejada para todos os modos de oscilação. A Figura 24 traz uma representação de uma estrutura clássica de PSS4, o PSS4C.

Figura 24 – Estrutura de ESP multibanda – PSS4C.



Fonte: (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2016).

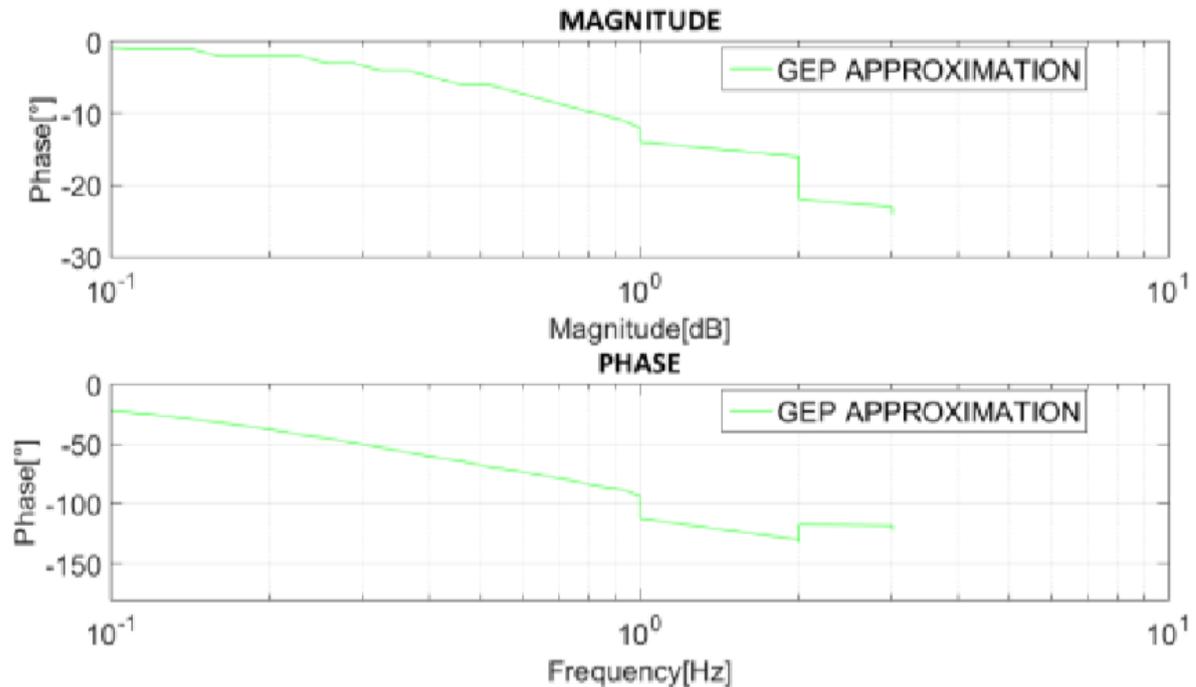
Como discutido, o ESP pode receber diferentes sinais para que possa gerar o sinal amortizante, como desvio de velocidade, potência e frequência, por exemplo. Portanto, alguns dos requisitos para fazer esta escolha são: os sinais devem ser de fácil medição localmente, a composição de ruído no sinal deve ser bastante baixa, caso contrário filtros adicionais serão necessários e, por fim, a topologia de ESP escolhida para acomodar estes sinais deve ser robusta o suficiente para o cenário em questão (MACHOWSKI, BIALEK e BUMBY, 2008).

Uma vez que o estabilizador de sistema de potência nada mais é que um compensador de fase do sinal de controle do RT, que tem por objetivo gerar torques com fase inversa aos das oscilações de velocidade no rotor, deve-se fazer um ótimo ajuste de seus parâmetros. Isto se dá uma vez que caso um bom ajuste não seja feito, a fase do sinal do estabilizador pode vir a agravar as oscilações eletromecânicas, ao invés de atenuá-las. Por isso, bons métodos de ajuste da malha do estabilizador devem ser conhecidos e empregados, da mesma forma que bons procedimentos de ensaio também (incluindo técnicas de injeção de sinais de teste como a apresentada neste trabalho).

A principal ferramenta de ajuste do ESP, independentemente da estrutura, é o ensaio de resposta em frequência, tanto em métodos clássicos de ajuste (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2009), quanto em procedimentos mais modernos (TANG, 2011). Desta forma, com o intuito de parametrizar satisfatoriamente o estabilizador e prover a compensação de fase e ganho necessários ao sistema, faz-se o ensaio de resposta em frequência do conjunto gerador, sistema de excitação e sistema de potência, assim provê-se, idealmente, torque amortizante em fase com as oscilações de velocidade (LARSEN e SWANN, 1981). Nota-se que, na prática, utiliza-se uma aproximação do GEP. Isto é, dado que o GEP compreende a função de transferência que possui como entrada a referência de controle do RT e como saída o seu torque e a medição de torque não é, muitas vezes, facilmente acessível na prática, utiliza-se ao invés do torque a tensão terminal do gerador (LARSEN e SWANN, 1981), esta aproximação é válida uma vez que para variações desprezíveis de desvio de velocidade o torque elétrico é proporcional à tensão terminal do gerador (MOTA, 2010). Aliás, nota-se que existem métodos que propõem trazer uma maior exatidão com o sistema real, como é apresentado em (GURRALA e SEN, 2010).

Desta forma, a Figura 25 traz um exemplo de resposta em frequência de um sistema GEP real. Neste, há presente a curva de magnitude, em dB, e fase em graus (°), para uma faixa de frequência entre 0,1 e 12 Hz.

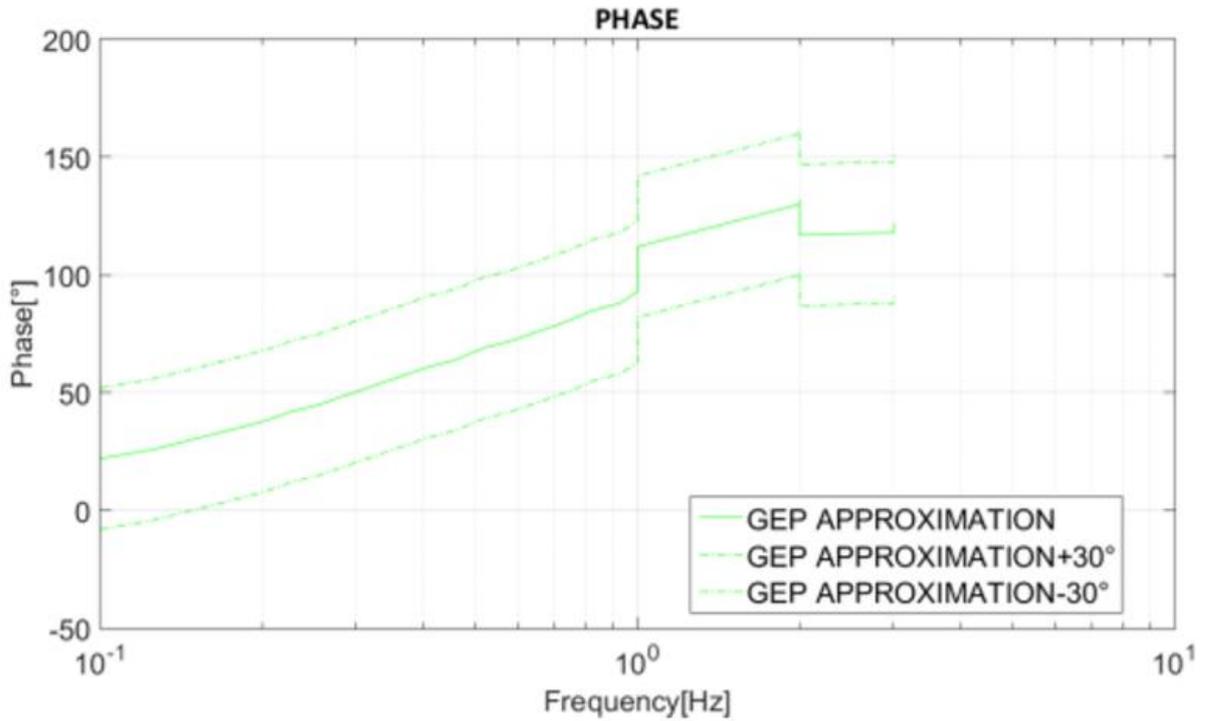
Figura 25 – Resposta em frequência do sistema GEP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Contudo, nota-se que o estabilizador deve, idealmente, atuar de forma a compensar as frequências de oscilação. Portanto, a fase do estabilizador deve ser diametralmente oposta à do sistema sobre o qual atua. Desta maneira, deseja-se ajustar a compensação de fase do ESP de forma a sobrepor o inverso da fase do GEP. Aliás, uma vez que se tem apenas a aproximação da resposta em frequência do sistema GEP, é comum aceitar uma compensação que se encontre na faixa de $\pm 30^\circ$ da resposta de fase. Ademais, nota-se que, no caso do ESP baseado na integral de potência acelerante, o PSS2, topologia mais comum no Brasil, a fase independe do ganho. O mesmo vale para o ESP de multibanda. Desta forma, é comum, durante a parametrização do estabilizador, olhar apenas a resposta de fase do sistema, uma vez que a magnitude pode ser facilmente ajustada ao alterar o ganho do estabilizador. A Figura 26, traz estas características realizadas a partir da resposta em frequência da Figura 25.

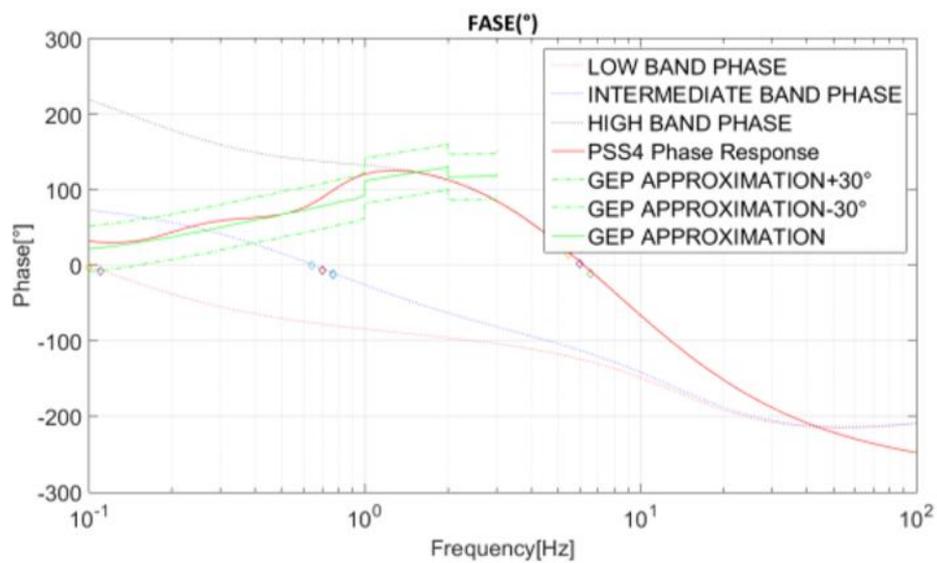
Figura 26 – Faixa aceitável de fase para o ESP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, pode-se fazer o ajuste do ESP. Neste caso, foi utilizado ESP multibanda do tipo PSS4C e a sua resposta em frequência é apresentada na Figura 27.

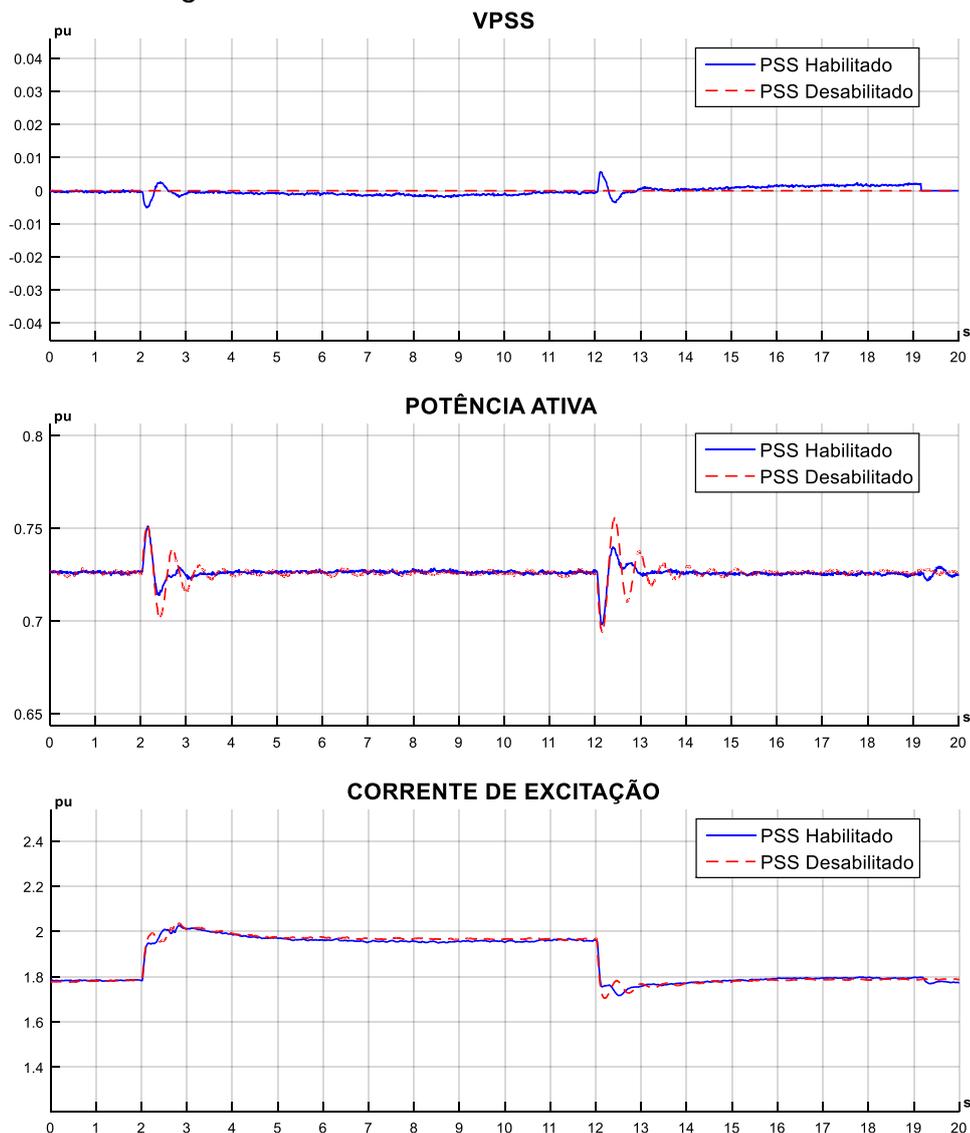
Figura 27 – Faixa aceitável de fase para o ESP.

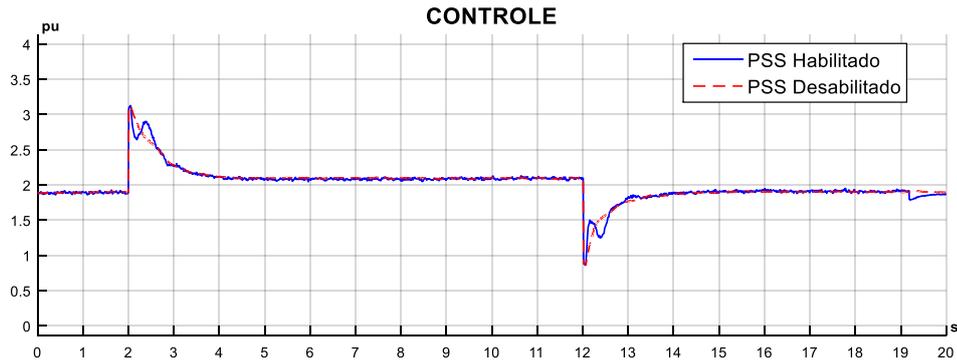


Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta maneira, com o ajuste do ESP e tendo este atuando no sistema, pode-se ver a seu efeito por meio de algumas grandezas mensuráveis da máquina síncrona, como na potência ativa, na corrente de excitação e no sinal de controle do RT, como pode ser visto na Figura 28. Estes registros foram tirados de um caso real realizado durante um ensaio de comissionamento em uma grande usina termelétrica brasileira. Nesta imagem, podem-se ver tanto a máquina atuando com o ESP, quanto sem. Desta maneira, nota-se, por exemplo, a diminuição drástica das oscilações na potência ativa, assim como uma suavização do sobressinal na corrente de campo. No caso, da imagem em questão, foi aplicado um sinal degrau de 0,02 pu na referência do regulador de tensão, no instante 2 seg e foi retirado em 12 seg.

Figura 28 – Grandezas da MS com e sem GEP.





Fonte: Elaborada pelo autor.

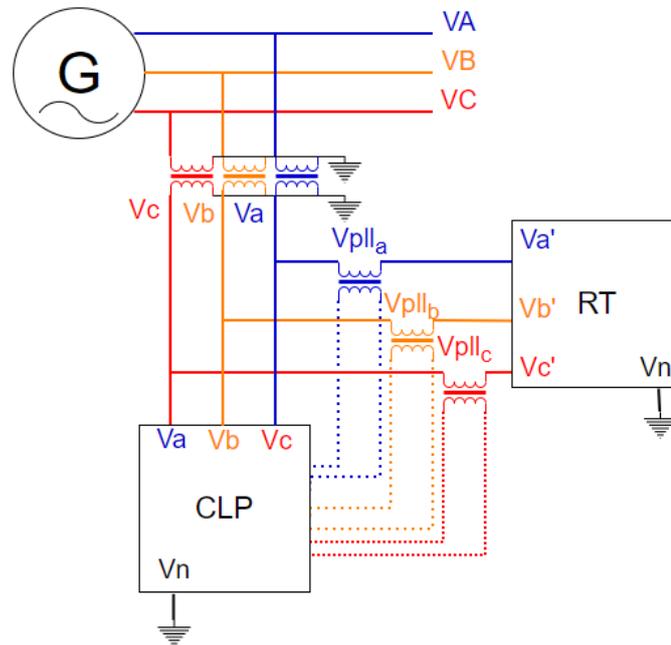
Nota-se, portanto que ao utilizar um estabilizador de sistema, necessita-se da aplicação de diversos sinais. Isto é, estes são necessários tanto para o seu ajuste, por meio de sinais senoidais na referência de tensão, de forma a fazer o ensaio de resposta em frequência, quanto para a avaliação de seu desempenho, por meio de sinais do tipo degrau. Além disso, dada a importância e a necessidade de tal dispositivo, percebe-se que a aplicação de uma boa ferramenta de estabilização é crucial na operação de uma UG. Desta forma, é evidente a importância de ter-se uma vasta gama de métodos, eficientes e práticos, para se fazer o ajuste e a aplicação do seu sinal. Assim, faz-se clara a relevância do método de injeção de sinais aqui proposto, dado que traz uma forma de gerar e injetar sinais de teste e de ajuste, como degrau e senoidal, respectivamente. Além disso, o método permite injetar por completo um sinal estabilizante de um ESP externo à estrutura local de regulação de tensão, podendo, assim, ajudar na comparação entre topologias, modelos e ajustes ou, até mesmo, servir como uma solução paliativa de estabilização de uma UG, em casos de urgência, onde não há um ESP em condições de suprir as demandas de amortecimento, por problema do produto em si, por exemplo. Desta forma, o próximo capítulo visa apresentar este método de injeção de sinais, que se caracteriza pela injeção através da realimentação da MS.

3 MÉTODO PROPOSTO

3.1 ESTRUTURA DO MÉTODO

O método proposto de injeção de sinais no regulador de tensão pelo sinal de realimentação da máquina síncrona utiliza como base o uso de transformadores de potencial (TP), dispositivos do tipo Controlador Lógico Programável (CLP) e de malhas de captura de fase (PLL). A Figura 29 traz uma representação esquemática do método proposto.

Figura 29 – Esquemático da metodologia proposta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

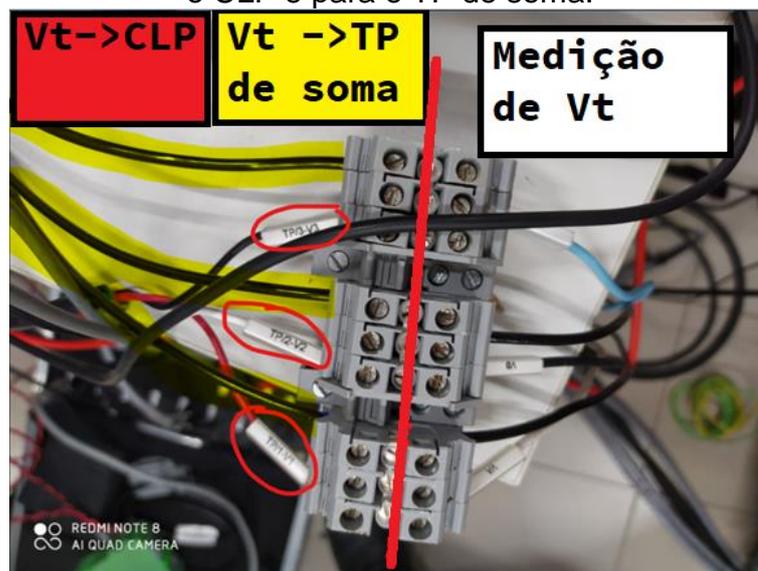
As diferenças na conexão do sistema do novo método são indicadas ao comparar a Figura 29 e a Figura 15. Na medição de tensão terminal da máquina síncrona, realizada por meio de transformadores de potencial, a variável medida é levada diretamente ao regulador de tensão. Na nova estrutura, o secundário do transformador de potencial associado ao gerador (que neste trabalho é chamado de TP de medição) é conectado a dois dispositivos distintos. Isto é, a medição de cada fase de tensão é encaminhada ao RT, por meio de uma conexão em série com o enrolamento primário de um transformador de potencial (que neste trabalho é chamado de TP de soma). Ademais, esta mesma medição da tensão terminal da MS é encaminhada, também, a um dispositivo CLP, que tem por função realizar, continuamente, o rastreamento das suas grandezas de fase e frequência, mediante o uso da PLL. O CLP é o instrumento capaz de realizar a geração dos sinais a serem injetados. Estes sinais são somados à medida de tensão terminal, ao enviá-los ao secundário do TP de soma.

Portanto, o sinal das tensões terminais da MS, realizada pelos transformadores de potencial de medição, é aplicado em um CLP, o qual tem

embarcado um algoritmo de malha de captura de fase de sequência positiva, que possibilita resgatar a fase e a frequência das tensões terminais, \vec{V} , da MS. Com acesso a essas informações, o CLP é capaz de gerar sinais sincronizados à \vec{V} . Estes sinais, $\overline{V_{pl}}$, são então somados a \vec{V} , através dos TPs de soma. O resultado da adição é, então, finalmente, entregue ao RT.

A Figura 30 traz uma imagem de forma a ilustrar as conexões relacionadas ao TP de medição. Desta maneira, a partir das medições de tensão terminal da máquina síncrona, tem-se a distribuição dessas medidas, de forma a enviá-las ao CLP, mediante os fios destacados pela marcação vermelha, e ao TP de soma, através dos fios evidenciados pela cor amarela.

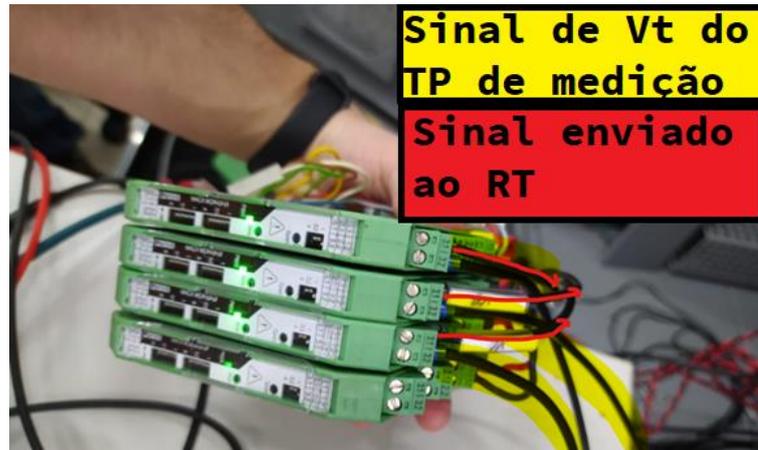
Figura 30 – Esquemático de distribuição da medição da tensão terminal da MS para o CLP e para o TP de soma.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 31 traz uma imagem real de como é feita a conexão do sinal de medida da tensão terminal da MS juntamente ao RT, por meio de uma conexão em série com um TP que, no caso, é composto por isoladores da marca Phoenix. A Figura 32, por sua vez, traz uma foto de como é feita a conexão dos fios condutores do sinal gerado pelo CLP ao TP de soma.

Figura 31 – Esquemático de conexão do sinal de V_t com o RT, através do TP de soma.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Esquemático de conexão do sinal do CLP ao TP de soma.



Fonte: Elaborada pelo autor.

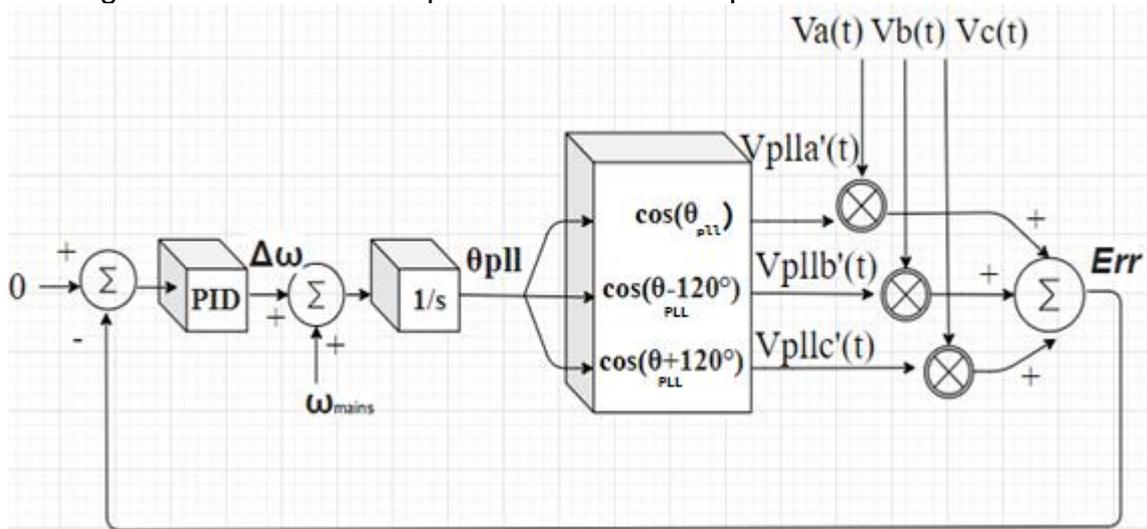
3.2 GERAÇÃO DO SINAL

De forma a poder realizar a injeção dos sinais gerados pelo CLP, $\overline{v_{pll}}$, à medição da tensão terminal da MS, \vec{V} , por meio deste método, nota-se que os sinais a serem injetados devem ser senoidais. Portanto, deve ser feita a sincronização de $\overline{v_{pll}}$ e \vec{V} . Esta sintonia é dada através de uma malha de captura de fase de sequência

positiva, a partir da qual são detectadas a frequência, ω , e a fase terminal, δ° , a partir de \vec{V} .

Ressalta-se que a utilização da PLL é, de certa forma, bastante difundida em aplicações no sistema de potência, sobretudo, na sincronização entre as saídas de conversores eletrônicos de potência e as grandezas físicas da rede, através da detecção de componentes de sequência positiva (HADJIDEMETRIOU, KYRIAKIDES e BLAABJERG, 2013), (ARRUDA, SILVA e FILHO, 2001), (LICCARDO, MARINO e RAIMONDO, 2011), (HUANG, XIN, *et al.*, 2020). Contudo, diferentemente de certas implementações junto ao sistema de potência que utilizam o Teorema de decomposição de Fortescue (FORTESCUE, 1918) para realizar o rastreamento de fase de grandezas da rede, utiliza-se aqui outra abordagem. Isto é, faz-se o uso de uma malha de captura de fase (JUNIOR, KOMATSU e MARTINZ, 2010) baseada em algoritmos de detecção de sequência positiva (PSD) (PÁDUA, DECKMANN e MARAFÃO, 2005). Desta forma, tal estrutura, apresentada por meio da Figura 33, garante que as componentes de sequência positiva possam ser calculadas mesmo sob efeitos de distorções harmônicas e desvios na frequência fundamental, sem a necessidade de um filtro adicional, como é discutido em (JUNIOR, KOMATSU e MARTINZ, 2010). Nota-se que esta característica de robustez do sistema de controle que compõe esta PLL é fundamental para que o método proposto possa ser utilizado na prática. Isto se dá uma vez que os sinais de tensão terminal que alimentam a malha da PLL muitas vezes são tomadas por fortes componentes harmônicas ou são marcadas por algum tipo de desbalanço elétrico entre as fases.

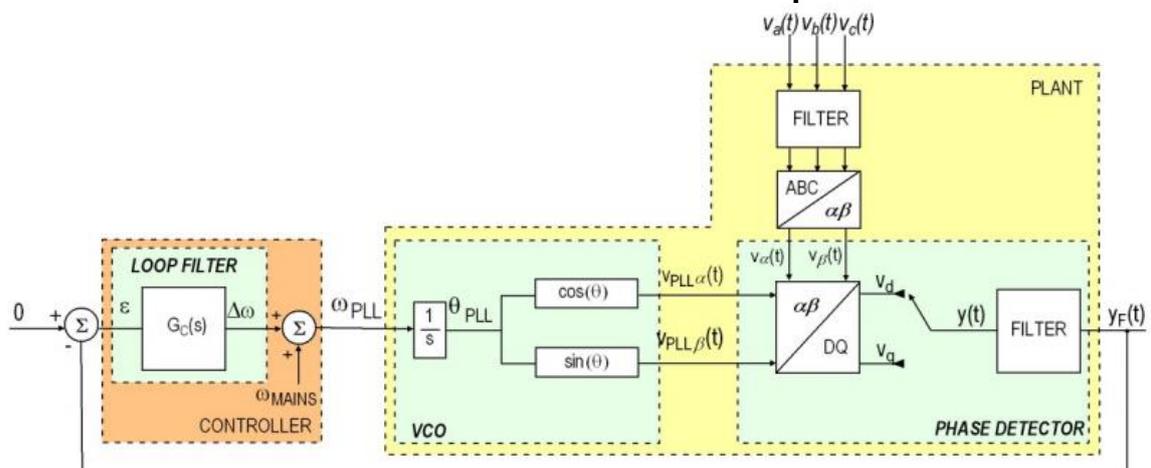
Figura 33 – Malha de Captura de Fase de Sequência Positiva utilizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

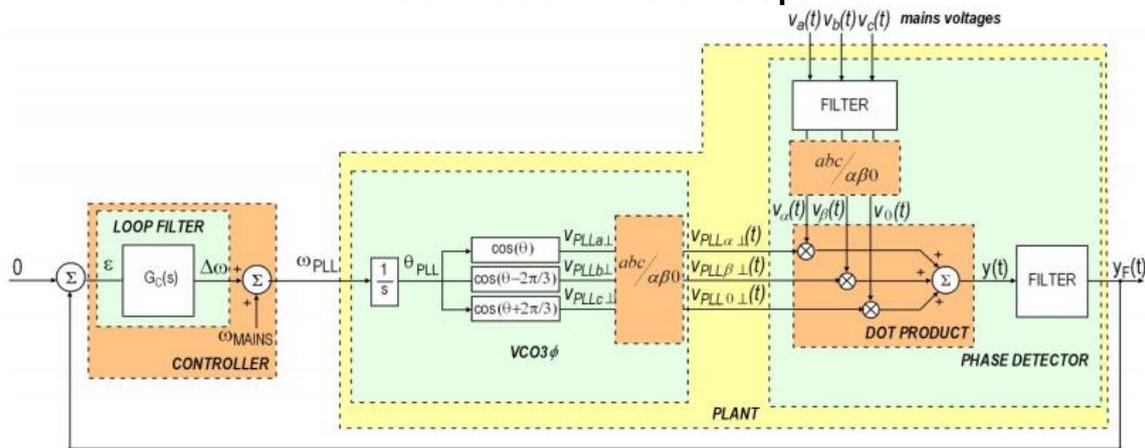
A topologia da malha de captura de fase utilizada neste método pode ser implementada de diversas formas. Isto é, pode-se fazer o rastreo das grandezas periódicas por meio da representação **abc** da tensão terminal, ou através das representações **dq**, vide Figura 34, ou **$\alpha\beta 0$** , vide Figura 35. Neste trabalho, utilizou-se a representação por eixo de coordenadas **abc**, portanto, será dado enfoque à explicação da PLL nesta topologia. Contudo, nota-se que as alterações topológicas para as duas outras representações são bastante diminutas quando comparada à usada neste documento.

Figura 34 – Malha de Captura de Fase de Sequência Positiva com representação no sistema de coordenadas **dq**.



Fonte: (JUNIOR, KOMATSU e MARTINZ, 2010).

Figura 35 – Malha de Captura de Fase de Sequência Positiva com representação no sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$.



Fonte: (JUNIOR, KOMATSU e MARTINZ, 2010).

Desta maneira, o funcionamento da PLL utilizada é simples. Definindo-se \vec{V} como,

$$\vec{V} = [V_a(t) \ V_b(t) \ V_c(t)], \quad (4)$$

o conjunto de tensões trifásicas instantâneas nos secundários dos TPs de medição, realiza-se um produto vetorial com as componentes de $\overline{V_{pll'}}$, onde

$$\overline{V_{pll'}} = [V_{plla'}(t) \ V_{pllb'}(t) \ V_{pllc'}(t)], \quad (5)$$

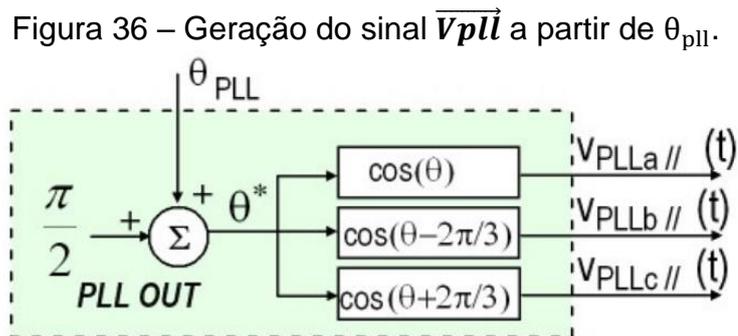
que representa as tensões trifásicas instantâneas de amplitude unitária sintetizadas pela PLL, gerando como resultado o sinal **Err**, dado por

$$Err = \vec{V} \times \overline{V_{pll'}} = [V_a \cdot V_{plla'} + V_b \cdot V_{pllb'} + V_c \cdot V_{pllc'}]. \quad (6)$$

Desta forma, a PLL otimiza $\overline{V_{pll'}}$ de modo a levar **Err** à nulidade. Isto ocorrerá quando \vec{V} e $\overline{V_{pll'}}$ tiverem a mesma frequência, porém ortogonais entre si, isto é, $\vec{V} \perp \overline{V_{pll'}}$. A grandeza controlada pela malha, para chegar a este resultado, é $\Delta\omega$, que faz correção da frequência instantânea e que, através de integração, encontra a fase momentânea de $\overline{V_{pll'}}$, isto é, θ_{pll} . Por fim, adiciona-se 90° à fase de cada uma das componentes de $\overline{V_{pll'}}$, gerando, assim, $\overline{V_{pll}}$, definido como,

$$\overline{\mathbf{v}_{pll}} = [v_{plla}(t) \ v_{pllb}(t) \ v_{pllc}(t)] \quad (7)$$

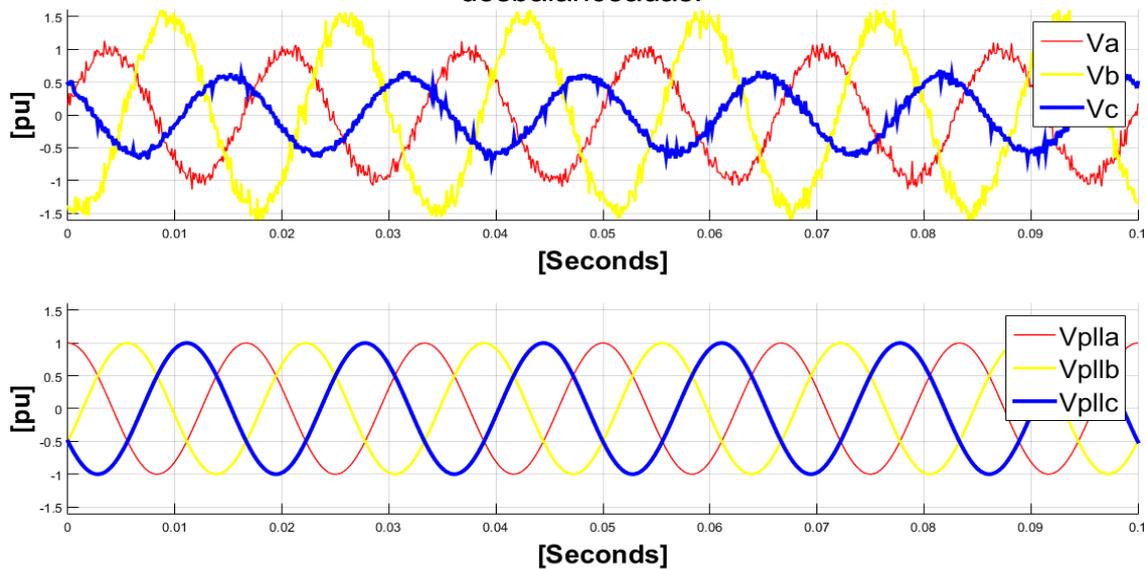
de tal forma que, $\overline{\mathbf{v}_{pll}} // \overline{\mathbf{V}}$. A Figura 36 traz uma representação por meio de blocos da geração de $\overline{\mathbf{v}_{pll}}$ utilizando a fase rastreada θ_{pll} .



Fonte: (JUNIOR, KOMATSU e MARTINZ, 2010).

O algoritmo de PLL, do tipo PSD, utilizado garante o rastreamento das componentes de sequência positiva, mesmo quando o sinal trifásico que o alimenta se encontra sob fortes efeitos de distorções harmônicas e desbalanceamento, sem que seja necessária a inclusão de um filtro. Tal característica é apresentada em (PÁDUA, DECKMANN e MARAFÃO, 2005) e presente na Figura 37, que mostra uma simulação do algoritmo da PLL, que rastreia as tensões ruidosas e desbalanceadas, \mathbf{V}_a , \mathbf{V}_b e \mathbf{V}_c , sintetizando, assim, \mathbf{v}_{plla} , \mathbf{v}_{pllb} e \mathbf{v}_{pllc} .

Figura 37 - Tensões sintetizadas pela PLL a partir de tensões ruidosas e desbalanceadas.



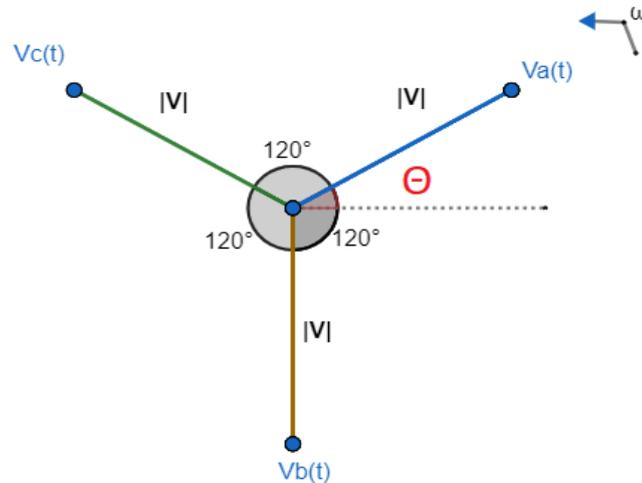
Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, ao ter-se as grandezas senoidais \vec{V}_{pll} geradas, pode-se modular suas amplitudes. Assim, por meio da estrutura embarcada no CLP, torna-se possível desenhar a magnitude instantânea de forma a gerar um sinal que representa um sinal degrau, um ensaio de frequência ou um sinal estabilizante oriundo de um ESP externo por exemplo.

3.3 SOMA DOS SINAIS

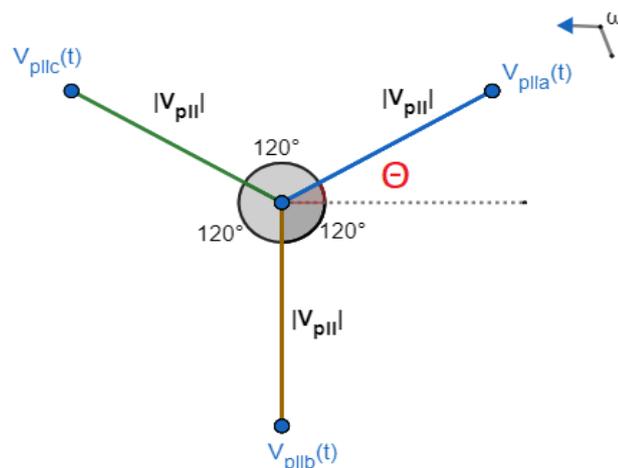
Uma vez tendo-se os conjuntos trifásicos \vec{V} , apresentado na Figura 38, e \vec{V}_{pll} , mostrado na Figura 39, sincronizados entre si, pode-se somá-los, através do TP de soma, de modo a alterar a amplitude do sinal referente à tensão terminal da MS que entra no sistema de excitação, uma vez que, agora, o sistema passa a receber $\vec{V} + \vec{V}_{pll}$, ao invés de \vec{V} .

Figura 38 - Fasores trifásicos das tensões medidas pelo TP de medição, \vec{V} .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 - Fasores trifásicos das tensões sintetizadas pela PLL, $\overline{V_{pll}}$.

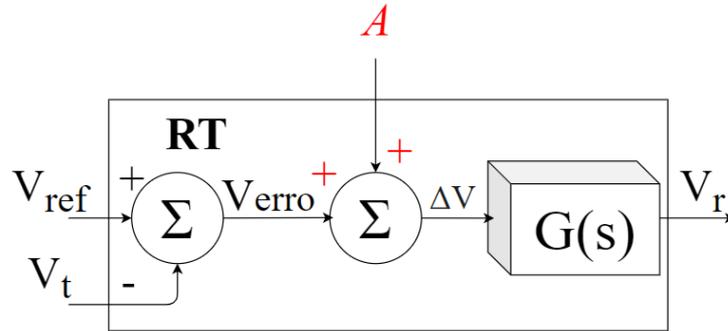


Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, o objetivo é possibilitar a realização da adição de sinais à malha de controle do regulador de tensão externamente, ao mesmo tempo que se têm resultados semelhantes àqueles obtidos ao aplicar este sinal a um ponto de soma interno à malha do RT, como é apresentado pela Figura 40. Portanto, poder fazer uma relação entre os efeitos no sistema de controle devido a um sinal injetado através do ponto de soma e através da realimentação é de fundamental importância para o entendimento deste novo método. Assim, mostra-se que para se obterem resultados semelhantes ao de injetar um sinal de amplitude instantânea A por meio de um ponto

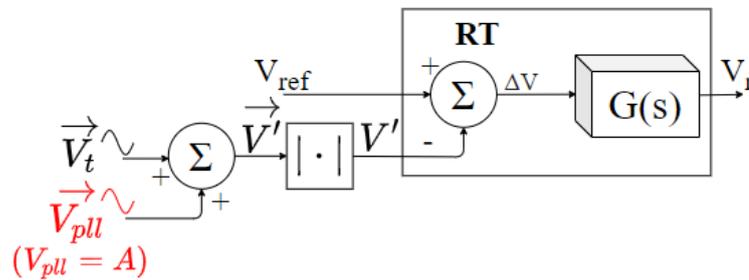
de soma, Figura 40, deve-se somar à realimentação um sinal senoidal sincronizado de amplitude instantânea A , como é apresentado pela Figura 41.

Figura 40 - Sinal de amplitude A injetado na malha de controle do RT por meio de um ponto de soma.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 - Sinal de amplitude A injetado na malha de controle do RT por meio do método de realimentação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, consideram-se V , a magnitude de \vec{V} ,

$$|\vec{V}| = V = \sqrt{Va(t)^2 + Vb(t)^2 + Vc(t)^2}, \quad (8)$$

e V_{pll} , a magnitude de \vec{V}_{pll} ,

$$|\vec{V}_{pll}| = V_{pll} = \sqrt{V_{plla}(t)^2 + V_{pllb}(t)^2 + V_{pllc}(t)^2}. \quad (9)$$

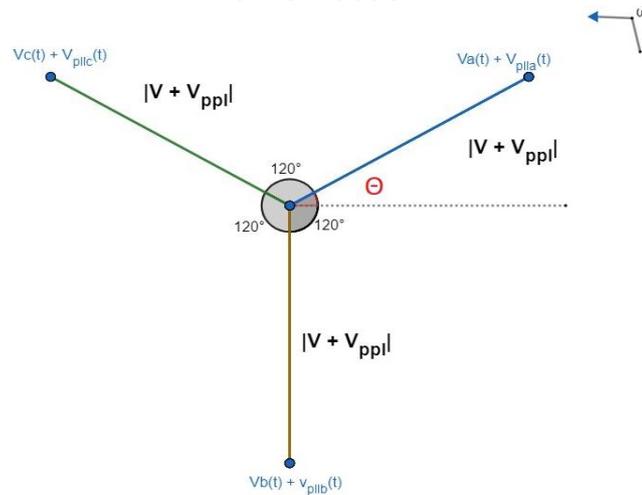
Assim, assume-se que V_{pll} é igual a A ,

$$V_{pll} = A \quad (10)$$

A soma de \vec{V} e \overline{Vpll} é definida como \vec{V}' , apresentada pela Figura 42, e sua norma, V' , é dada por

$$V' = \sqrt{[Va + Vplla]^2 + [Vb + Vpllb]^2 + [Vc + Vpllc]^2} \quad (11)$$

Figura 42 – Fasores trifásicos da soma das tensões terminais com as tensões sintetizadas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dado que \vec{V} e \overline{Vpll} são conjuntos sincronizados e balanceados, pode-se assumir a seguinte relação

$$\overline{Vpll} = k\vec{V}, k \in \mathfrak{R} \quad (12)$$

Portanto, usando a Equação (7) e a Equação (12), tem-se,

$$\overline{Vpll} = [kVa(t) \ kVb(t) \ kVc(t)] \quad (13)$$

Usando as equações até então apresentadas, pode-se derivar as seguintes

$$V' = \sqrt{(Va + kVa)^2 + (Vb + kVb)^2 + (Vc + kVc)^2} \quad (14)$$

$$V' = \sqrt{Va^2(1+k)^2 + Vb^2(1+k)^2 + Vc^2(1+k)^2} \quad (15)$$

$$V' = (1+k)\sqrt{Va^2 + Vb^2 + Vc^2} \quad (16)$$

$$V' = \sqrt{Va^2 + Vb^2 + Vc^2} + k\sqrt{Va^2 + Vb^2 + Vc^2} \quad (17)$$

$$V' = V + kV \quad (18)$$

$$V' = V + V_{pll} \quad (19)$$

$$V' = V + A \quad (20)$$

Desta forma, mostra-se que para se ter o mesmo efeito da aplicação de um sinal de amplitude **A** por meio de um ponto de soma, deve-se simplesmente somar à realimentação da MS um conjunto trifásico sincronizado à \vec{V} e com amplitude **A**. Isto é, o sistema presente na Figura 40 e na Figura 41 são equivalentes.

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO

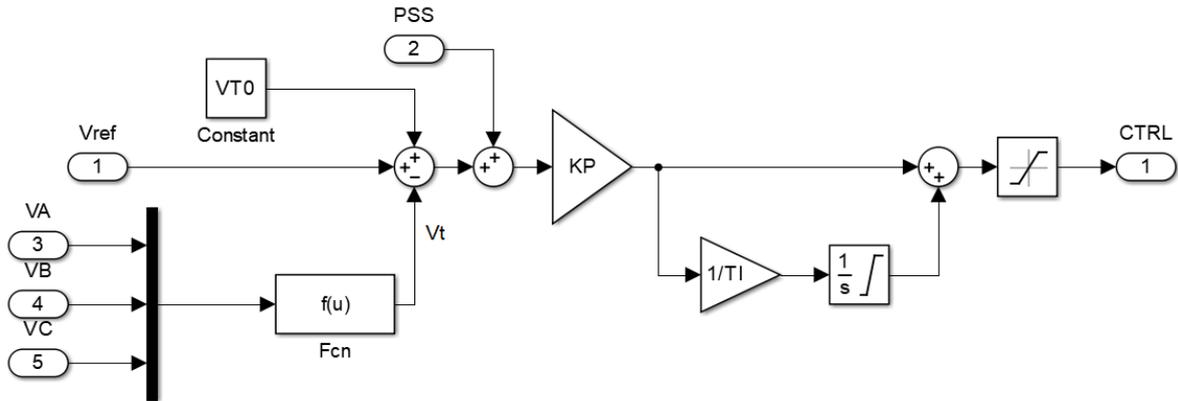
As características do método de injeção descritas até então de forma matemático-analítica, podem ser vistas também através de simulação. Desta forma, construiu-se um modelo computacional, por meio das plataformas Simulink e Matlab, capaz de simular a metodologia. Desta forma, usa-se como base um sistema composto por uma MS regulada por um RT, alimentando uma carga. Assim, utilizou-se como topologia de representação do gerador, o modelo Sauer Pai (SAUER e PAI), os parâmetros utilizados estão presentes na Tabela 2. De forma, para regular a tensão, utilizou-se como topologia do RT, uma malha básica, composta por um controlador proporcional-integral, tal como é apresentado na Figura 43, os seus parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 – Parâmetros da MS utilizado.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Reatância de Eixo direto	x_d	1,80	[pu]
Reatância Transitória de Eixo Direto	x'_d	0,24	[pu]
Reatância Subtransitória de Eixo Direto	x''_d	0,225	[pu]
Reatância de Eixo em Quadratura	x_q	1,60	[pu]
Reatância Transitória de Eixo em Quadratura	x'_q	0,50	[pu]
Reatância Subtransitória de Eixo em Quadratura	x''_q	0,23	[pu]
Reatância de Dispersão	X_l	0,21	[pu]
Resistência do Estator (28,7°C)	r_s	0,001	[pu]
Const. de Tempo Transitória de Eixo Direto em Circuito Aberto	T'_{do}	4,90	[s]
Const. de Tempo Subtransitória de Eixo Direto em Circuito Aberto	T''_{do}	0,03	[s]
Const. de Tempo Transitória de Eixo Quadratura em Circuito Aberto	T'_{qo}	0,75	[s]
Const. de Tempo Subtransitória de Eixo Quadratura em Circuito Aberto	T''_{qo}	0,10	[s]
Constante de Inércia do Conjunto Gerador-Turbina	$2H$	6,90	[s]
Coeficiente de Amortecimento	D	12,0	-
Parâmetro de Saturação	A_g	0,01	-
Parâmetro de Saturação	B_g	10,0	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 43 – Topologia do RT utilizado na simulação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Parâmetros do RT utilizado.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Ganho proporcional	K_p	60
Tempo integral	T_i	1,25
Limite máximo dos saturadores	-	10
Limite mínimo dos saturadores	-	-10

Fonte: Elaborada pelo autor.

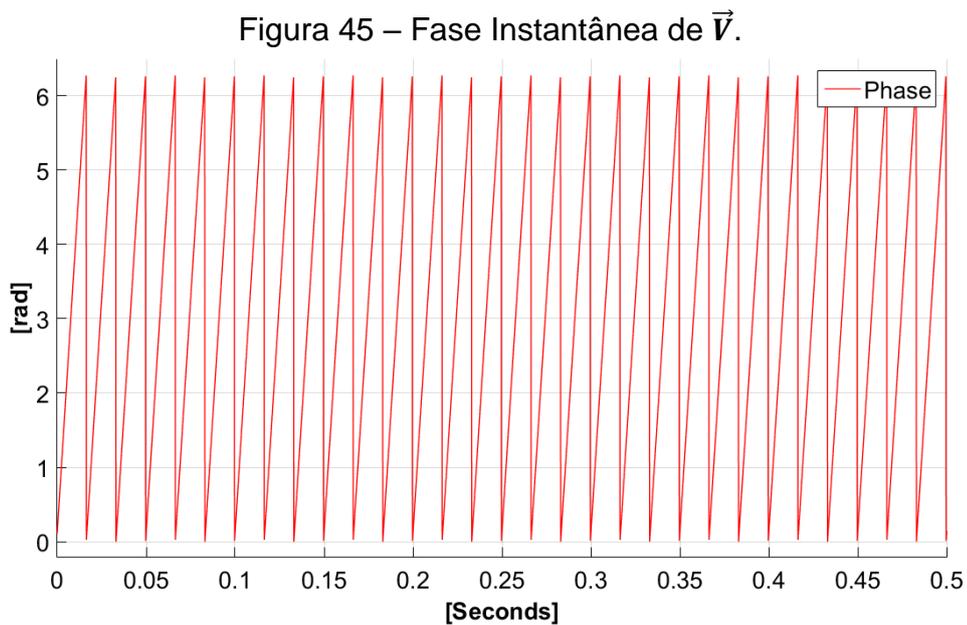
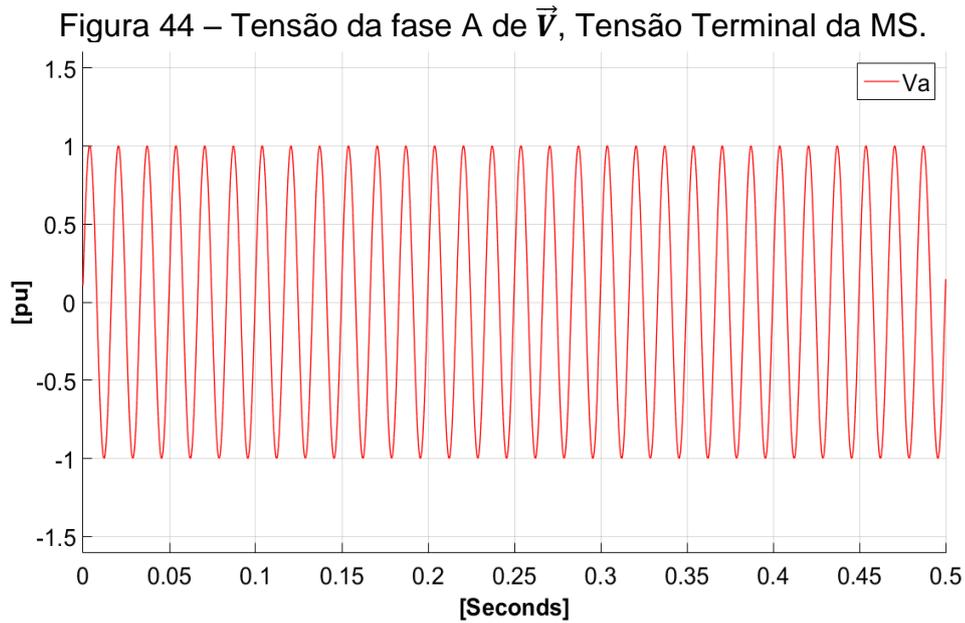
4.1 ENSAIO DE RESPOSTA AO DEGRAU

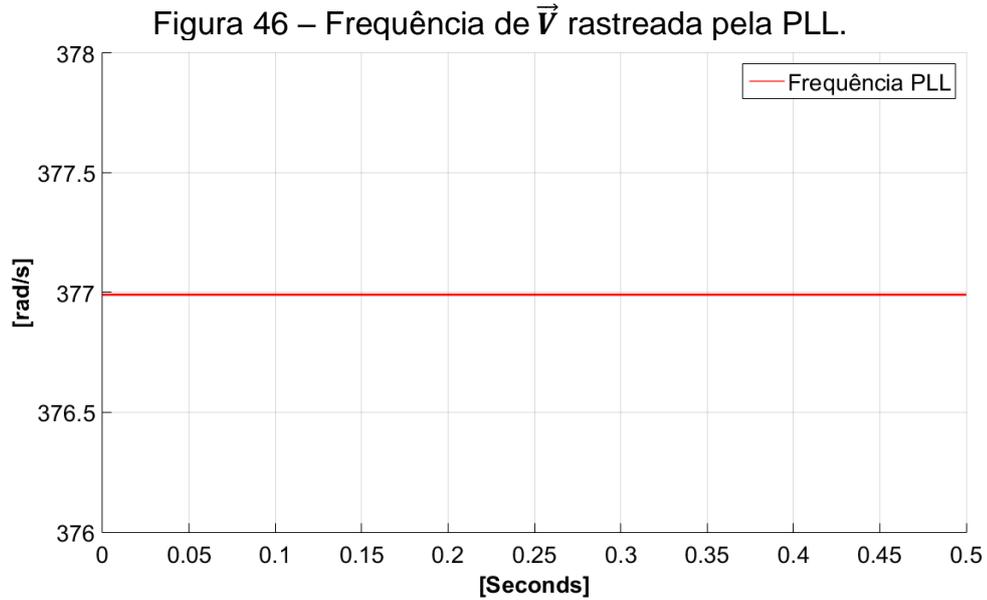
Apresenta-se, primeiramente, o funcionamento do modelo a partir da aplicação de um degrau pela realimentação. Isto é, com base no entendimento do método através da resposta ao degrau, pode-se extrapolar tais ideias para a resposta do sistema a sinais mais complexos, como é discutido mais adiante neste trabalho.

Nota-se que ao somar um sinal degrau de amplitude A pu à realimentação de tensão terminal da máquina síncrona, espera-se que haja um incremento de A na tensão terminal do gerador, da mesma forma como se fosse feita uma soma diretamente à referência de tensão do regulador. Desta forma, inicia-se a simulação.

Inicialmente, tem-se o gerador operando em estado de regime permanente, com a tensão terminal operando em 1 pu, como é apresentado pela Figura 44. Assim, salienta-se que a malha de captura de fase de sequência positiva mede

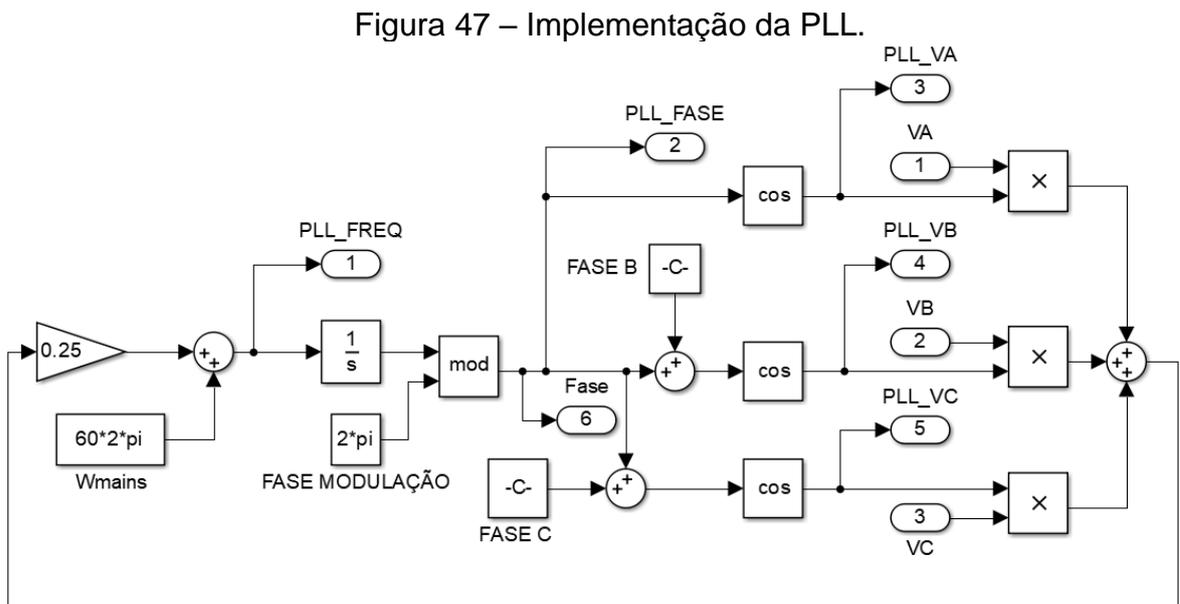
continuamente a fase, Figura 45, e, conseqüentemente, a frequência instantânea de \vec{V} . Percebe-se que a fase se mantém variando constantemente entre 0 e 2π radianos, uma vez que esta é a fase de um ponto instantâneo. Contudo, ao integrar a fase, tem-se a frequência que se mantém constante em, aproximadamente, 377 rad/s, ou 60 Hz, vide Figura 46, como era o esperado para o sinal da Figura 44.





Fonte: Elaborada pelo autor.

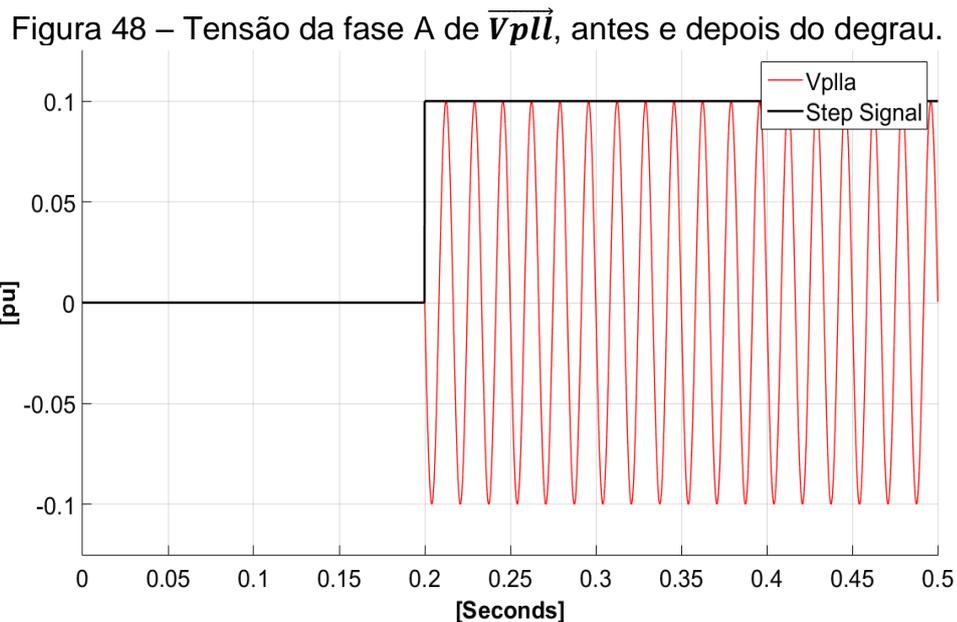
A implementação da malha de captura de fase foi realizada tal qual explicado na seção anterior. Desta forma, a configuração do controlador da malha de captura foi ajustada somente com um ganho proporcional de 0,25, como é apresentado através da Figura 47.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez que o CLP tem, a todo momento, acesso à mensuração da fase e da frequência das tensões terminais, \vec{V} , a malha de captura de fase de sequência positiva está sempre com \vec{v}_{pll} sincronizado com \vec{V} . Desta forma, o modelo está sempre apto a realizar a injeção.

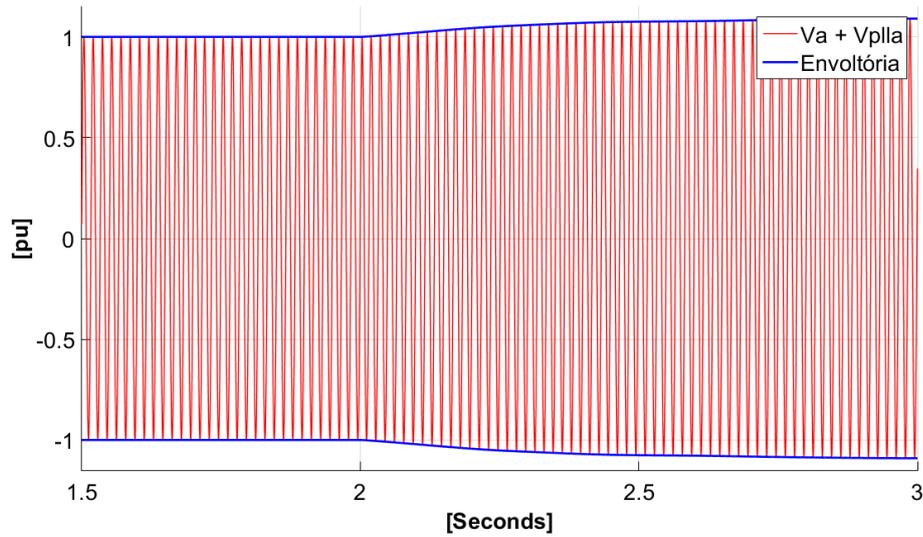
Assim sendo, ao ter as informações de fase e frequência terminais da MS, disponibilizadas pela PLL, constroem-se os sinais trifásicos sincronizados, \vec{v}_{pll} . Desta forma, uma vez que se deseja aplicar um degrau na tensão terminal da MS, usando o método proposto, ajusta-se a amplitude de \vec{v}_{pll} de modo a torná-la igual à do degrau desejado. Assim, a Figura 48 apresenta a tensão da fase A de \vec{v}_{pll} , que inicialmente apresenta amplitude nula, porém no momento de aplicação do degrau passa a ter amplitude igual a 0,1 pu.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta maneira, através da estrutura proposta, apresentada pela Figura 41, pode-se adicionar o conjunto trifásico \vec{v}_{pll} à \vec{V} . Assim, o sinal de entrada do RT correspondente à realimentação da MS passa a receber a soma das tensões terminais medidas pelos TPs e das tensões sintetizadas pelo CLP. Portanto, com a nova entrada, o RT regula as tensões terminais da MS acrescentando 0,1 pu na amplitude, como é apresentado na Figura 49.

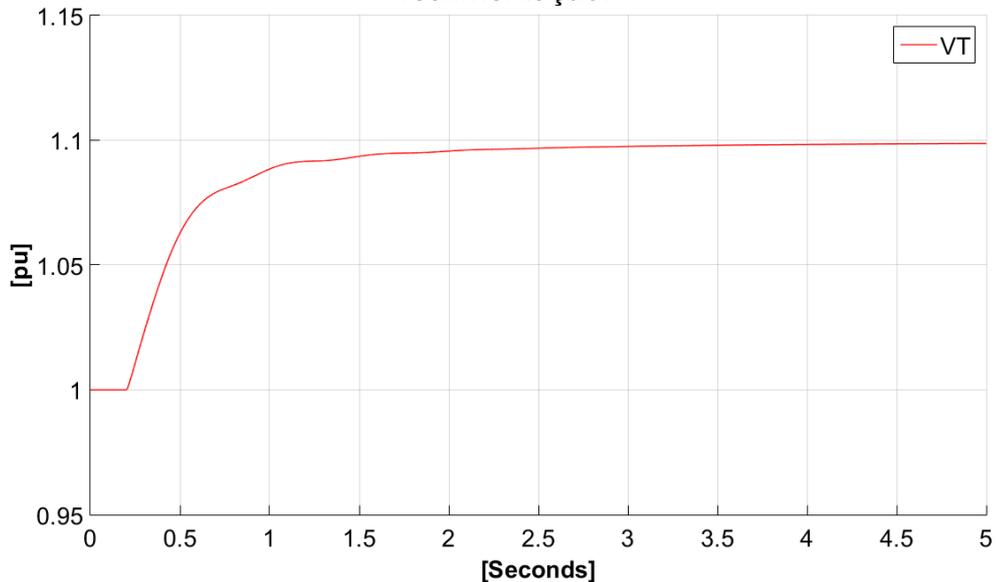
Figura 49 – Tensão da fase A da Tensão Terminal da MS com aplicação na realimentação



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 50 apresenta a magnitude da tensão terminal da MS, que após a injeção do sinal modulante através dos TPs, parte para o seu novo valor em regime dado por $|\vec{V}| + |\vec{v}_{p\ell l}|$, igual a 1,1 pu.

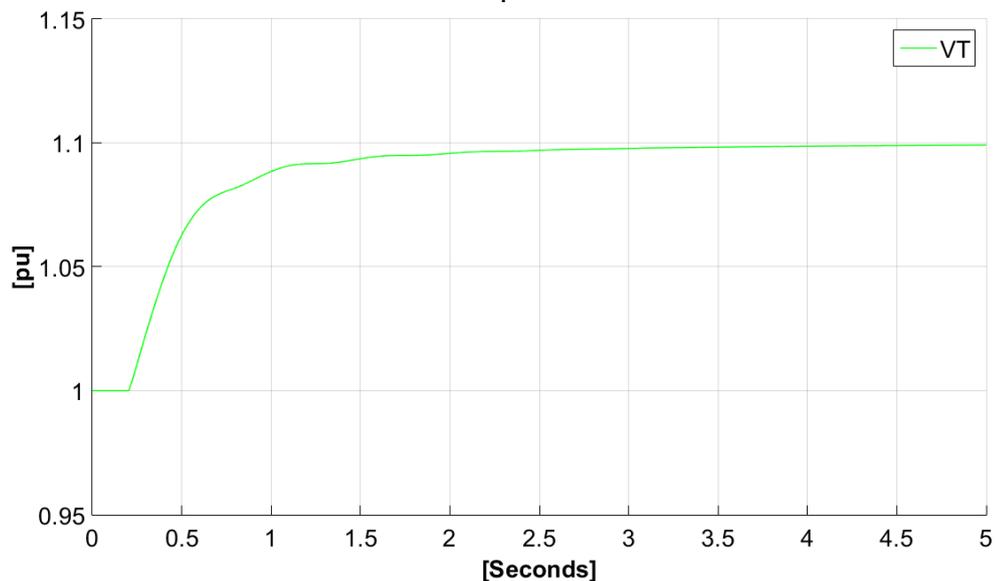
Figura 50 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na realimentação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que as características, em simulação, da regulação de tensão em resposta ao degrau de 0,1 pu através do método proposto, Figura 50, e por meio da forma tradicional, Figura 51, são extremamente semelhantes. De modo que, têm-se propriedades como tempo de subida a 90% de 1,04 s e tempo de acomodação a 2% do valor em regime de 0,66 s para ambos os métodos, por exemplo. Desta forma, notam-se a validade e o funcionamento do procedimento proposto para a injeção de sinais, através do modelo simulado. Aliás, ressalta-se que a aplicação do sinal de Heaviside é de grande utilidade nos ensaios de comissionamento feitos em usinas, como foi explicado neste trabalho, de maneira que a parametrização da malha de controle do regulador, assim como de seus limitadores possa ser realizada de forma satisfatória. Alguns exemplos práticos desse tipo de aplicação é trazido no decorrer deste documento.

Figura 51 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na através de um ponto de soma.



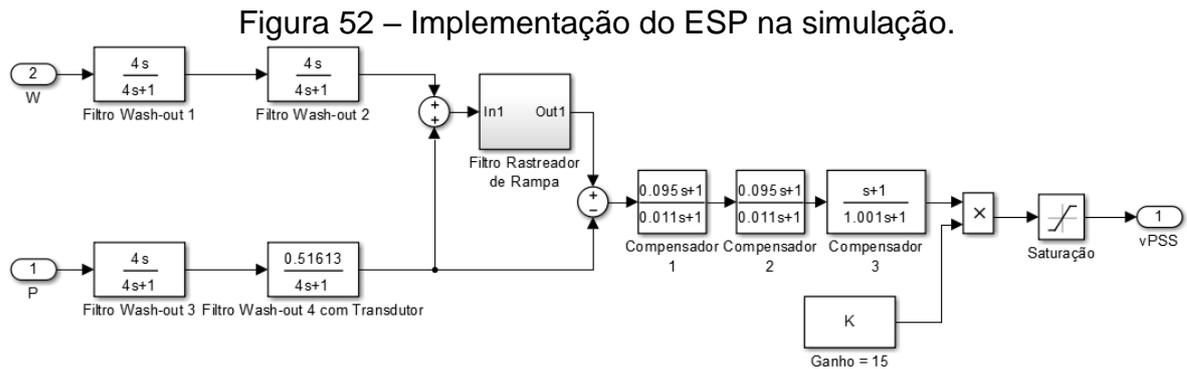
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 INJEÇÃO DE UM SINAL ESTABILIZANTE

Como segundo ensaio simulado, fez-se a injeção de um ESP externo à malha de controle do RT. Assim como discutido previamente, o estabilizador possui extrema relevância na operação da máquina síncrona e no sistema elétrico como um todo.

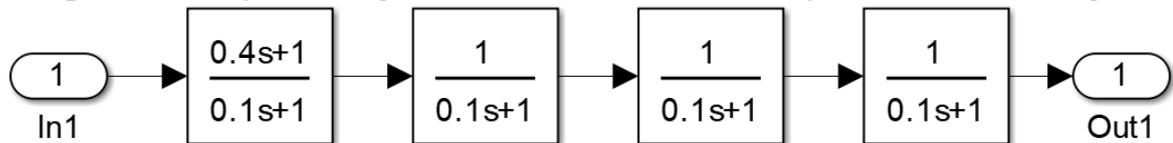
Assim, por meio deste dispositivo, pode-se, entre outras coisas, estender os limites de transferência de potência do SEP.

O modelo de ESP utilizado neste trabalho foi um PSS2C representado, com seus parâmetros, na Figura 52. O seu filtro rastreador de rampa, por sua vez, é apresentada na Figura 53.



Fonte: Elaborada pelo autor.

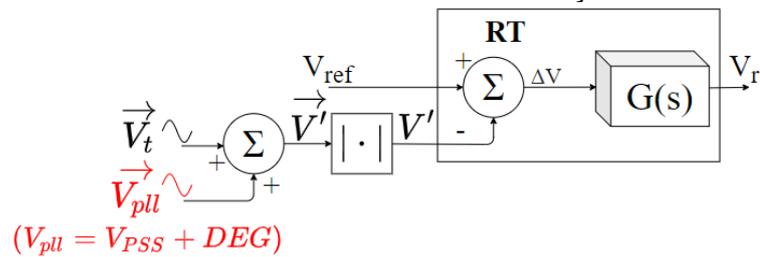
Figura 53 – Implementação do filtro rastreador de rampa usado na simulação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

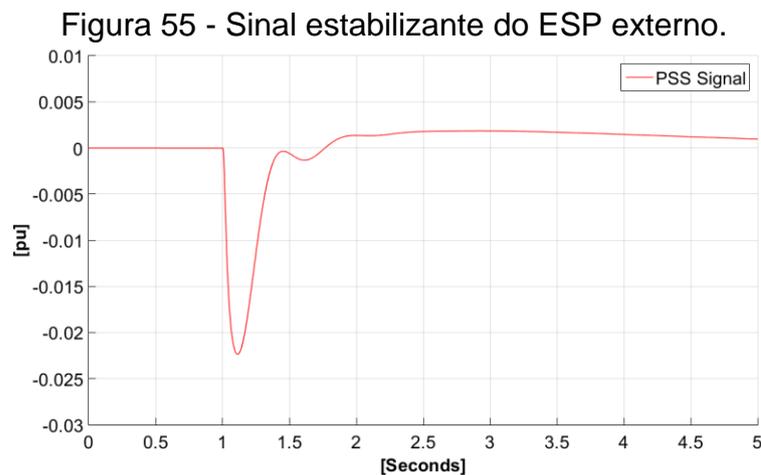
Desta forma, a injeção do sinal estabilizante é equivalente à injeção de um degrau, com a diferença que agora se deve usar o sinal do ESP como amplitude instantânea de $\overline{v_{p\bar{u}}}$. Portanto, simulou-se um PSS2C externo ao regulador e aplicou-se um distúrbio, em forma de degrau de 0,05 pu, na tensão terminal da MS. De forma a realizar esta configuração, simulou-se o esquema apresentado pela Figura 54. Neste, nota-se a estrutura padrão da injeção de sinais explicada neste trabalho, porém agora a magnitude de $\overline{v_{p\bar{u}}}$ nada mais é que a soma do sinal estabilizante e da perturbação degrau, uma vez que esta foi implementada por meio da realimentação também. Aliás, assim foi feito de forma a exemplificar uma possível aplicação prática do método, a qual possibilita a injeção de diversos sinais ao mesmo tempo, de forma a realizar um teste completo no regulador de tensão.

Figura 54 - Sinal de estabilização e degrau injetados na malha de controle do RT por meio do método de realimentação.



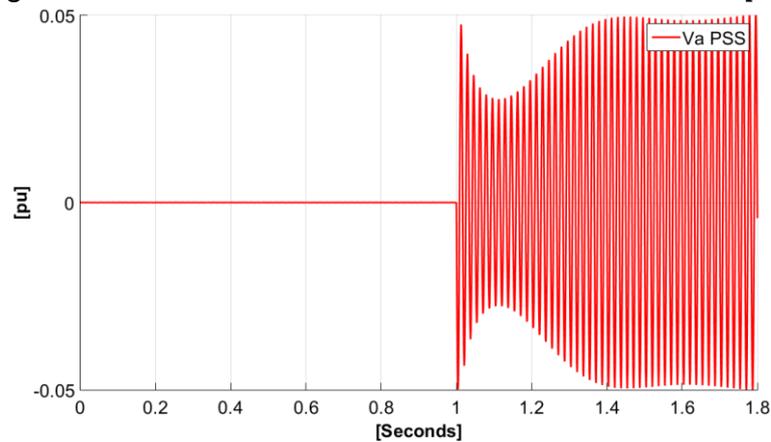
Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, ao injetar o sinal degrau, o ESP, que recebe as medições de potência ativa e velocidade do gerador, gera o sinal estabilizante, tal qual o apresentado pela Figura 55. Este sinal, portanto, é utilizado para modular a amplitude de $\overline{v_{pll}}$, que passa a ter amplitude igual à do degrau somada à do sinal estabilizante oriundo do ESP, como é apresentado na Figura 56. Nota-se, portanto, que a única diferença entre a injeção do sinal degrau, como no exemplo anterior, e a aplicação do sinal estabilizante é a modulação da magnitude do sinal gerado, o qual, anteriormente é dado por uma constante e, no caso do ESP, é definido como o próprio sinal de estabilização.



Fonte: Elaborada pelo autor.

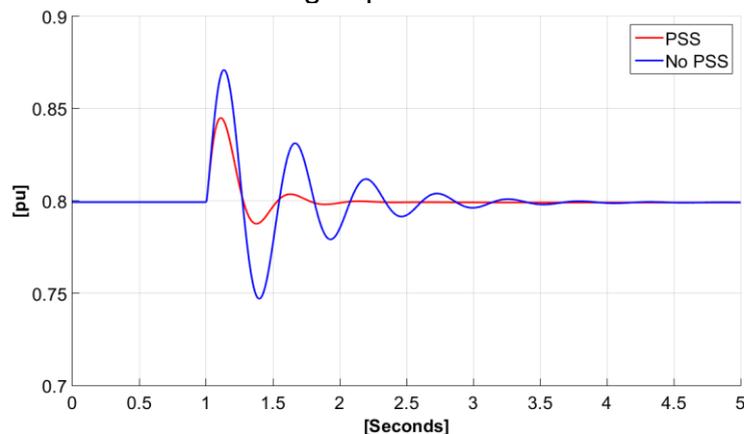
Figura 56 – Tensão da fase A da tensão sintetizada $\overline{V_{pII}}$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalmente, realizando a soma de \vec{V} e $\overline{V_{pII}}$, pode-se aumentar o amortecimento do sistema, o que se traduz, dentre outras formas, na diminuição das oscilações na potência ativa da MS, por exemplo, como pode ser visto através da Figura 57. Nesta, são apresentados os dados do sistema tanto com ESP, em vermelho, quanto sem, em azul. Assim, percebe-se, a partir desta imagem, o aumento considerável do amortecimento das oscilações na máquina, de forma que os valores de pico, partindo desde a primeira oscilação, se tornam muito mais reduzidos. Assim, nota-se o funcionamento do método para a função de estabilizar ou aumentar o amortecimento da MS através de um ESP externo ao aparato local de geração.

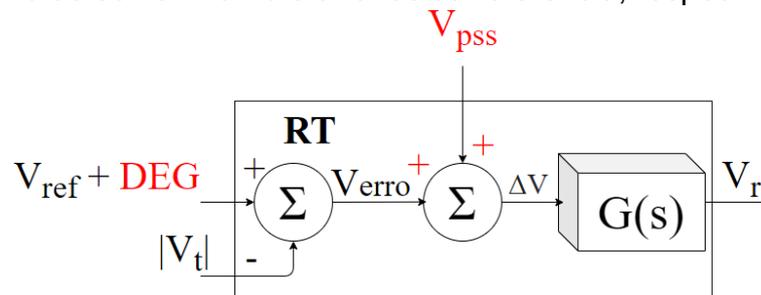
Figura 57 – Potência Ativa entregue pela MS com PSS externo e sem PSS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

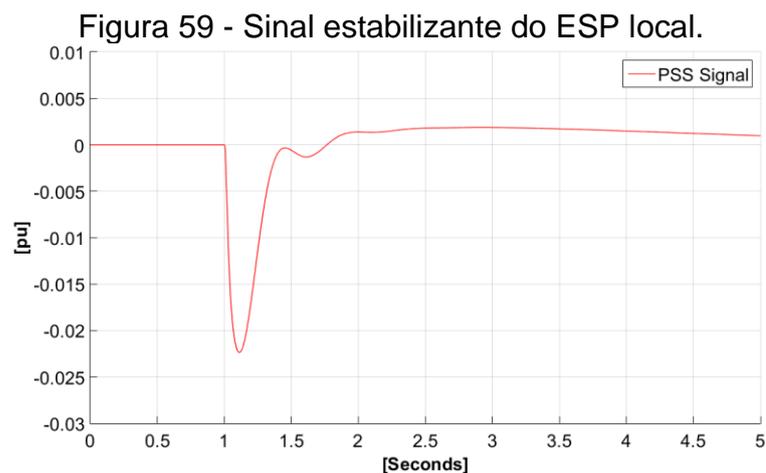
De forma a comparar os resultados obtidos por meio do procedimento propostos com o método tradicional, simulou-se o sistema apresentado pela Figura 58. Desta maneira, aplicou-se uma perturbação por meio da referência de 0,05 pu e inseriu-se um sinal estabilizante através de um ponto de soma interno à malha do regulador de tensão.

Figura 58 - Sinal do ESP e degrau injetados na malha de controle do RT por meio de um ponto de soma interno e através da referência, respectivamente.



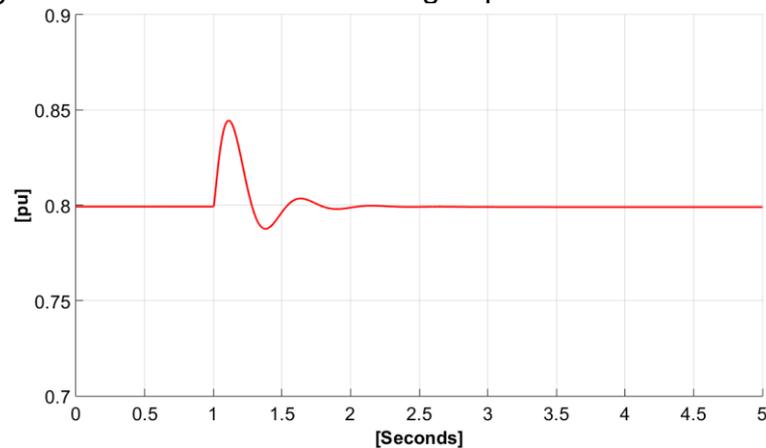
Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, o ESP gerou sinal estabilizante tal qual o apresentado pela Figura 59, o qual proporcionou que o gerador realizasse uma entrega de potência ativa como mostrado através da Figura 60.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Potência Ativa entregue pela MS com PSS local.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, ao comparar as características dinâmicas do sinal de potência estabilizada por meio do ESP local e através do ESP externo, tem-se a Tabela 4. Por meio desta, nota-se que, em simulação, não há diferenças dinâmicas na potência gerada a partir dos dois métodos.

Tabela 4 – Características dinâmicas do sinal de potência estabilizada.

Limitador	Símbolo	ESP local	ESP externo
Sobressinal [pu]	ϵ_p	0,044	0,044
Tempo de acomodação a 2% [s]	t_ϵ	0,228	0,228

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 SIMULAÇÃO COM HARMÔNICOS

Nota-se que a demanda crescente por energia elétrica imposta ao SEP faz com que seja necessária a inserção de novas tecnologias na geração, transmissão e distribuição de energia. Desta maneira, cada vez mais, tem-se visto um acréscimo no uso de cargas e equipamentos não-lineares, os quais inserem distorções harmônicas na tensão e/ou corrente do sistema (GARCIA). Assim, equipamentos que utilizam pontes de conversão CA-CC baseadas em tiristores, como sistemas de excitação de

geradores síncronos ou conversores de tensão da MS para sistemas HVDC, acabam por inserir distorção harmônica no sistema.

Nota-se que a existência de componentes harmônicas para o sistema e, sobretudo, para a máquina síncrona é indesejável, pois acaba por gerar perdas ôhmicas no cobre e no ferro, má operação dos equipamentos, exigência por dispositivos de proteção mais robustos, além de afetar a eficiência, o torque disponível e amplificar os ruídos sonoros produzidos pela operação do gerador e dos outros equipamentos da rede (POMILIO, 1998).

Portanto, visto que muitas vezes a tensão terminal de geradores síncronos pode estar sofrendo a atuação de componentes harmônicas, resolveu-se simular o método atuando em um sistema sob essa condição.

O sistema com distorções a ser simulado é baseado em um caso real que se faz presente em uma usina hidrelétrica canadense a qual se conecta ao sistema de transmissão por meio de conversores CA-CC para um HVDC bipolar (SATO, 2013). Os dados foram obtidos pelo autor deste trabalho, o qual participou de análises da planta geradora enquanto estagiário da empresa Reivax S/A. Neste contexto, a usina apresenta uma quantidade significativa de componentes harmônicas atuando sobre os terminais do gerador. Desta forma, um dos cenários junto ao qual o RT deve ser capaz de se manter em atuação é aquele provido pela composição harmônica na tensão terminal apresentada pela Tabela 5. Nesta conjuntura, tem-se que a Distorção Harmônica Total (THD) do sistema é de 5,5%. Nota-se, aliás, que este valor de THD é deveras alto e não ocorre comumente nos terminais de UGs. Contudo, percebe-se que a possibilidade de ocorrência deste cenário não é nula, sobretudo, quando se percebe que para o bom funcionamento do *link* DC, filtros contra harmônicos são utilizados, os quais podem vir a apresentar um mau funcionamento. Desta forma, mesmo com este imprevisto, o sistema não pode vir a parar de funcionar ou de desempenhar suas funções de regulação, controle e geração.

Tabela 5 – Composição harmônica na tensão terminal do gerador.

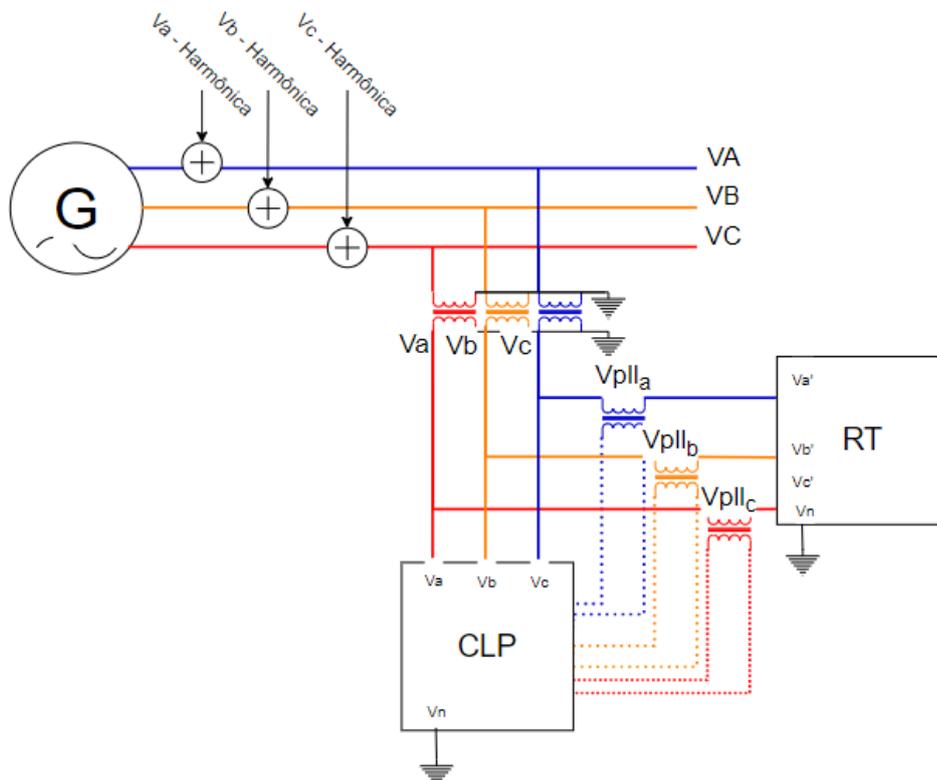
Componente	Tensão Terminal (pu)
Fundamental	1,000
3°	0,015
11°	0,040

13°	0,030
23°	0,010
25°	0,010
27°	0,005
29°	0,005
31°	0,005
33°	0,005
35°	0,005
37°	0,005

Fonte: Elaborada pelo autor.

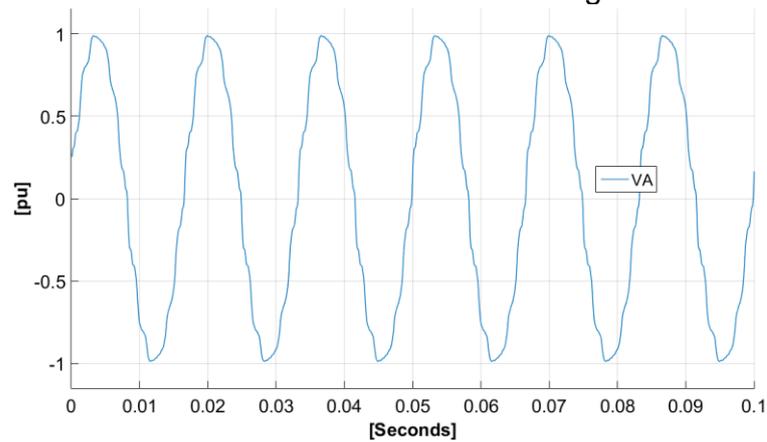
Desta forma, aplicaram-se estas distorções no sistema simulado utilizado até então por meio da soma das componentes harmônicas, dadas pela Tabela 5, às tensões terminais do gerador, tal como é apresentado na Figura 61. Assim, tem-se a fase A da tensão terminal tal qual a trazida pela Figura 62.

Figura 61 – Estrutura de inserção de harmônicas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

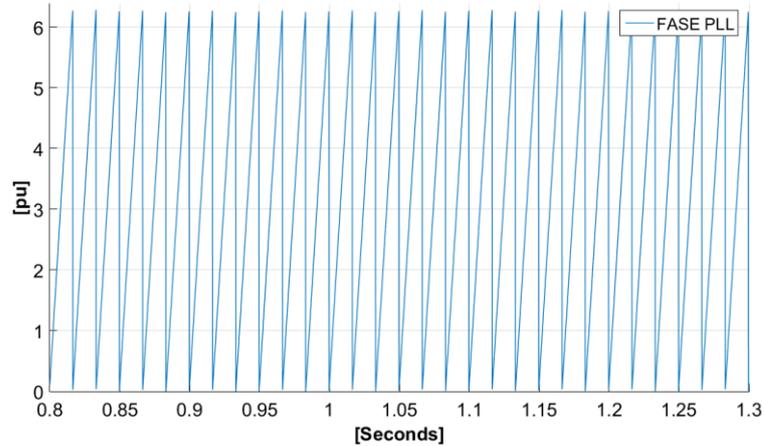
Figura 62 – Tensão da fase A da tensão terminal do gerador com harmônicas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

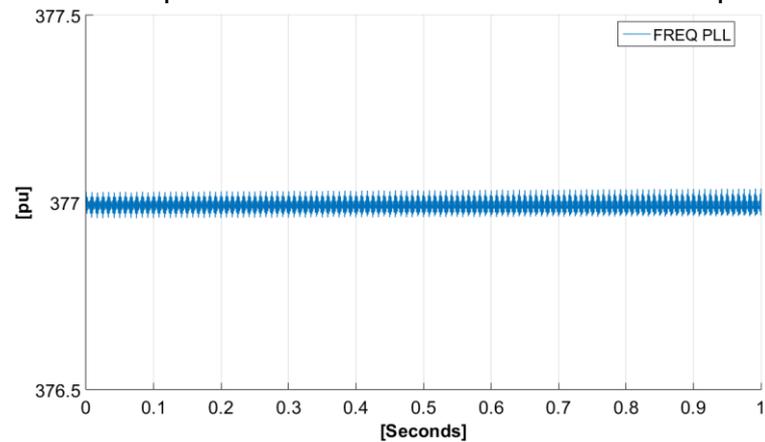
Desta forma, a malha de captura de fase foi capaz de rastrear a fase e a frequência instantâneas, como é apresentado nas Figura 63 e Figura 64, respectivamente. Nota-se que a distorção faz com que a frequência rastreada oscile em torno da frequência nominal. Contudo, ainda assim, nota-se que o sistema é capaz de gerar sinais senoidais \vec{v}_{pll} sincronizados a \vec{V} , como é apresentado na Figura 65.

Figura 63 – Fase instantânea terminal rastreada pela PLL.



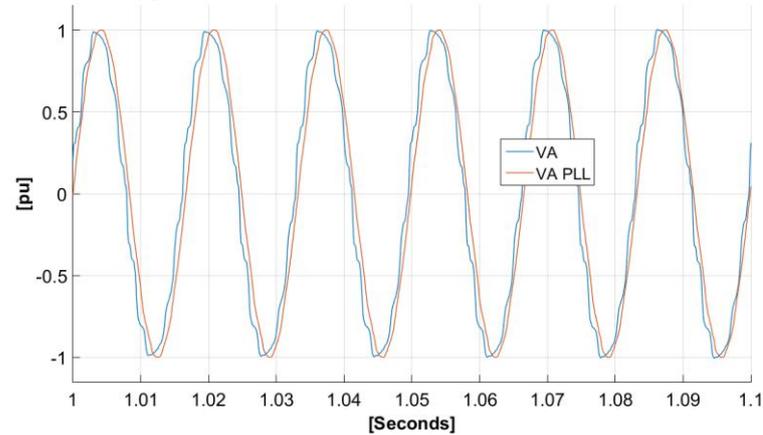
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 64 – Frequência instantânea terminal rastreada pela PLL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

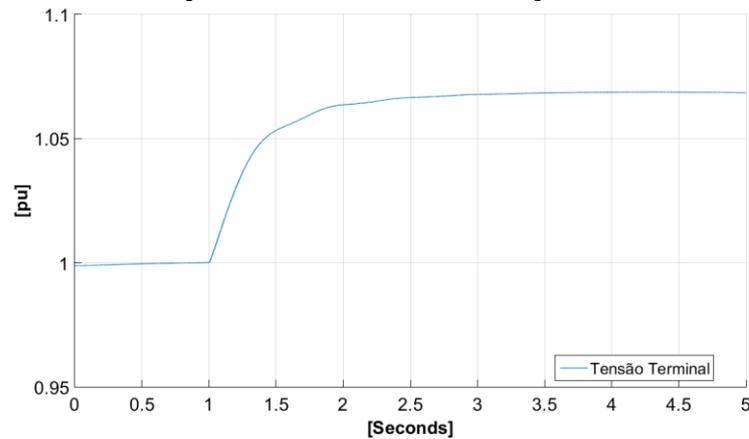
Figura 65 – Tensão de \vec{v}_{pll} e de \vec{V} sincronizadas entre si sob distorção harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta maneira, uma vez que a malha de captura de fase consegue rastrear a fase da tensão terminal e, assim, gerar sinais trifásicos sincronizados, o método funciona, sendo assim, possível injetar os sinais externamente, sem problema algum. Assim, inserindo um degrau de 0,1 pu no RT pela realimentação, tem-se um acréscimo na tensão terminal com esta mesma magnitude, como é apresentado pela Figura 66.

Figura 66 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na realimentação sob efeitos de distorção harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, como discutido anteriormente, uma vez que se tem um conjunto $\overline{V_{pl}}$ sincronizado a \overline{V} , pode-se modular a sua amplitude da forma que quiser, sem que haja prejuízo na injeção do sinal externo. Portanto, uma vez que tenha sido mostrada a validade do método para este cenário harmônico por meio da resposta ao degrau, pode-se realizar uma extrapolação e assumir o funcionamento do método para a inserção de um sinal estabilizante externo, ou até mesmo, para um ensaio de resposta em frequência.

Resolveu-se fazer mais um teste de desempenho do método proposto em um cenário de distorção harmônica. Neste caso usou-se um quadro de composição harmônica caracterizado pela THD de 13,22%, detalhada a partir da Tabela 6.

Tabela 6 – Composição harmônica na tensão terminal do gerador para um caso mais extremo.

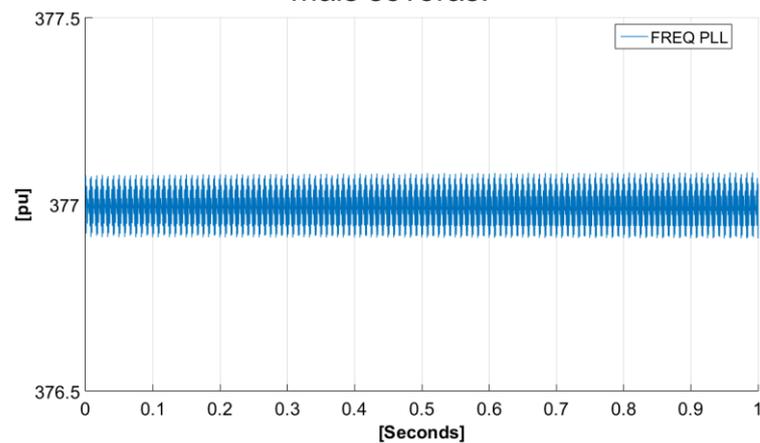
Componente	Tensão Terminal (pu)
Fundamental	1,000
3°	0,005
11°	0,084
13°	0,084
23°	0,040
25°	0,040

27°	0,005
29°	0,005
31°	0,005
33°	0,005
35°	0,005
37°	0,005

Fonte: Elaborada pelo autor.

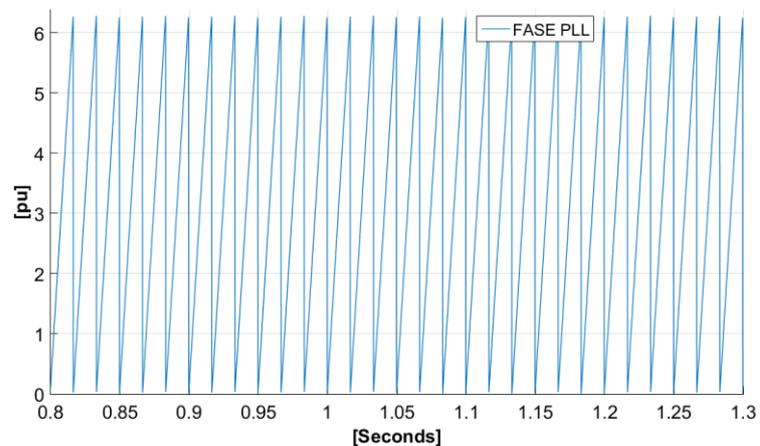
Neste quadro, passa-se a ter mais oscilação na frequência rastreada, como é visto através da Figura 67, e as variações na fase passam a ser mais visíveis, como um olhar mais atento pode perceber por meio da Figura 68.

Figura 67 – Frequência instantânea terminal rastreada pela PLL sob harmônicas mais severas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

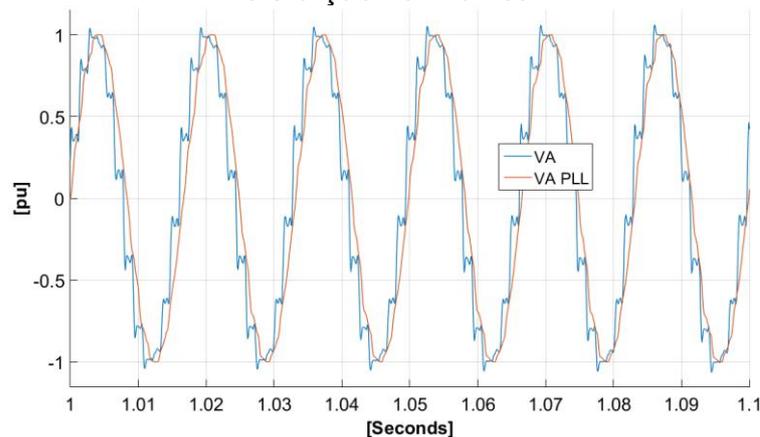
Figura 68 – Fase instantânea terminal rastreada pela PLL sob harmônicas mais severas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se, porém, que a PLL ainda é capaz de sincronizar $\overline{v_{pll}}$ a \vec{V} , como se vê na Figura 69. Percebe-se, contudo, que o sinal de $\overline{v_{pll}}$ se encontra mais distorcido do que aquele trazido no cenário anterior.

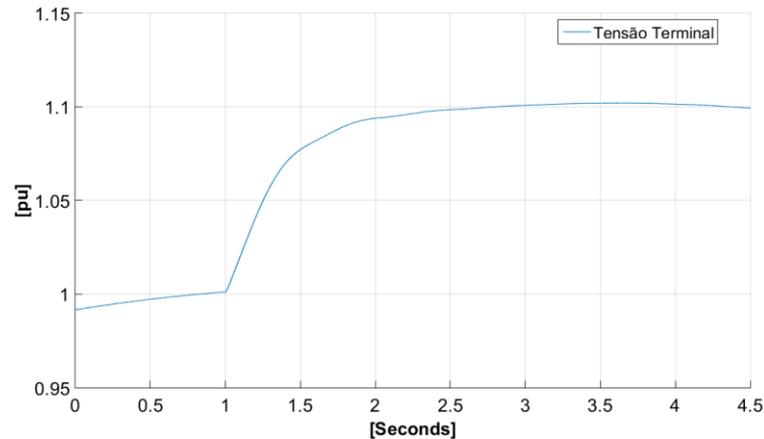
Figura 69 – Tensão da fase A de $\overline{v_{pll}}$ e de \vec{V} sincronizadas entre si sob severa distorção harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

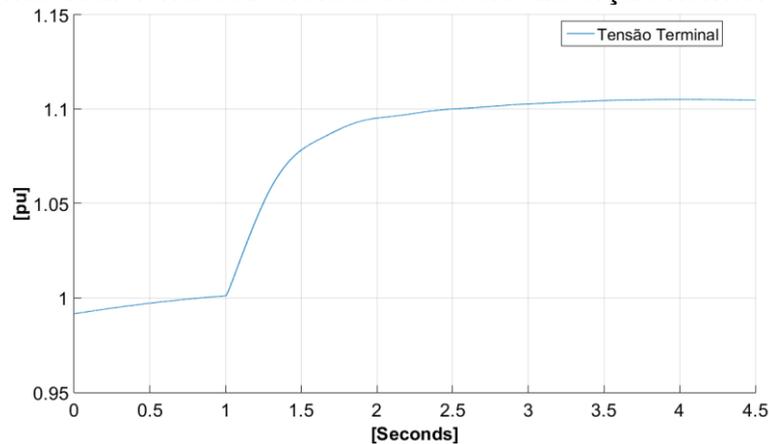
Assim, faz-se a injeção do sinal de degrau de 0,10 pu, tendo, desta forma, o resultado presente na Figura 70. Por meio desta, vê-se que tal composição harmônica passa a degradar o desempenho da técnica que passa a ficar um pouco mais lenta quando comparada ao cenário de harmônicas mais moderadas, Figura 66. Além disso, injetou-se essa mesma composição harmônica em um sistema simulado onde a injeção do degrau é feita de forma tradicional, isto é, pela referência de tensão do RT. Desta maneira, obteve-se o resultado apresentado na Figura 71. Assim, pode-se perceber que a diferença entre ambos os registros é bem pequena, contudo, para um olhar mais atento, notam-se pequenas diferenças, sobretudo, no alcance do valor de regime permanente.

Figura 70 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na realimentação sob efeitos de severa distorção harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 71 – Magnitude da Tensão Terminal da MS com aplicação do degrau na forma tradicional sob efeitos de severa distorção harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Fizeram-se testes para composições harmônicas mais altas e, notou-se que, à medida que se insere mais distorção a malha de captura de fase passa-se a ter mais dificuldade de rastrear a frequência e a fase da componente fundamental. Desta forma, o sinal $\overline{v_{pl}}$ passa a se afastar de um sinal senoidal puro. Contudo, percebeu-se que ao ajustar o controlador da malha de captura de fase, passa-se a estabilizar, novamente, a malha do rastreador. Nos exemplos, usou-se apenas um ganho proporcional baixo de 0,25. Todavia, para casos mais ruidosos e/ou distorcidos pode-se vir a adicionar um integrador, além de ajustar o ganho proporcional.

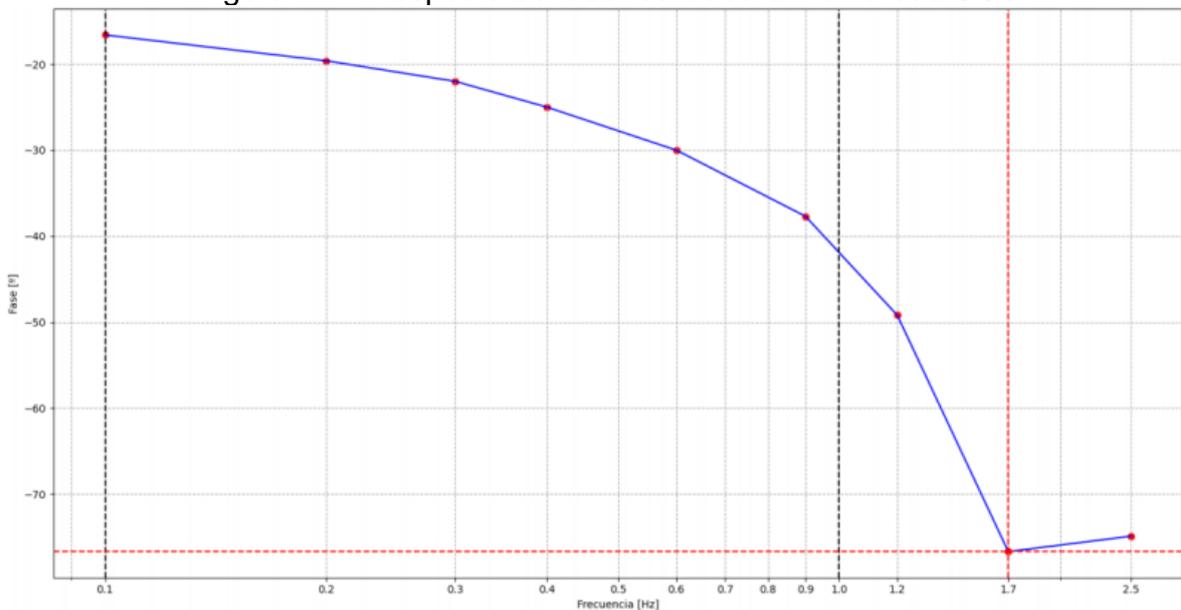
5 TESTES DE CAMPO

No início de 2021, a empresa Reivax fez ensaios de modelagem de três unidades geradoras hidrelétricas no Peru. Nesta ida à campo, foram feitos testes de forma a parametrizar e/ou verificar o desempenho de alguns de seus componentes, como o gerador síncrono, o regulador de tensão e seus componentes, como os limitadores, usando a resposta ao degrau, que foi feita pela estrutura de injeção tema deste trabalho. Ademais, utilizou-se o método proposto de injeção de sinais pela realimentação para inserir um sinal estabilizante a partir de um ESP externo, o qual foi parametrizado por meio do ensaio de resposta em frequência do sistema GEP utilizando esta mesma ferramenta proposta.

Este capítulo tem como intuito, portanto, trazer alguns registros de campo, assim como realizar uma breve discussão dos resultados quando pertinente.

Desta forma, foi feito, em todas as unidades, o ensaio de resposta em frequência, o qual gerou resultados satisfatórios o suficiente para ajustar o ESP externo. A Figura 72 traz a imagem da resposta de fase realizada em uma das UGs.

Figura 72 – Resposta de fase realizada em uma das UGs.



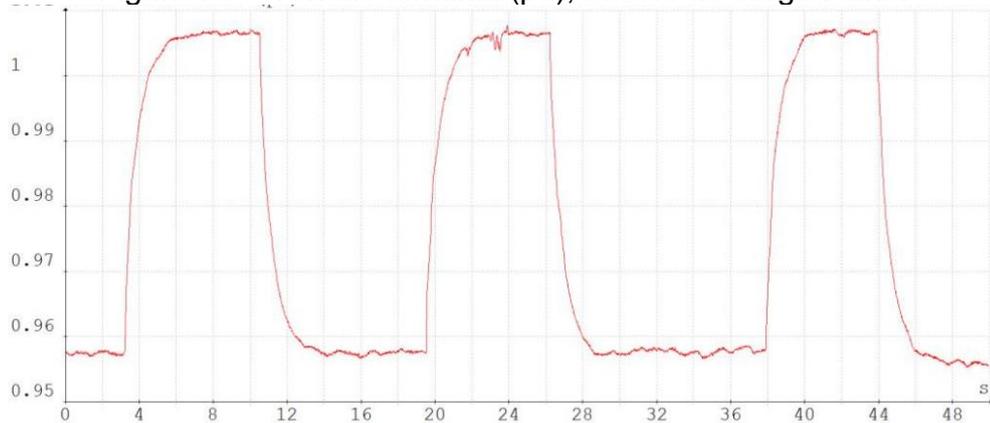
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Assim, com o ESP externo ajustado, injetou-se o seu sinal estabilizante pela realimentação. Este teste foi feito com o intuito de verificar o desempenho do ESP local por meio de comparação. Ademais, foram realizados testes de resposta ao degrau com o ESP para três condições de potência ativa, isto é, 0,62 pu (carga baixa), 0,68 pu (carga média) e 0,77 pu (carga alta). Assim, as figuras de 73 a 87 trazem os registros destes ensaios. Em cada imagem há três respostas ao degrau, sendo elas: sem ESP, com o ESP local e como o ESP externo. Embora tenham sido realizados todos estes ensaios em três unidades geradoras, acredita-se que ao mostrar apenas um caso, possa-se vislumbrar a validade do método.

A partir destas figuras é possível notar que o RT externo traz resultados melhores do que o local, o qual, em certas ocasiões degrada o sistema de amortecimento, deixando a dinâmica pior. Pode-se notar tal característica ao examinar os registros de tensão de excitação, figuras 74, 79 e 84. Vê-se que os registros que compreendem a atuação do ESP local apresentam sobressinais bastante elevados, além de injetarem fortes oscilações no sistema, características que não são vistas no sistema sem estabilizador ou com estabilizador externo. Nos dados de potência ativa, figuras 76, 81 e 86, nota-se que ESP local piora as características naturais da unidade

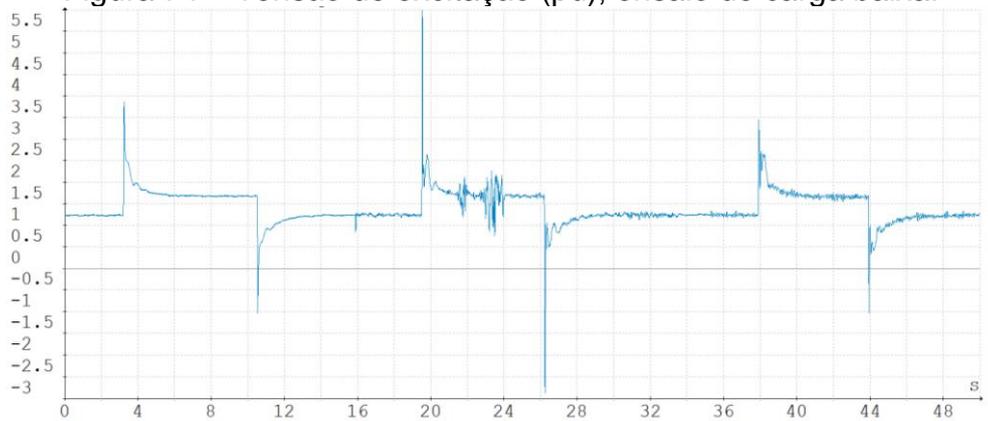
geradora, isto é, embora haja uma diminuição das oscilações, há um aumento do sobressinal, pontos que não são presentes ao se fazer o uso de estabilização externa. O ESP local insere, também, novas oscilações na potência reativa e corrente de excitação, como se vê nas Figuras 75, 77, 80, 82, 85 e 87.

Figura 73 – Tensão terminal (pu), ensaio de carga baixa.



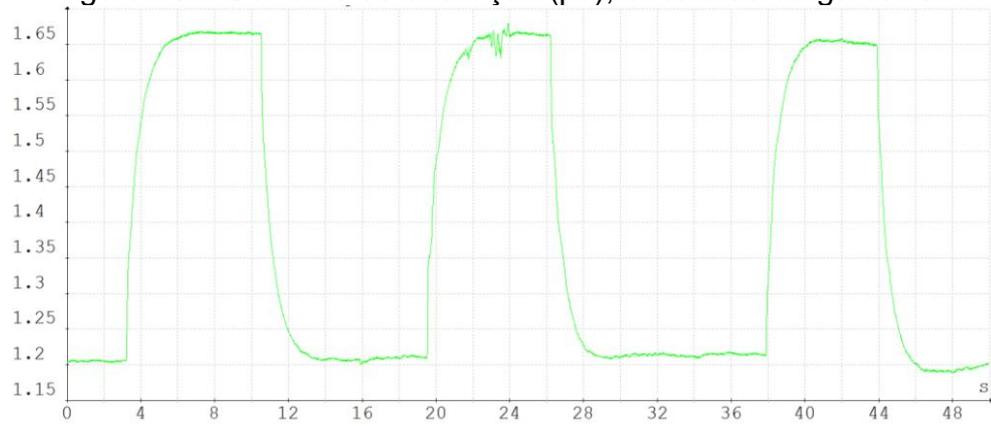
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 74 – Tensão de excitação (pu), ensaio de carga baixa.



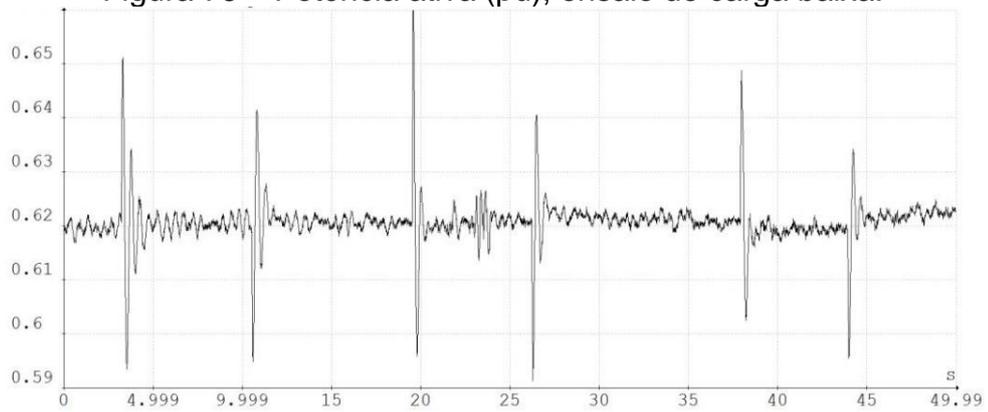
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 75 – Corrente de excitação (pu), ensaio de carga baixa.



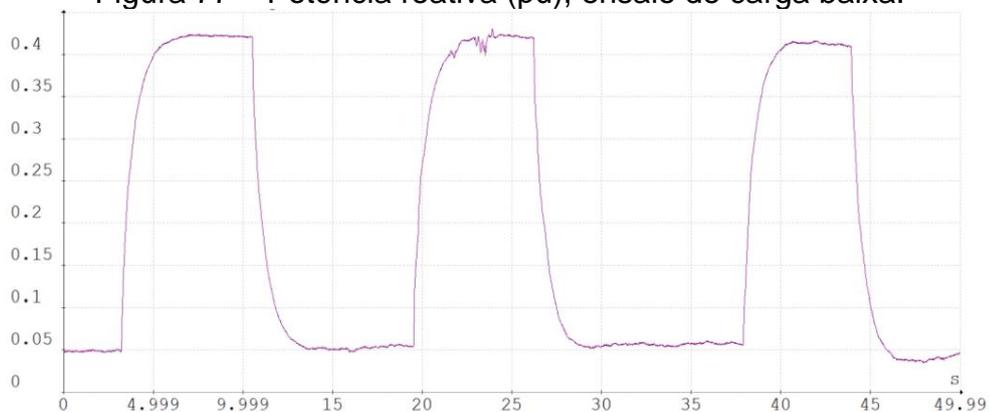
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 76 – Potência ativa (pu), ensaio de carga baixa.



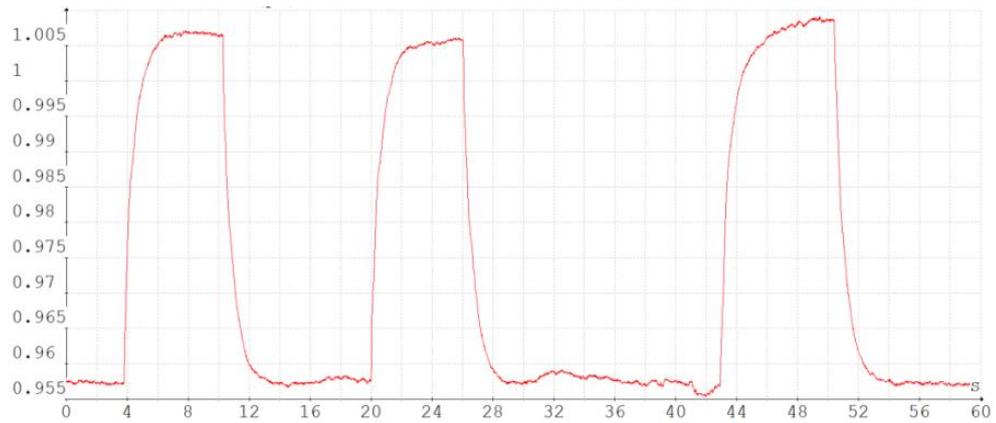
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 77 – Potência reativa (pu), ensaio de carga baixa.



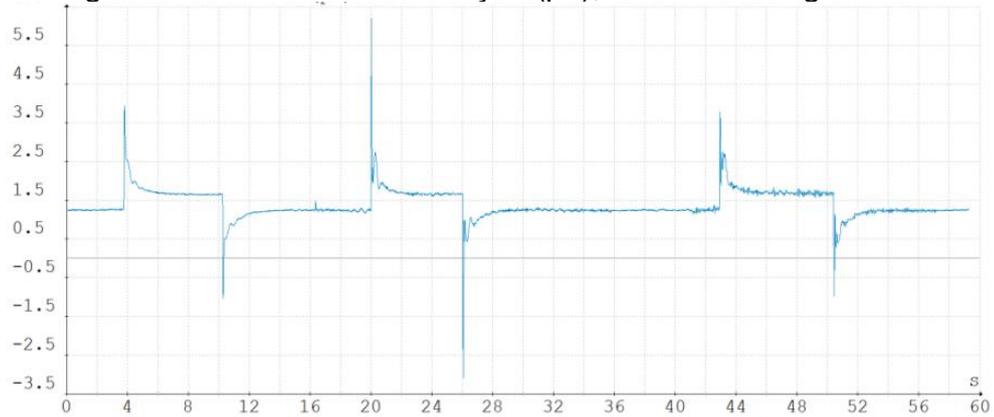
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 78 – Tensão terminal (pu), ensaio de carga média.



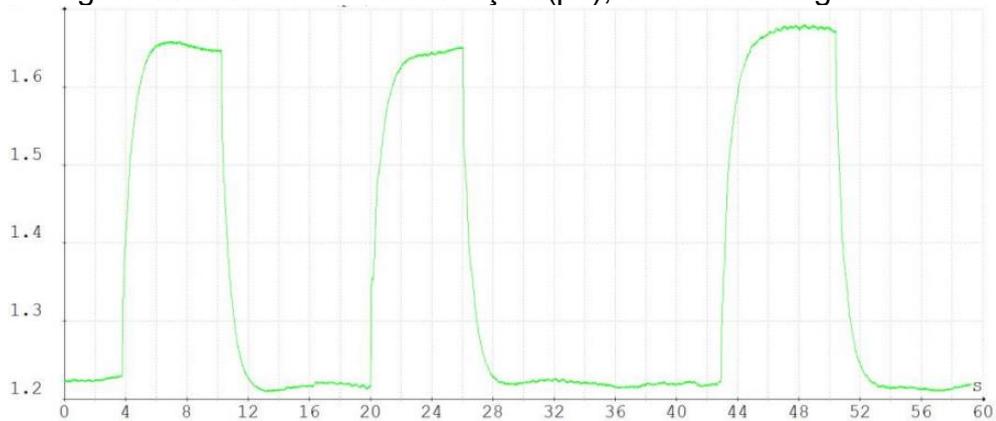
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 79 – Tensão de excitação (pu), ensaio de carga média.



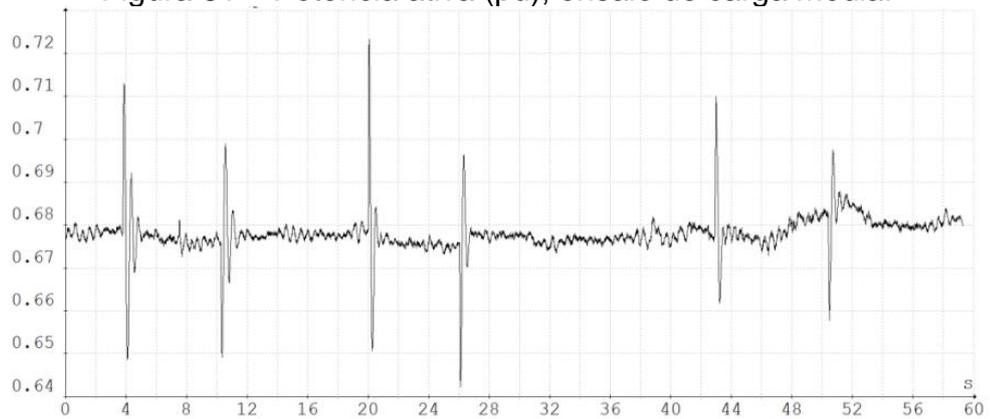
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 80 – Corrente de excitação (pu), ensaio de carga média.



Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 81 – Potência ativa (pu), ensaio de carga média.



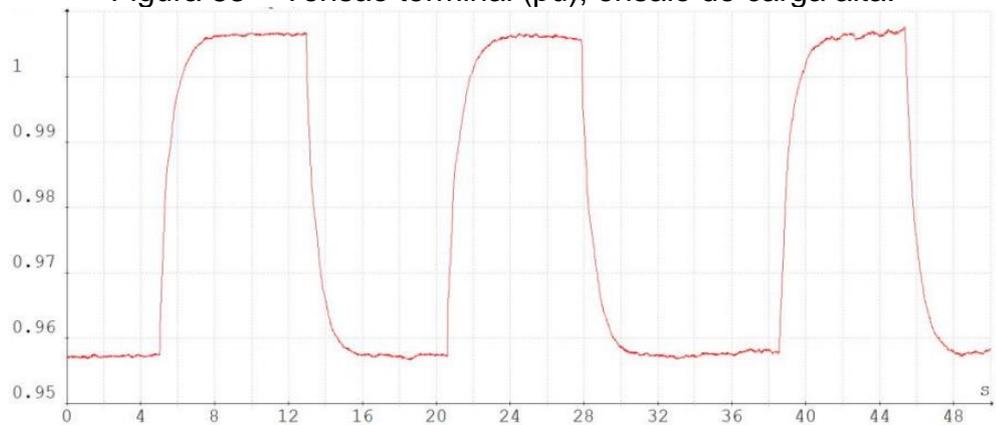
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 82 – Potência reativa (pu), ensaio de carga média.



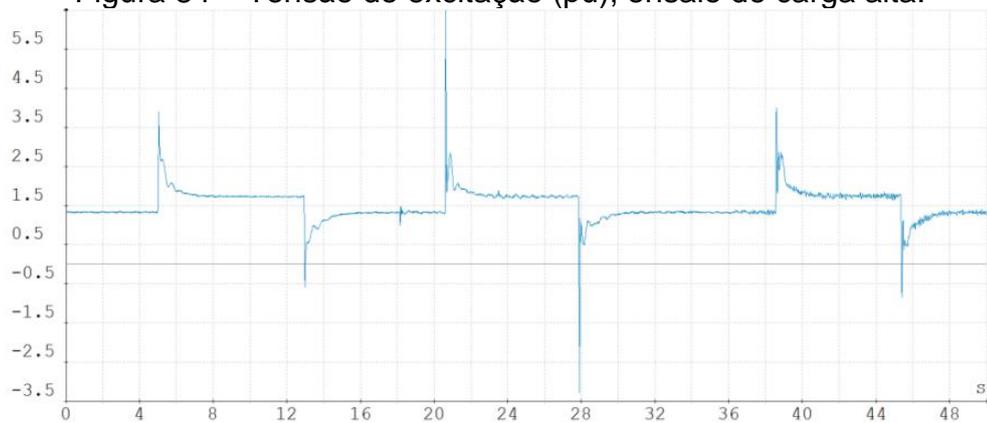
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 83 – Tensão terminal (pu), ensaio de carga alta.



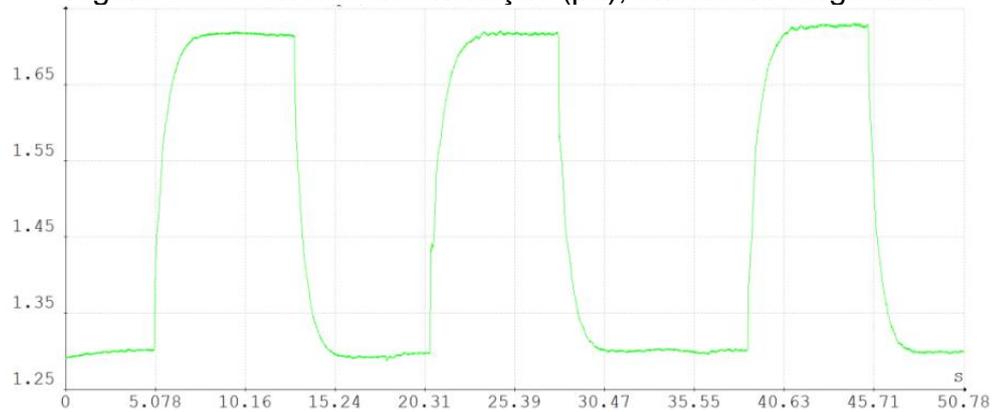
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 84 – Tensão de excitação (pu), ensaio de carga alta.



Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 85 – Corrente de excitação (pu), ensaio de carga alta.



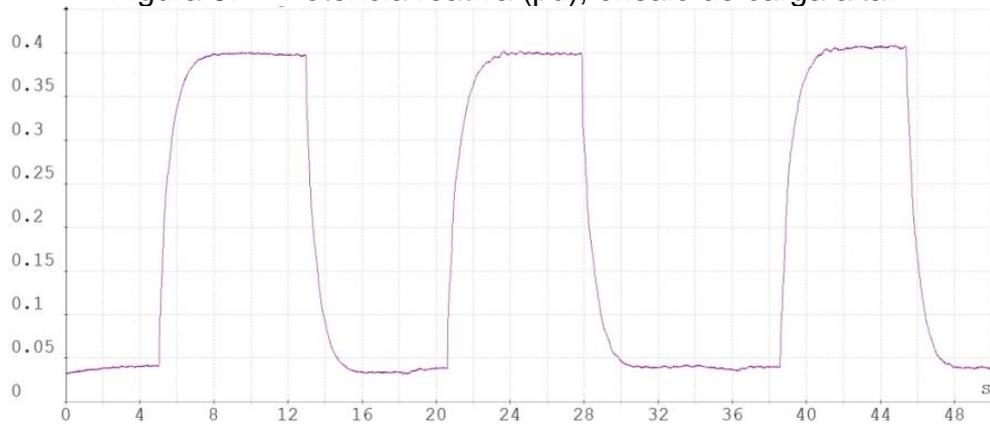
Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 86 – Potência ativa (pu), ensaio de carga alta.



Fonte: Reivax Automação e Controle.

Figura 87 – Potência reativa (pu), ensaio de carga alta.



Fonte: Reivax Automação e Controle.

Desta forma, mostra-se o funcionamento do método em um caso real e prático em uma grande usina hidrelétrica peruana. Aliás, percebe-se que este foi utilizado de diversas formas, isto é, foi usado para realizar a resposta em frequência do sistema GEP para, assim, ajustar o estabilizador. Além disso, uma vez tendo o ESP externo parametrizado, seu sinal foi injetado extrinsecamente à malha, somado a um sinal degrau, que possibilitou a perturbação do sistema. Aliado a tudo isso, pode-se realizar a tarefa desejada que consistia na verificação do desempenho do ESP local e, percebeu-se que este estava piorando as grandezas do sistema de geração, ao invés de melhorar sua dinâmica. Tal característica é perceptível nos registros de potência ativa e tensão de excitação, por exemplo. Assim, percebeu-se também que o ESP externo, além de funcionar, isto é, ajudar na estabilização da UG, obteve resultados melhores do que o próprio ESP local.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi trazida a apresentação de um método inédito de injeção de sinal em reguladores de tensão atuando em unidades geradoras baseadas no uso de máquina síncrona. Desta forma, o método foi contextualizado e estudado, além de ter sido desempenhado o esclarecimento de seu funcionamento através de discussões, representações gráficas e de ilustrações analítico-matemáticas. Foram trazidos, também, dados de simulação e de campo, onde se estressou o método de forma a validar o seu funcionamento.

Neste contexto, implementou-se a estrutura atuando sob a existência de distorção harmônica na tensão terminal do gerador, a partir de dados reais de uma usina canadense. Nesta conjuntura, mostrou-se, através de simulação, que sob níveis de distorção mais comedidos, o método consegue atuar sem problemas. Contudo, ao incrementar a distorção harmônica total atuante sobre os terminais do gerador, um ajuste mais cuidadoso deve ser feito nos parâmetros do controlador da malha de captura de fase.

Os dados de campo feitos em usinas peruanas no início de 2021 mostram a validade do método no uso em aplicações reais. Isto é, torna-se evidente o valor que a ferramenta proposta tem para o comissionador e para unidade geradora como um todo, ao apresentar seu uso no desenrolar de ensaios de comissionamento e de análise de desempenho dos equipamentos. Ademais, mostrou-se a performance do método ao aplicá-lo na realização da injeção de um sinal de um ESP externo capaz de estabilizar o gerador. Neste cenário, mostrou-se que ESP externo obteve resultados superiores àqueles gerados pelo sistema local de estabilização.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Algumas propostas para trabalhos futuros são:

- Incrementar a simulação do sistema levando em consideração a dinâmica dos transformadores de potencial;
- Estudar o método sob efeito de componentes oscilatórias sustentadas, tomando como base fontes de oscilação forçadas que ocorrem no sistema elétrico, devido a cargas oscilatórias e máquinas a diesel, por exemplo;
- Estudar a dinâmica do PLL em questão;

- Estudar o uso do método em dispositivos FACTS que possuem, também, reguladores de tensão.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, S. M. E. S. **Comparative Study of The Excitation System, AVR and PSS Models for Synchronous Generators Under the Phase to Ground Fault**. Near East University. Nicosia: 2015.

ALMEIDA, A. T. L. **Máquinas Síncronas**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá: 2000.

ARRUDA, L. N.; SILVA, S. M.; FILHO, B. J. C. **PLL Structures for Utility Connected Systems**. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting. [S.l.]: [s.n.], 2001. p. 2655-2660.

BOLDEA, I. **Synchronous Generators**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.

BURKE, P. J. **Income, resources, and electricity mix**. *Energy Economics*, Canberra, v. 32, p. 616–626, Fevereiro 2010.

CASTRO, N. J. D.; NETO, P. B.; DANTAS, G. D. A. **Expansão do Sistema Elétrico Brasileiro e o Potencial Hidroelétrico da Região Amazônica**. Grupo de Estudos do Setor Elétrico UFRJ. Rio de Janeiro: 2012.

COELHO, A. L. M.; SILVEIRA, P. M.; BARACHO, F. R. A. C. **A Test-Bed for Protection Studies of Synchronous Generators and its Interaction with the Underexcitation and Overexcitation Limiters**. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), p. 1-12, 2018.

COSTA, A. S.; SILVA, A. S. **Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

ELETROBRÁS. **NAI-ELETROBRÁS/GT-S - Nacionalização de Sistemas de Excitação Estática**. [S.l.]: [s.n.], 1984.

FORTESCUE, C. L. **Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 37, p. 1027-1140, Julho 1918.

GARCIA, F. R. **Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. IESA S/A. [S.l.].

GURRALA, G.; SEN, I. **Power System Stabilizers Design for Inteconnected Power Systems**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, v. 25, p. 1042-1051, Maio 2010.

HADJIDEMETRIOU, L.; KYRIAKIDES, E.; BLAABJERG, F. **A New Hybrid PLL for Interconnecting Renewable Energy Systems to the Grid**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, v. 6, p. 2709-2719, Novembro/Dezembro 2013.

HOMAEE, O.; JADID, S. **Investigation of synchronous generator in reactive power market - An accurate view**. IET Generation Transmission & Distribution, p. 1881-1890, 2014.

HOOSHYAR, H.; SAVAGHEBI, M.; VAHEDI, A. **Synchronous Generator: Past, Present and Future**. Africon. Windhoek, África do Sul: IEEE. 12 Dezembro 2007.

HUANG, L. et al. **Grid-Synchronization Stability Analysis and Loop**. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, v. 11, p. 501-516, Janeiro 2020.

HUNT, J. P. **Capability Curves and Excitation Requirements of Saturated Cylindrical Rotor Synchronous Machines**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-86, p. 855-859, Julho 1967.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Tutorial Course Power System Stabilizing via Excitation Control**. [S.l.], 2009.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Guide for the Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems**. Cidade de Nova York: IEEE, 2014.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies**. IEEE Power and Energy Society. [S.l.], 2016.

IGBINOVIA, F. O. et al. **Reputation of the Synchronous Condenser Technology in Modern Power Grid**. Guangzhou, China: 2018 International Conference on Power System Technology, IEEE. 2018. p. 2108-2115.

JUNIOR, L. M.; KOMATSU, W.; MARTINZ, F. O. **Positive Sequence Tracking Phase Locked Loops A Unified Graphical Explanation**. The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 1273-1280.

JUNIOR, N. Z. **RTVX Power Manual de Teste e Comissionamento**. Reivax Controle e Automação. Florianópolis: 2009.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc, 1994.

LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. **Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-100, No. 6, p. 3017-3024, Junho 1981.

LICCARDO, F.; MARINO, P.; RAIMONDO, G. **Robust and Fast Three-Phase PLL Tracking System**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, v. 58, p. 221-231, Janeiro 2011.

MACHOWSKI, J.; BIALEK, J. W.; BUMBY, J. R. **Power System Dynamics: Stability and Control**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd., 2008.

MOTA, D. D. S. **Técnicas de Ajuste de Estabilizador de Sistemas de Potência**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

MURDOCH, A. et al. **Practical Application Considerations for Power System Stabilizer (PSS) Controls**. Edmonton, AB, Canada: 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE. 1999. p. 83-87.

MURDOCH, D. A. et al. **Integral of Accelerating Power Type PSS Part 1 - Theory, Design, and Tuning Methodology**. IEEE Transactions on Energy Conversion, p. 1658-1663, Dezembro 1999.

NETO, C. M. D. S. **Estabilizador de Sistema de Potência para Máquinas Síncronas de Polos Salientes Utilizando a Transformada de Wavelet**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica. Operador Nacional do Sistema Elétrico**. [S.l.], 2009.

PÁDUA, M. S.; DECKMANN, S. M.; MARAFÃO, F. P. **Frequency-adjustable positive sequence detector for power conditioning applications**. PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. [S.l.]: [s.n.], 2005. p. 1928-1934.

POMILIO, J. A. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP, 1998. Disponível em: <<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html#:~:text=O%20maior%20efeito%20dos%20harm%C3%B4nicos,quando%20comparado%20com%20alimenta%C3%A7%C3%A3o%20senoidal.>>>. Acesso em: 05 Abril 2021.

ROGERS, G. **Power System Oscillations**. [S.l.]: Springer Science+Business Media, LLC , 2000.

SATO, A. K. C. **Transmissão de Potência em Corrente Contínua e Corrente Alternada: Estudo Comparativo**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2013.

SAUER, P. W.; PAI, M. A. **Power System Dynamics and Stability**. [S.l.]: [s.n.].

SOARES, C. C. C. **ANÁLISE DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA**.pdf. Brasília: Universidade de Brasília, 2017.

TANG, B. **Parameter Tuning and Experimental Results of Power System Stabilizer**. Louisiana State University. [S.l.], 2011.

TARANTO, G. N. **COE754 – Dinâmica e Controle de Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro: [s.n.]: 2009.

TOLMASQUIM, M. T. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil**, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 05 Maio 2021.

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **Excitation System Comissioning Procedures**. Denver: Bureau of Reclamation, 1991.