

**INICIALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTROLADORES DEFINIDOS PELO USUÁRIO
DO PROGRAMA PACDYN**

MARCOS VINÍCIUS GONÇALVES DA SILVA FARINHA

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADO POR:

Glauco Nery Taranto, Ph.D.
(Orientador)

Sergio Gomes Junior, D.Sc.
(Co-orientador)

Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

Marcos Vicente de Brito Moreira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2007

À minha avó Maria da Silva Costa (*in memoriam*)
e a todos os brasileiros que, por forças maiores, não tiveram
a oportunidade de adentrar as portas do conhecimento.

Agradecimentos

Ao Eng. Sergio Gomes Junior, pesquisador do CEPTEL, por toda a sua ajuda neste trabalho e pelo exemplo de profissional que é para mim.

Ao Professor Glauco Nery Taranto pela sua orientação neste trabalho e pelo aprendizado que me proporcionou no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Aos meus amigos que sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos meus pais, João Pedro e Maria de Fátima, e meu irmão, Rafael, por todo apoio, carinho e compreensão e aos meus tios Terezinha e Vander por tudo o que fizeram por mim.

Resumo do projeto submetido ao corpo docente do departamento de engenharia elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de engenheiro eletricista.

INICIALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DOS CONTROLADORES DEFINIDOS PELO USUÁRIO DO PROGRAMA PACDYN

MARCOS VINÍCIUS GONÇALVES DA SILVA FARINHA
Dezembro / 2007

Orientador: Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Co-orientador: Sergio Gomes Junior, D.Sc.

Este trabalho objetiva analisar o desempenho e as características da metodologia desenvolvida para realizar a inicialização das variáveis dos controladores definidos pelo usuário do programa PacDyn. Nesta análise dá-se ênfase às propriedades, em especial às dificuldades, existentes na inicialização de cada um dos blocos que representam as funções matemáticas presentes nos controladores e, além disso, tem por fim a obtenção de todas as condições iniciais das variáveis dos controladores para um dado ponto de operação do sistema.

A inicialização dos controladores é realizada bloco a bloco respeitando-se, necessariamente, a ordem pré-definida por um algoritmo de ordenação, até que todas as condições do ponto de operação sejam encontradas viabilizando, assim, que seja feito um estudo de estabilidade em regime permanente. Em casos específicos, onde a solução não pode ser encontrada apenas pelas equações dos blocos, propõem-se formas de se auxiliar o processo de inicialização automática através da definição de algumas variáveis do controlador, recorrendo-se sempre ao método de Newton para a determinação das variáveis desconhecidas.

De qualquer forma, é um dos objetivos deste trabalho permitir que todas as condições iniciais sejam encontradas sem a necessidade de se utilizar métodos iterativos, evitando-se assim que ocorram problemas de convergência devido a não-linearidades dos controladores. Portanto, foram desenvolvidos e incorporados ao programa PacDyn algoritmos em linguagem FORTRAN capazes de calcular estas condições iniciais e foram realizados testes em

controladores reais do Sistema Interligado Nacional (SIN) para validar a metodologia aplicada.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS	X
CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	1
I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
I.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	3
I.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	4
I.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO II INICIALIZAÇÃO DOS CONTROLADORES	6
II.1 INTRODUÇÃO.....	6
II.2 BLOCOS COM APENAS UMA VARIÁVEL DE SAÍDA E DE ENTRADA	9
II.2.1 BLOCOS DE GANHO FIXO.....	9
II.2.2 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO LEAD-LAG (LDLG).....	10
II.2.3 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DE VALOR ABSOLUTO (ABS).....	12
II.2.4 INICIALIZAÇÃO DOS BLOCOS DE FUNÇÕES TRIGONOMÉTRICAS (COS, SIN, ASIN, ACOS E ATAN)	13
II.2.5 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO EXPONENCIAL (EXP)	14
II.2.6 INICIALIZAÇÃO DOS BLOCOS LIMITADORES LIM E LIMV	14
II.2.7 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO LINE.....	15
II.2.8 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO POLINOMIAL (POLN)	15
II.2.9 INICIALIZAÇÃO DOS BLOCOS DE POTENCIAÇÃO (POW), DA POTÊNCIA AO QUADRADO (SQR) E DA RAIZ QUADRADA (SQRT).....	17
II.2.10 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DO VALOR INVERSO (INV).....	18
II.2.11 INICIALIZAÇÃO DOS BLOCOS LOGARÍTMICOS (LOG E LN)	18
II.2.12 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DE INTERPOLAÇÃO (PNTS)	18
II.2.13 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DE SATURAÇÃO (SAT).....	19
II.2.14 INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DO VALOR INICIAL (VINI)	20
II.3 BLOCOS COM APENAS UMA VARIÁVEL DE SAÍDA OU UMA VARIÁVEL DE ENTRADA ..	20

II.3.1	INICIALIZAÇÃO DOS BLOCOS DE VALOR CONSTANTE.....	21
II.3.2	INICIALIZAÇÃO DOS BLOCOS DE ENTRADA, SAÍDA E MONITORAÇÃO (IN, OUT E OUTD).....	21
II.3.3	INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DE ESTIMATIVA DO VALOR INICIAL (DINI).....	22
II.3.4	INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DE SINAL DE REFERÊNCIA (REF)	23
II.4	BLOCOS COM MÚLTIPLAS ENTRADAS	23
II.4.1	INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DE DIVISÃO PONDERADA (DIV)	23
II.4.2	INICIALIZAÇÃO DOS BLOCOS DE VALOR MÁXIMO E MÍNIMO (MAX E MIN)	25
II.4.3	INICIALIZAÇÃO DO BLOCO DE MULTIPLICAÇÃO PONDERADA (MULT).....	25
II.4.4	INICIALIZAÇÃO DOS BLOCOS DO TIPO RELÉ (RLAY, RLY1, RLYR E RLYN).....	26
II.4.5	INICIALIZAÇÃO DO BLOCO SOMADOR (SUM).....	28
II.4.6	INICIALIZAÇÃO DO BLOCO ARCO TANGENTE 2 (ATAN2)	29
II.5	SUMÁRIO DO CAPÍTULO	30
CAPÍTULO III APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE INICIALIZAÇÃO A CONTROLADORES REAIS		
REAIS		
III.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
III.2	CONTROLADOR TUTORIAL	32
III.3	CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DE UM REGULADOR DE VELOCIDADE	35
III.4	CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DE UM REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO COM DIFICULDADES DE INICIALIZAÇÃO	43
III.5	CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO CIRCUITO DE CONTROLE DE UM TCSC	46
III.6	SUMÁRIO DO CAPÍTULO	50
CAPÍTULO IV RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS NA INICIALIZAÇÃO DOS CDUs.....		
IV.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	51
IV.2	RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE INICIALIZAÇÃO NO SENTIDO ENTRADA – SAÍDA.	52
IV.3	RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE INICIALIZAÇÃO NO SENTIDO SAÍDA – ENTRADA.	54
IV.4	RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE INICIALIZAÇÃO DO RAT DE TRÊS MARIAS	56
IV.5	RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO COMANDO DVAL	61
IV.6	SUMÁRIO DO CAPÍTULO	61
CAPÍTULO V CONCLUSÕES.....		
63		

V.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	63
V.2	SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO.....	64
APÊNDICE A	BLOCOS DOS CONTROLADORES DEFINIDOS PELO USUÁRIO (CDUS) E DAS TOPOLOGIAS DEFINIDAS PELO USUÁRIO (TDUS).	65
A.1	DESCRIÇÃO DOS BLOCOS ELEMENTARES EXISTENTES	65
BIBLIOGRAFIA	93

Lista de Figuras

FIGURA 1: MÁQUINA SÍNCRONA COM RAT E ESP OSCILANDO CONTRA UMA BARRA INFINITA.	7
FIGURA 2: TOPOLOGIA DO RAT.	8
FIGURA 3: TOPOLOGIA DO ESP.	8
FIGURA 4: RAT DO EXEMPLO MÁQUINA X BARRA INFINITA.	32
FIGURA 5: ESP DO EXEMPLO MÁQUINA X BARRA INFINITA.	32
FIGURA 6: TOPOLOGIA DO RV.	36
FIGURA 7: FUNÇÕES DO CDU DO RV.	37
FIGURA 8: ORDEM DE INICIALIZAÇÃO ADOTADA PARA O REGULADOR DE VELOCIDADE.	38
FIGURA 9: SENTIDOS DE INICIALIZAÇÃO DO PRIMEIRO TRECHO DESTACADO DA TOPOLOGIA DO RV.	39
FIGURA 10: SENTIDOS DE INICIALIZAÇÃO DO SEGUNDO TRECHO DESTACADO DA TOPOLOGIA DO RV.	40
FIGURA 11: SENTIDOS DE INICIALIZAÇÃO DO TERCEIRO TRECHO DESTACADO DA TOPOLOGIA DO RV.	41
FIGURA 12: REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO DE TRÊS MARIAS.	43
FIGURA 13: TOPOLOGIA DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO DE TRÊS MARIAS.	44
FIGURA 14: TOPOLOGIA DO CONTROLADOR DO TCSC DE SERRA DA MESA.	46
FIGURA 15: CONTROLADOR DO TCSC DE SERRA DA MESA.	47
FIGURA 16: TRECHO DE UM CDU COM PROBLEMAS DE INICIALIZAÇÃO NO SENTIDO ENTRADA – SAÍDA.	52
FIGURA 17: DIAGRAMA DE BLOCOS UTILIZADO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE INICIALIZAÇÃO NO SENTIDO ENTRADA – SAÍDA.	54
FIGURA 18: TRECHO DE UM CDU COM PROBLEMAS DE INICIALIZAÇÃO NO SENTIDO SAÍDA – ENTRADA.	54
FIGURA 19: DIAGRAMA DE BLOCOS UTILIZADO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE INICIALIZAÇÃO NO SENTIDO SAÍDA – ENTRADA.	55
FIGURA 20: FUNÇÕES DO RAT DE TRÊS MARIAS.	56
FIGURA 21: DIAGRAMA DE BLOCOS DO RAT DE TRÊS MARIAS.	57
FIGURA 22: DIAGRAMA DE BLOCOS UTILIZADO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE INICIALIZAÇÃO DO CASO DO RAT DE TRÊS MARIAS.	59

Lista de Tabelas

TABELA 1: CONDIÇÕES INICIAIS CONHECIDAS ATRAVÉS DO ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA OS DOIS CDUS DO CASO MÁQUINA X BARRA INFINITA.....	33
TABELA 2: CONDIÇÕES INICIAIS DAS VARIÁVEIS DO ESP DO CASO TUTORIAL.....	35
TABELA 3: CONDIÇÕES INICIAIS DAS VARIÁVEIS DO RAT DO CASO TUTORIAL.....	35
TABELA 4: CONDIÇÕES INICIAIS CONHECIDAS ATRAVÉS DO ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA O CASO DO REGULADOR DE VELOCIDADE.....	36
TABELA 5: CONDIÇÕES INICIAIS DAS VARIÁVEIS DO RV.....	41
TABELA 6: CONDIÇÕES INICIAIS CONHECIDAS ATRAVÉS DO ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA O CASO DO REGULADOR DE TENSÃO DE TRÊS MARIAS.....	44
TABELA 7: COMPARAÇÕES ENTRE AS CONDIÇÕES INICIAIS ENCONTRADAS PELO MÉTODO DE NEWTON E O PROCESSO DE INICIALIZAÇÃO AUTOMÁTICA.....	45
TABELA 8: CONDIÇÕES INICIAIS CONHECIDAS ATRAVÉS DO ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA O CASO DO TCSC DE SERRA DA MESA.....	48
TABELA 9: CONDIÇÕES INICIAIS DAS VARIÁVEIS DO CONTROLADOR DO TCSC.....	49
TABELA 10: VALORES DOS GANHOS DE REGIME PERMANENTE DOS BLOCOS DO RAT DE TRÊS MARIAS.....	57
TABELA 11: COMPARAÇÕES ENTRE AS CONDIÇÕES INICIAIS ENCONTRADAS PELO MÉTODO DE NEWTON E O PROCESSO DE INICIALIZAÇÃO AUTOMÁTICA COM INTERFERÊNCIA DO USUÁRIO.....	59
TABELA 12: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO CTE.....	66
TABELA 13: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO DINI.....	67
TABELA 14: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO DIV.....	68
TABELA 15: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO EXP.....	68
TABELA 16: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO FBAS.....	69
TABELA 17: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO FRAC.....	70
TABELA 18: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO GAIN.....	70
TABELA 19: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO IN.....	71
TABELA 20: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO LDLG.....	72
TABELA 21: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO LIM.....	73
TABELA 22: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO LINE.....	74
TABELA 23: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO MCST.....	75
TABELA 24: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO MULT.....	76
TABELA 25: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO OUT.....	76
TABELA 26: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO OUTD.....	77
TABELA 27: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO PBAS.....	78

TABELA 28: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO POLN.....	79
TABELA 29: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO POW.....	80
TABELA 30: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO RLY1.....	82
TABELA 31: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO SAT.....	85
TABELA 32: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO STMC.....	87
TABELA 33: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO SUM.....	87
TABELA 34: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO VINI.....	88
TABELA 35: PARÂMETROS DE ENTRADA DO BLOCO PNTS.....	92

Capítulo I

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Um sistema de potência moderno possui uma série de dispositivos de controle que influem diretamente nas condições de operação do sistema. Estes dispositivos, chamados de controladores, atuam em diferentes equipamentos e sob diferentes condições, e têm como principal objetivo a regulação de determinadas variáveis do sistema (como, por exemplo, a tensão e a frequência) dentro de faixas adequadas de operação ou, no caso de estabilizadores, a melhoria do amortecimento de oscilações. Deve-se observar que o sistema deve operar de forma estável, mesmo com a presença destes controladores. Deve-se, portanto, tomar uma série de cuidados no projeto e ajuste dos seus parâmetros para que os controladores cumpram a sua função melhorando ou, pelo menos, não prejudicando consideravelmente o desempenho dinâmico do sistema.

Neste trabalho, a palavra “estabilidade” refere-se à Estabilidade em Regime Permanente (ou Estabilidade a Pequenos Sinais). Este termo é utilizado para descrever a resposta do sistema a pequenas perturbações e pode-se dizer, ainda, que um sistema de potência é estável em regime permanente para uma dada condição de operação se, após uma pequena perturbação, o sistema atinge condição de operação que é idêntica (quando o distúrbio é eliminado após certo tempo) ou muito próxima (quando o distúrbio é mantido) da condição anterior à perturbação.

Para que sejam realizados estudos de estabilidade os resultados de uma análise de fluxo de potência são necessários para poder obter as condições iniciais das variáveis do sistema como, por exemplo, as potências mecânicas dos geradores e suas tensões internas. Além disso, com a presença de controladores, torna-se necessária, também, a obtenção das condições iniciais de todas as variáveis envolvidas com estes dispositivos incluindo, naturalmente, suas variáveis

internas. Isto requer então, uma análise mais detalhada dos controladores, que leve em conta suas principais características e o tipo de regulador envolvido.

Neste trabalho utilizou-se o programa PacDyn, desenvolvido pelo CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, para a realização de todos os estudos de inicialização. Este *software* é utilizado por diversas empresas do setor elétrico para realização de estudos de estabilidade a pequenas perturbações em sistemas elétricos de grande porte.

No programa PacDyn, os controladores são formados pela conexão entre diferentes blocos de controle básicos e o arranjo formado pela conexão entre estes blocos, desde as suas variáveis de entrada até a sua variável de saída, é chamado de topologia do controlador. Neste trabalho as siglas TDU ou UDT (Topologia Definida pelo Usuário ou *User Defined Topology*) serão utilizadas para se referir a qualquer topologia que possa ser criada pela combinação dos blocos básicos. Já as siglas CDU ou UDC (Controlador Definido pelo Usuário ou *User Defined Controller*) serão utilizadas para se referir ao controlador propriamente dito.

Os CDUs podem ser utilizados para modelar diversos componentes do sistema elétrico. Como exemplos destes componentes podem-se citar: sistemas de excitação e reguladores de tensão (RAT) de máquinas síncronas, reguladores de velocidade (RV), equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission System*), estabilizadores de sistema de potência (ESP), circuitos de controle do ângulo de disparo de retificadores de elos de corrente contínua (elo HVDC ou *High Voltage Direct Current link*) entre outros sinais estabilizadores adicionais [1].

As TDU que modelam estes componentes podem ser utilizadas na criação de uma biblioteca de topologias que permitem ser compartilhadas por diferentes controladores. Dessa forma, o número de CDUs de um sistema não é necessariamente igual ao número de topologias, visto que mais de um controlador pode se utilizar de uma mesma topologia. A diferença entre estes CDUs se dá, naturalmente, pelo valor dos parâmetros de suas funções que são adequados ao equipamento que se deseja controlar. Desta forma, não há a necessidade de se repetir uma topologia quando são tratados CDUs diferentes, basta que sejam definidos os parâmetros referentes a cada um dos blocos.

Em virtude da quantidade de controladores existentes no sistema elétrico e da relevância destes dispositivos em estudos de estabilidade, fica evidente a necessidade e a importância de se estudar formas para obter as condições iniciais de todas as variáveis do sistema.

1.2 Motivação e Objetivos

A inclusão de dispositivos de controle gera um aumento do número de variáveis e de equações envolvidas na modelagem do sistema elétrico, o que acarreta necessariamente em um aumento do número de variáveis cujas condições iniciais precisam ser calculadas. Atualmente, a metodologia adotada no programa PacDyn utiliza a atribuição dos valores das condições iniciais às poucas variáveis conhecidas que, em geral, correspondem a algumas entradas e saídas dos CDUs. Para as demais variáveis internas atribuem-se valores pré-definidos pelo programa, que não necessariamente correspondem aos verdadeiros valores de regime, e ao término deste processo de atribuições utiliza-se o método de Newton para se calcular, de forma iterativa, as reais condições iniciais.

Esta prática, porém, pode levar a problemas de inicialização devido às não linearidades de vários blocos dos controladores e à sensibilidade do método de Newton às condições iniciais. Os valores pré-definidos adotados pelo programa podem ser muito diferentes dos valores originais e representarem uma péssima estimativa inicial, podendo levar o método de Newton a ter problemas de convergência.

Além disso, é possível, ainda, que o usuário provoque estes mesmos problemas já que lhe é permitido definir estimativas dos valores iniciais. Esta medida tem como maior objetivo ajudar a inicialização de CDUs não-lineares, mas o resultado obtido pode ser justamente o oposto quando estas estimativas não são ideais, o que leva o método de Newton a demorar mais iterações para convergir ou, simplesmente, não convergir.

Tendo em vista estas condições, torna-se importante o desenvolvimento e a implementação de uma metodologia e de algoritmos capazes de realizar esta inicialização de forma automática. Isto significa dizer que é interessante não haver interferência do usuário no processo de obtenção das condições iniciais e que estes valores possam ser obtidos diretamente de um estudo de fluxo de potência.

É natural, porém, que existam topologias que dificultem ou impossibilitem a inicialização automática. Nestes casos, é possível que os cálculos se tornem viáveis com o mínimo de interferência do usuário que pode fornecer, de acordo com alguns critérios específicos, o valor

esperado de algumas variáveis internas, permitindo assim que o processo de inicialização prossiga e possa ser concluído.

Nos casos em que não for possível haver esta interferência do usuário ou que este não deseje fazer a análise da inicialização do controlador, já que demanda certo tempo de trabalho, pode-se recorrer ao método de Newton tomando-se certas precauções para evitar problemas de convergência.

De qualquer modo, a metodologia apresentada neste trabalho visa a alcançar um algoritmo capaz de realizar a inicialização dos CDUs sem a interferência do usuário ou de forma que esta interferência seja mínima. Esta metodologia é similar à utilizada no programa ANATEM que, no entanto, não possui atualmente a possibilidade da utilização do método de Newton como último recurso no processo de inicialização das variáveis.

1.3 Principais Contribuições do Trabalho

Dentre as principais contribuições deste trabalho podem-se citar:

- Criação e documentação de uma metodologia capaz de ser empregada no cálculo das condições iniciais das variáveis de entrada e saída de todos os blocos existentes nas topologias dos controladores definidos pelo usuário do programa PacDyn.
- Implementação de subrotinas em FORTRAN, incorporadas ao programa PacDyn, para execução de um algoritmo capaz de realizar e controlar a inicialização automática dos CDUs, promovendo ou a inicialização completa de todos os controladores sem a necessidade de recorrer a métodos iterativos, ou a redução no número de iterações do método de Newton necessárias para a determinação das condições iniciais das variáveis internas dos controladores em que a metodologia proposta não seja aplicável.
- Avaliação do desempenho da metodologia realizando testes em controladores reais utilizados no SIN.

I.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 5 Capítulos, e um apêndice, que serão sucintamente descritos a seguir.

O Capítulo II descreve a metodologia adotada para a inicialização de cada um dos blocos existentes nos CDUs. São ressaltadas as facilidades e as dificuldades existentes em se obter as condições iniciais das variáveis de cada um dos blocos.

No Capítulo III são apresentados os resultados obtidos na inicialização de alguns controladores. A maioria dos CDUs apresentados neste capítulo pertence ao banco de dados fornecido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em seu sítio oficial [2]. O primeiro CDU, porém, é apenas um caso tutorial utilizado para melhor entendimento da metodologia.

No Capítulo IV são mostrados os principais problemas encontrados durante o processo de inicialização bloco a bloco e são sugeridos métodos para a resolução destes problemas. Além disso, é proposta a utilização de um novo comando recém incorporado ao programa PacDyn que permite o usuário interferir diretamente no processo de inicialização automática.

O Capítulo V apresenta as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido e apresenta uma sugestão para trabalho futuro baseado nos desenvolvimentos aqui realizados.

No Apêndice A, são dadas as características de cada um dos blocos existentes nas topologias. São dadas descrições das funções matemáticas de cada um dos blocos, assim como número de variáveis de entrada e quantidade de parâmetros dos blocos.

Capítulo II

Inicialização dos Controladores

II.1 Introdução

A metodologia utilizada neste trabalho para inicialização automática dos controladores definidos pelo usuário (CDUs) tem como principal objetivo obter todos os valores das variáveis de entrada e de saída que compõem os blocos elementares formadores dos CDUs e TDUs.

A obtenção destes valores, no entanto, nem sempre é possível. Em geral, controladores que possuem malhas de realimentação apresentam maiores dificuldades para terem suas variáveis calculadas e inicializadas. Nestes casos, procura-se encontrar a maior quantidade de valores possível levando-se em consideração as características intrínsecas de cada um dos blocos.

Para o cálculo destes valores são utilizadas as equações apresentadas no Apêndice A tendo em vista que as variáveis com valores iniciais conhecidos, tais quais tensões nos barramentos do sistema e tensões de excitação de máquinas síncronas, apresentam valores referentes à operação em regime permanente.

Desta forma, todos os blocos cujas equações apresentam a variável s (variável de Laplace) levam em consideração o fato de que, em regime permanente, o valor de s é igual a *zero* devido ao teorema do valor final [3].

Atualmente, a metodologia empregada para inicialização dos controladores atribui os valores iniciais de algumas variáveis conhecidas do sistema aos seus respectivos blocos, e deixa as demais variáveis internas do controlador temporariamente com valores *default*. As equações destes CDUs juntamente com estes valores iniciais são, então, organizadas na forma matricial

e é utilizado o método de Newton para calcular as verdadeiras condições iniciais das variáveis do controlador.

Isto pode levar a dificuldades para inicializar alguns controladores, já que os valores *default* atribuídos às variáveis internas do CDU podem levar a problemas de convergência do método de Newton por estarem muito distantes das condições ideais. Sendo assim, torna-se importante o cálculo automático direto das variáveis internas de cada um dos blocos dos controladores sem que haja a necessidade do uso do método de Newton ou qualquer outro método iterativo de solução de sistemas de equações não lineares.

Para testar o funcionamento da inicialização de cada um dos blocos foi utilizado um caso teste apresentado na Figura 1, cujo sistema é composto por uma única máquina oscilando contra uma barra infinita.

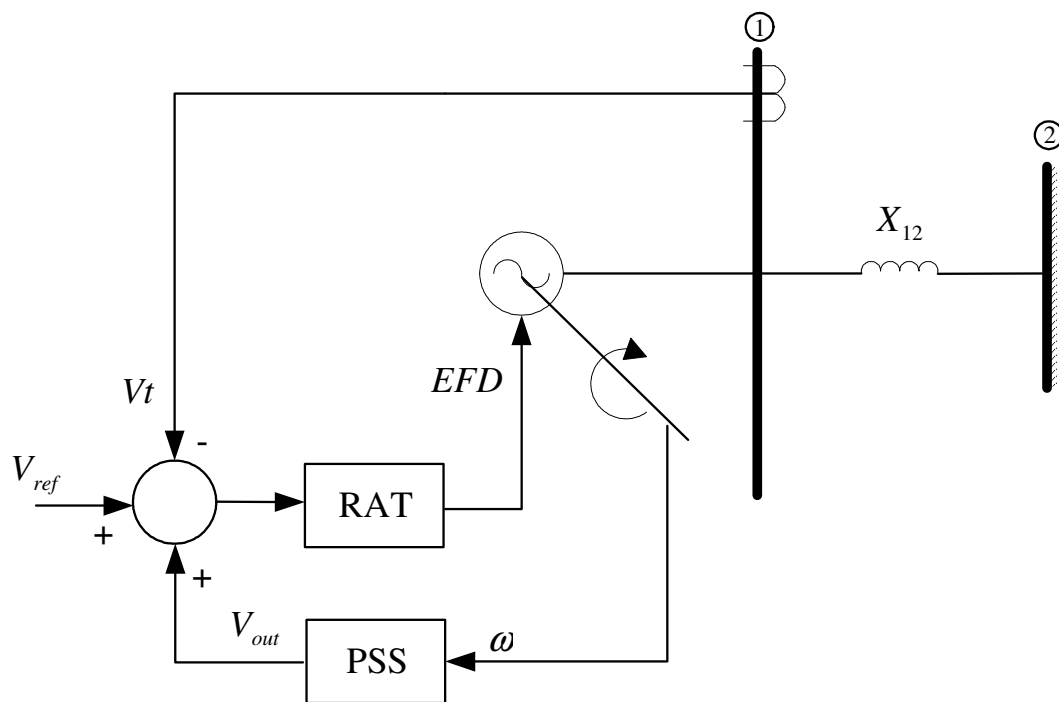


Figura 1: Máquina síncrona com RAT e ESP oscilando contra uma barra infinita.

Este sistema possui dois controladores representados por duas topologias diferentes. O primeiro controlador, apresentado na Figura 2, é um regulador automático de tensão (RAT) e o segundo, mostrado na Figura 3, é um estabilizador de sistemas de potência (ESP ou PSS – *Power System Stabilizer*).

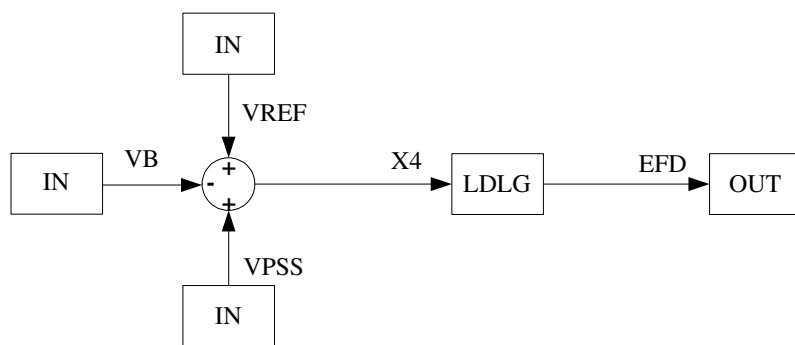


Figura 2: Topologia do RAT.

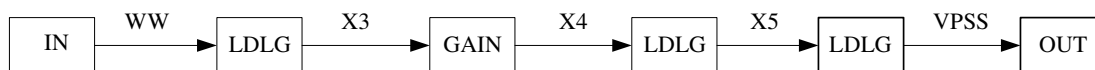


Figura 3: Topologia do ESP.

Estes controladores possuem características interessantes, em uma primeira abordagem, no tocante às suas propriedades de inicialização. Pode-se observar que estas duas topologias estão interligadas através da variável VPSS que representa o sinal de saída do ESP da máquina síncrona da topologia mostrada na Figura 3. Este tipo de interligação entre CDUs faz com que haja determinada priorização com relação à inicialização dos controladores, já que o RAT só poderá ser completamente inicializado se o valor de VPSS estiver previamente calculado.

Outra característica importante a ser ressaltada na segunda topologia apresentada é que só há a possibilidade de calcular os valores iniciais das variáveis no sentido entrada – saída. Afinal, o único valor de regime permanente conhecido desta topologia é a variável WW (velocidade síncrona da máquina em p.u.) e esta é uma variável de entrada da topologia.

O RAT, por outro lado, possui como variáveis iniciais conhecidas os valores de tensão no barramento da máquina (VB) e a tensão de excitação da máquina síncrona (EFD). O valor da variável VPSS passará a ter um valor conhecido assim que a inicialização do ESP estiver concluída. Assim, este controlador só permite a inicialização de suas variáveis no sentido saída – entrada.

De posse destas características é possível montar diferentes controladores através da conexão dos mais diversos blocos elementares, apresentados no Apêndice A, e realizar testes para verificar a inicialização de cada um deles.

Foram realizados testes sucessivos com cada um dos blocos através da alteração da topologia dos CDUs, acrescentando ou retirando diferentes blocos e realizando testes de inicialização. Uma vez que a lógica obtivesse os resultados esperados, uma nova topologia era criada para que houvesse a possibilidade de testar cada um dos blocos.

No Apêndice A se encontram as descrições completas de cada um dos blocos existentes no programa PacDyn e as características inerentes ao processo de inicialização de cada um dos blocos serão apresentadas a seguir. No entanto, para que haja uma melhor organização do trabalho e um melhor entendimento, os blocos foram reunidos em determinados grupos de acordo com suas características como, por exemplo, número de variáveis de entrada e tipo de funções.

II.2 Blocos com apenas uma variável de saída e de entrada

A maioria das topologias definidas pelo usuário é composta por blocos que possuem uma única variável de entrada e de saída. Dentro deste grupo ainda podem ocorrer subdivisões que consideram o tipo de equações envolvidas e as dificuldades específicas para o cálculo dos valores iniciais.

Assim sendo, o agrupamento dos blocos devido às suas semelhanças será feito sempre que possível, deixando os casos especiais para serem descritos à parte.

II.2.1 Blocos de Ganho Fixo

Existe um grupo especial de blocos que podem ser considerados como sendo representados por um ganho fixo e cujas inicializações são feitas basicamente da mesma forma. Estes blocos são: GAIN, FRAC, MCST, STMC, MNUS, RAD e DEG.

Cada um destes blocos possui um valor de ganho que ou é definido pelo usuário, como é o caso dos blocos GAIN e FRAC, ou é utilizado para conversão de unidades como é o caso de MCST, STMC, RAD e DEG. A única exceção a estas características é o bloco MNUS que apresenta ganho fixo igual a -1.

A inicialização destes blocos é feita de forma bem simples, pois só depende do conhecimento de uma de suas variáveis. Se V_{out} ou V_{in} for um valor conhecido só é necessária a aplicação da seguinte equação:

$$V_{out} = K(V_{in}) \quad (1)$$

Onde K representa o ganho associado a cada um dos blocos.

Este ganho K é igual a $180/\pi$, por exemplo, para um bloco DEG.

Se ambas as variáveis destes blocos forem conhecidas e corresponderem a (1), o bloco é dito como inicializado.

II.2.2 Inicialização do Bloco LEAD-LAG (LDLG)

Um bloco *lead-lag* (LDLG) possui características especiais que não permitem enquadrá-lo em um grupo específico de inicialização de blocos.

Além de apresentar o operador diferencial em sua equação característica, como é mostrada em (A.79) e (2), este bloco necessita também que seja inicializado o valor de sua variável de estado **X**.

$$V_{out} = \frac{a + s \cdot b}{c + s \cdot d} \cdot (V_{in}), \quad (d \neq 0) \quad (2)$$

Como a inicialização dos blocos é feita para valores em regime permanente a relação entre V_{out} e V_{in} mostrada em (2) limita-se, de acordo com o teorema do valor final descrito em [3], à seguinte equação:

$$V_{out} = \frac{a}{c} V_{in} \quad (3)$$

Portanto, sendo conhecidas quaisquer variáveis deste bloco, os valores de V_{out} ou V_{in} são facilmente encontrados através da relação (3), que é igual a uma relação de ganho simples.

O que deve ser levado em consideração, porém, é que como não há restrições quanto aos valores que os parâmetros a e c podem assumir em um bloco LDLG de um CDU, tanto a quanto c podem assumir o valor *zero*. Quando uma destas condições ocorre, a inicialização deste bloco fica comprometida e se torna inviável inicializar V_{out} e V_{in} a partir das equações do bloco LDLG.

Se o valor do parâmetro a for igual a zero, a equação (2) reduz-se a:

$$V_{out} = \frac{s \cdot b}{c + s \cdot d} \cdot (V_{in}) \quad (4)$$

O que nos permite apenas inicializar V_{out} já que, em regime permanente:

$$\lim_{s \rightarrow 0} sV_{out}(s) = s \cdot \frac{s \cdot b}{c + s \cdot d} \cdot \left(\frac{V_{in}}{s} \right) = 0 \quad (5)$$

Nota-se que, neste caso em particular, a inicialização de $V_{out} = 0$ pode ser feita independentemente do conhecimento do valor inicial da variável de entrada V_{in} . O valor de V_{in} , por outro lado, só pode ser obtido através de outros blocos que compartilhem esta mesma variável, mesmo sendo o valor de V_{out} conhecido.

No caso em que o parâmetro c seja nulo, há a impossibilidade de se determinar a variável de saída V_{out} . Apenas o valor da variável de entrada V_{in} pode ser determinado e este valor é necessariamente igual a zero. Isto ocorre pois a saída do bloco só apresenta um valor constante em regime permanente quando a variável de entrada é nula. Valores de entrada não nulos produziram uma rampa, pois:

$$V_{out} = \frac{a + s \cdot b}{s \cdot d} \cdot (V_{in}) \Rightarrow \int_0^i \left(\frac{a}{d} \cdot V_{in}(t) + \frac{b}{d} \cdot \frac{dV_{in}(t)}{dt} \right) dt \quad (6)$$

Em regime permanente, a derivada da variável de entrada torna-se nula e assume-se V_{in} constante. Assim, a integral torna-se:

$$V_{out}(t) = \frac{a}{d} V_{in} t + V_{out}(0) \quad (7)$$

Verifica-se que apenas o valor nulo para V_{in} faz com que V_{out} não tenda a infinito quando t tende a infinito. Esta característica não permite determinar o valor inicial de V_{out} . Este comportamento é consistente com o conhecimento de que em um bloco do tipo proporcional integral (PI), correspondente a um bloco LDLG com $c = 0$, qualquer valor constante em sua entrada produz uma rampa na saída, que tende a ∞ em regime permanente. Tem-se então que, neste caso, inicializa-se V_{in} com o valor de zero e V_{out} deve ser obtido através de outros blocos que compartilhem esta variável.

Estando as variáveis V_{out} e V_{in} inicializadas resta apenas calcular o valor da variável de estado \mathbf{X} através de (A.81).

Finalmente, após obter os valores de V_{out} , V_{in} e \mathbf{X} o bloco LDLG está completamente inicializado.

II.2.3 Inicialização do Bloco de Valor Absoluto (ABS)

O bloco ABS apresenta como característica principal o fato de quase nunca permitir a inicialização de sua variável de entrada. O conhecimento prévio de V_{out} , em geral, não permite a obtenção da variável de entrada, pois esta pode admitir dois valores distintos já que:

$$|V_{in}| = |-V_{in}| \quad (8)$$

E pela equação característica deste bloco tanto o valor de V_{in} quanto $-V_{in}$ poderiam ser consideradas inicializações corretas.

A única possibilidade de realizar a inicialização no sentido saída – entrada ocorre quando V_{out} é igual a zero.

II.2.4 Inicialização dos Blocos de Funções Trigonômétricas (COS, SIN, ASIN, ACOS e ATAN)

Os blocos que representam as funções trigonométricas seno e cosseno (SIN e COS respectivamente) assim como suas funções inversas arco-cosseno e arco-seno (ACOS e ASIN) apresentam características de inicialização semelhantes por possuírem basicamente as mesmas restrições.

Para um bloco COS, por exemplo, a determinação de V_{out} através de (A.69) ocorre sem maiores problemas desde que se conheça V_{in} a priori. Porém, para este mesmo bloco a determinação de V_{in} através do conhecimento de V_{out} deve obedecer a seguinte equação:

$$V_{in} = \text{acos}(V_{out}), \quad -1 \leq V_{out} \leq 1 \quad (9)$$

É interessante ressaltar a importância desta restrição, pois se houver a necessidade de se realizar uma inicialização no sentido saída – entrada o valor de V_{out} calculado a partir de outros blocos do CDU pode ser incoerente com a saída de um bloco de função trigonométrica. Além disso, pelo fato das funções trigonométricas não serem bijetoras, poderiam ser consideradas corretas diferentes soluções para o valor de V_{in} em (9). No entanto, a função acos sempre retorna valores compreendidos entre 0 e 2π .

Se porventura esta situação ocorrer, a inicialização não pode continuar e tanto o bloco quanto o CDU são dados como não inicializados.

Para os demais blocos de funções trigonométricas citados neste subitem o tratamento dado é o mesmo salvo, naturalmente, suas respectivas relações de entrada e saída.

No caso do bloco ATAN, cujas maiores restrições à inicialização estão relacionadas à própria função arco-tangente, deve-se ter cautela ao se inicializar no sentido saída – entrada onde valores de V_{out} múltiplos inteiros de $\frac{\pi}{2}$ indeterminam a sua inicialização.

II.2.5 Inicialização do Bloco Exponencial (EXP)

Um bloco EXP possui restrições apenas quanto à determinação da variável V_{in} no sentido saída – entrada.

A variável V_{in} pode ser obtida através da seguinte equação:

$$V_{in} = \frac{1}{a_2} \times \ln\left(\frac{V_{out}}{a_1}\right) + a_3 \quad (10)$$

Onde se impõe a restrição de que V_{out}/a_1 deve ser necessariamente maior do que zero.

Se esta restrição for respeitada, a inicialização deste bloco decorre normalmente.

II.2.6 Inicialização dos Blocos Limitadores LIM e LIMV

Os blocos de limite (LIM) e de limite variável (LIMV) não apresentam quaisquer restrições quanto à inicialização no sentido entrada – saída. Porém, ao se inicializar no sentido contrário, deve-se ter cuidado com os valores de V_{out} encontrados.

Se o valor de V_{out} estiver dentro dos limites estabelecidos pelos parâmetros de entrada (no caso do bloco LIM) ou pelas variáveis definidas pelo usuário (no caso de LIMV) a inicialização pode ser realizada perfeitamente e os valores de V_{out} e V_{in} são os mesmos. Por outro lado, se for encontrado um valor na saída do bloco fora dos limites pré-estabelecidos, a inicialização do bloco não é realizada.

Em relação à inicialização de um bloco LIMV, também existe a possibilidade de se fazer a determinação dos limites superior ou inferior do bloco quando V_{out} e V_{in} são conhecidos e $V_{in} \neq V_{out}$. Se as condições iniciais das variáveis que representam os limites do bloco forem desconhecidas, o valor de V_{out} será igual ao valor do limite superior do bloco se $V_{in} > V_{out}$.

Por outro lado, se $V_{in} < V_{out}$ apenas o valor da variável correspondente ao limite inferior do bloco poderá ser determinado através de sua equação.

Existe, ainda, outra peculiaridade na inicialização destes blocos. Quando o valor de V_{out} for exatamente igual a qualquer um dos limites estabelecidos nos blocos não é possível inicializar no sentido saída – entrada. Esta indeterminação ocorre por não ser possível obter o valor original de V_{in} , que pode tanto ser igual ao limite em questão como pode ser um valor que extrapole os limites do bloco.

II.2.7 Inicialização do Bloco LINE

Este bloco aplica, como indicado em (A.84) e (11), o valor da variável de entrada à equação de uma reta com coeficientes conhecidos.

$$V_{out} = a \cdot V_{in} + b \quad (11)$$

A inicialização deste bloco ocorre sem problemas sempre que o valor de V_{in} for conhecido. Se, por outro lado, a variável V_{out} for conhecida o valor de V_{in} pode ser obtido sem maiores problemas através da seguinte equação:

$$V_{in} = \frac{V_{out} - b}{a} \quad (12)$$

II.2.8 Inicialização do Bloco Polinomial (POLn)

Assim como um bloco LDLG, o bloco POLn possui determinadas características que impossibilitam seu enquadramento como um bloco de ganho fixo.

Aplicando-se o teorema do valor final a (A.92), a relação entre V_{in} e V_{out} resume-se à seguinte expressão:

$$V_{out} = \frac{b_{n+1}}{a_{n+1}} V_{in} \quad (13)$$

Portanto, dado o conhecimento de V_{in} ou de V_{out} automaticamente o valor da variável desconhecida fica determinado. Porém, ainda é necessário realizar os cálculos dos valores iniciais de suas variáveis de estado.

Através das equações (A.93) ou (14) apresentadas na forma matricial e do conhecimento da variável de entrada V_{in} todos os valores iniciais dos estados podem ser calculados. Vale ressaltar que como a quantidade de variáveis de estado de um bloco POLn está diretamente relacionado ao grau do polinômio, e que o maior grau admitido é quatro, o maior número de variáveis de estado possível também é quatro.

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{a_2}{a_1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{a_3}{a_1} & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ -\frac{a_{n+1}}{a_1} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \frac{b_2}{a_1} - \frac{b_1 \cdot a_2}{a_1^2} \\ \frac{b_3}{a_1} - \frac{b_1 \cdot a_3}{a_1^2} \\ \vdots \\ \frac{b_{n+1}}{a_1} - \frac{b_1 \cdot a_{n+1}}{a_1^2} \end{bmatrix} \cdot (V_{in}) \quad (14)$$

As equações (15) a (18) apresentam a forma de se obter os valores iniciais das variáveis de estado.

$$\mathbf{X}_1 = \left[\frac{b_5}{a_5} - \frac{b_1}{a_1} \right] V_{in} = V_{out} - \frac{b_1}{a_1} V_{in} \quad (15)$$

$$\mathbf{X}_2 = \frac{a_2}{a_1} X_1 - \left[\frac{b_2}{a_1} - \frac{b_1 a_2}{a_1^2} \right] V_{in} \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_3 = \frac{a_3}{a_1} X_1 - \left[\frac{b_3}{a_1} - \frac{b_1 a_3}{a_1^2} \right] V_{in} \quad (17)$$

$$\mathbf{X}_4 = \frac{a_4}{a_1} X_1 - \left[\frac{b_4}{a_1} - \frac{b_1 a_4}{a_1^2} \right] V_{in} \quad (18)$$

Uma vez que todos os estados estejam calculados, assim como V_{in} e V_{out} , a inicialização deste bloco estará concluída.

O que deve ser salientado é que, de forma análoga ao que ocorre com um bloco LDLG, não existe nenhuma restrição quanto aos valores que os parâmetros b_{n+1} e a_{n+1} podem assumir. Se qualquer um destes parâmetros for igual a zero, existirá um comprometimento do cálculo das condições iniciais das variáveis deste bloco.

Se o valor de a_{n+1} for zero, a equação característica deste bloco resume-se a:

$$V_{out} = \frac{b_1 \cdot s^n + b_2 \cdot s^{n-1} + \dots + b_{n+1}}{a_1 \cdot s^n + a_2 \cdot s^{n-1} + \dots + a_n \cdot s} \cdot V_{in} \quad (19)$$

O que nos permite apenas inicializar V_{in} com valor igual a zero já que o bloco polinomial com $a_{n+1} = 0$ se comporta como um integrador de uma função polinomial de ordem inferior. Assim sendo, caso a entrada fosse não nula, o regime permanente seria em rampa.

Por outro lado, se o parâmetro b_{n+1} for igual a zero, ocorre a indeterminação do valor da variável de entrada V_{in} . Neste caso, a equação característica do bloco em regime permanente pode ser descrita por (20) e, deste modo, nota-se que quando esta situação ocorrer apenas o valor de V_{out} será conhecido e será igual a zero.

$$V_{out} = \frac{b_1 \cdot s^n + b_2 \cdot s^{n-1} + \dots + b_n \cdot s}{a_1 \cdot s^n + a_2 \cdot s^{n-1} + \dots + a_{n+1}} \cdot V_{in} \quad (20)$$

II.2.9 Inicialização dos Blocos de Potenciação (POW), da Potência ao Quadrado (SQR) e da Raiz Quadrada (SQRT)

Estes blocos apresentam como característica marcante o fato de suas variáveis V_{in} e V_{out} apresentarem sempre o mesmo sinal. Esta premissa garante que as funções que regem estes blocos sejam bijetoras e, portanto, impede que haja resultados indesejados nos valores de suas variáveis e que existam restrições quanto à inicialização.

O bloco POW, por exemplo, inicializa suas variáveis de entrada ou saída sempre com o mesmo sinal independentemente do valor do parâmetro a que define a potência a qual o valor de V_{in} será elevado.

II.2.10 Inicialização do Bloco do Valor Inverso (INV)

As restrições quanto à inicialização deste bloco dizem respeito à impossibilidade das variáveis V_{in} e V_{out} admitirem o valor zero. A equação (A.119) mostra essa restrição no sentido entrada – saída. Naturalmente, esta restrição também existe no sentido saída – entrada.

II.2.11 Inicialização dos Blocos Logarítmicos (LOG e LN)

As inicializações destes blocos no sentido entrada – saída estão explicitadas em (A.120) e (A.121), referentes aos blocos LOG e LN, juntamente com suas restrições.

A inicialização no sentido saída – entrada para ambos os blocos não possui quaisquer restrições e podem ser realizadas a partir de (21) e (22) para os blocos LN e LOG respectivamente.

$$V_{in} = e^{V_{out}} \quad (21)$$

$$V_{in} = 10^{V_{out}} \quad (22)$$

II.2.12 Inicialização do Bloco de Interpolação (PNTS)

O bloco de interpolação apresenta suas regras de inicialização bem definidas no sentido entrada – saída de acordo com as equações (A.132) a (A.134).

No entanto, não é uma tarefa tão simples realizar a inicialização no sentido saída – entrada já que é necessário averiguar algumas propriedades da função representada pelos pontos determinados pelos parâmetros de entrada.

Se a função representada por esses pontos puder ser classificada como estritamente crescente ou decrescente, a inicialização pode ser feita normalmente pois não existem dúvidas quanto à determinação do intervalo de valores da abscissa no qual o valor de V_{in} se encontra. Caso contrário, a inicialização fica comprometida já que se torna impossível identificar a qual intervalo V_{in} pertence.

Sendo assim, o valor da variável de entrada V_{in} pode ser determinado pela seguinte equação:

$$V_{in} = (V_{out} - Y_i) \cdot \frac{X_{i+1} - X_i}{Y_{i+1} - Y_i} + X_i \quad (23)$$

O que deve ser notado é que a equação (23) não permite que seja identificado a priori qual o intervalo em que a variável V_{in} se encontra. Portanto, torna-se necessário aplicar a variável V_{out} a praticamente todas as equações retas que podem ser formadas pelos parâmetros de entrada do bloco até que se chegue a um resultado coerente. Enquanto o valor de V_{in} encontrado estiver fora dos limites estabelecidos pelos valores da abscissa utilizados em (23), a inicialização não estará concluída e deve prosseguir até que este valor esteja de acordo com as equações do bloco.

As únicas exceções a estes resultados ocorrem quando são utilizados o primeiro ou o último conjunto de pares ordenados e o valor de V_{in} extrapola os limites superior ou inferior estabelecidos pelos valores da abscissa dos parâmetros de entrada. Nestes casos, a inicialização é dita como concluída por estar de acordo com o conjunto de equações (A.132) a (A.134) do Apêndice A.

II.2.13 Inicialização do Bloco de Saturação (SAT)

O bloco de saturação não apresenta grandes problemas quanto ao cálculo dos valores iniciais de suas variáveis em nenhum dos dois sentidos de inicialização possíveis.

A única restrição aplicada ao cálculo do valor inicial de sua variável de entrada relaciona-se à equação (A.108), reproduzida em (24), onde o valor inicial da variável V_{in} pode ser encontrado de acordo com (25), que já apresenta a sua restrição.

$$V_{out} = A \cdot e^{B \cdot V_{in}} \quad (24)$$

$$V_{in} = \ln\left(\frac{V_{out}}{A}\right) \frac{1}{B}, \quad \frac{V_{out}}{A} > 0 \quad (25)$$

II.2.14 Inicialização do Bloco do Valor Inicial (VINI)

Este bloco não possui necessariamente uma equação matemática que determine os valores iniciais de suas variáveis. Sua inicialização se dá simplesmente quando suas variáveis estiverem com seus valores definidos.

Se este bloco estiver associado a uma variável interna do CDU basta que esta variável seja conhecida para que o bloco seja inicializado. Se por outro lado a variável de entrada do bloco estiver associada a uma variável externa ao CDU, o bloco só poderá ser inicializado quando esta variável já estiver inicializada. Ainda assim, se esta variável externa estiver associada a outro CDU, este deve ser inicializado previamente para que a variável de entrada do bloco VINI possa ser inicializada.

II.3 Blocos com apenas uma variável de saída ou uma variável de entrada

Um segundo grupo de blocos pertencente às topologias definidas pelo usuário possui como característica marcante o fato de possuir apenas uma variável. Esta variável pode ser tanto uma variável de entrada quanto uma variável de saída do bloco.

Este grupo de blocos tem a capacidade de realizar diferentes funções em um controlador, dentre as quais é possível destacar: possibilitar a interligação entre CDUs, como pode ser o caso dos blocos IN e OUT; apresentar valores de saída constantes, que podem ser dados

inerentes ao sistema elétrico; ou simplesmente reproduzir valores de referência definidos pelo usuário.

São pertencentes a este grupo os blocos IN, OUT, OUTD, DINI, CTE, FBAS, FRQN, PBAS, REF e SBAS e suas principais características de inicialização serão abordadas a seguir.

II.3.1 Inicialização dos Blocos de Valor Constante

Os blocos deste subgrupo são caracterizados por apresentarem um valor constante de sua variável de saída. A maioria destes blocos é utilizada para reproduzir constantes do sistema tais quais frequências nominais, potências base de máquinas síncronas ou do sistema, entre outros.

Os blocos que podem ser incluídos neste subgrupo são: CTE, FBAS, FRQN, PBAS e SBAS.

A inicialização destes blocos é sempre concluída no início do processo uma vez que os valores de suas variáveis de saída são sempre conhecidos.

II.3.2 Inicialização dos Blocos de Entrada, Saída e Monitoração (IN, OUT e OUTD)

Os blocos de saída e de entrada de um CDU apresentam variáveis cujos valores podem estar relacionados às variáveis de outros controladores ou a equipamentos e outros componentes do sistema elétrico.

Os controladores esquematizados nas Figuras 2 e 3 representam bem estas características onde se podem perceber algumas diferentes aplicações destes tipos de blocos. Por exemplo, a variável de entrada do bloco OUT do ESP da Figura 3, chamada de VPSS, corresponde à variável de saída de um dos blocos IN do RAT da Figura 2. Neste caso, os blocos IN e OUT realizam a interligação entre diferentes CDUs e suas inicializações são concluídas sempre que o valor da variável de entrada do bloco OUT for conhecido.

Já no caso das demais variáveis de saída dos blocos IN, como é o caso das variáveis VB e VREF da Figura 2 e da variável WW da Figura 3, os blocos de entrada estão apenas reproduzindo os valores de variáveis do sistema. Dois destes valores já são previamente conhecidos, VB e WW, pois são dados referentes à operação em regime permanente e são obtidos através de resultados de estudos de fluxo de potência. A variável VREF é a única variável de saída de um bloco IN deste exemplo que necessita ter seu valor calculado a partir das demais variáveis de seu CDU, e sua inicialização depende exclusivamente dos demais blocos do controlador.

Um raciocínio análogo é aplicado ao bloco OUT do RAT deste exemplo, que é considerado como inicializado, pois sua variável de entrada (EFD) também é previamente conhecida.

Em relação ao bloco OUTD, cuja única função é permitir monitorar variáveis de saída do CDU e, portanto, sua variável de entrada não é utilizada por outros controladores, a inicialização é considerada completa sempre que o valor de sua variável de entrada for conhecido.

II.3.3 Inicialização do Bloco de Estimativa do Valor inicial (DINI)

Este bloco é sempre considerado como inicializado pois o valor de sua variável de entrada é igual ao valor de seu parâmetro de entrada definido pelo usuário.

O que é interessante ressaltar sobre este bloco é que o valor atribuído à sua variável V_{in} é apenas uma primeira estimativa do valor inicial de sua variável. Este valor não necessariamente corresponderá ao valor inicial encontrado ao final das iterações realizadas pelo método de Newton para o cálculo das condições iniciais. Como descrito no Apêndice A, a única função deste bloco é tornar o processo de inicialização de CDUs não-lineares mais fácil, pois o valor de seu parâmetro de entrada pode facilitar o processo de convergência do método. Assim sendo, este bloco não é utilizado no algoritmo de inicialização bloco a bloco proposto neste trabalho.

II.3.4 Inicialização do Bloco de Sinal de Referência (REF)

A inicialização deste bloco só pode ser realizada pela determinação do valor de sua variável de saída através de outros blocos do controlador. Por se tratar de um sinal de referência do controlador, sua inicialização se assemelha ao caso onde a variável V_{out} de um bloco de entrada também é um sinal de referência.

II.4 Blocos com múltiplas entradas

Os blocos pertencentes a este último grupo apresentam, em geral, propriedades singulares quanto às suas inicializações. Estes blocos apresentam uma relação matemática entre duas ou mais variáveis de entrada e uma única variável de saída e, devido ao maior número de variáveis envolvidas, apresentam maiores dificuldades em suas inicializações.

Independentemente da função matemática que um bloco de múltiplas entradas apresente, sua inicialização no sentido entrada – saída, na maioria das vezes, só pode ser realizada quando são conhecidas todas as variáveis de entrada do bloco. Existem algumas exceções, entretanto, que permitem que as inicializações sejam feitas quando apenas algumas poucas variáveis são conhecidas.

Estas características serão abordadas individualmente para os blocos DIV, MULT, SUM e ATAN2 e serão discutidas em dois outros grupos, compostos pelos blocos MIN e MAX, que possuem similaridades evidentes, e pelos blocos RLAY, RLY1, RLYN e RLYR.

II.4.1 Inicialização do Bloco de Divisão Ponderada (DIV)

O bloco de divisão ponderada apresenta algumas propriedades importantes em sua inicialização que estão relacionadas com a equação deste bloco mostrada em (A.72) e reproduzida a seguir:

$$V_{out} = \frac{a_1 \cdot V_{in1}}{\prod_{i=2}^n a_i \cdot V_{in(i)}} \quad (26)$$

De acordo com (26), existe um caso específico em que a variável V_{out} pode ser determinada apenas pelo conhecimento de sua primeira variável de entrada V_{in1} . Se V_{in1} for igual a zero, a variável V_{out} assume este mesmo valor independentemente do conhecimento das demais variáveis de entrada. Porém, desta forma, não é mais possível inicializar quaisquer outras variáveis de entrada deste bloco a partir de sua equação, sendo necessário recorrer aos demais blocos conectados ao DIV para se obter as outras variáveis.

Seguindo um raciocínio análogo ao anterior, se apenas a variável de saída do bloco for conhecida e for igual a zero, o valor de V_{in1} é automaticamente encontrado e todas as demais variáveis ficam indeterminadas.

Se esta situação em particular não ocorrer e houver $n-1$ variáveis conhecidas no bloco, a inicialização pode ser executada normalmente, onde o valor de uma variável de entrada qualquer, excetuando-se a primeira, pode ser encontrado por (27).

$$V_{in(j)} = \frac{a_1 \cdot V_{in1}}{a_j \cdot V_{out} \cdot \prod_{\substack{i=2 \\ i \neq j}}^n a_i \cdot V_{in(i)}} \quad (27)$$

Onde n corresponde ao número de variáveis de entrada e j corresponde ao índice da variável de entrada $V_{in(j)}$ desconhecida.

No caso específico da primeira variável ser desconhecida, recorre-se à seguinte expressão:

$$V_{in1} = \frac{V_{out} \cdot \prod_{i=2}^n a_i \cdot V_{in(i)}}{a_1} \quad (28)$$

II.4.2 Inicialização dos Blocos de Valor Máximo e Mínimo (MAX e MIN)

A inicialização destes blocos no sentido entrada – saída segue rigorosamente o que está exposto em (A.87) e (A.85) para os blocos MIN e MAX respectivamente. Seguindo estas equações, a variável de saída sempre pode ser determinada quando todas as variáveis de entrada forem conhecidas.

Só existem restrições quanto à inicialização no sentido saída – entrada. Neste caso, a inicialização da variável $V_{in(n)}$ desconhecida só pode ocorrer se forem conhecidos os valores de V_{out} e de $n-1$ entradas.

Ainda assim, para um bloco MAX, a variável desconhecida só pode ser determinada se todas as variáveis de entrada com valores conhecidos forem menores do que V_{out} . Isto significa dizer que, no sentido proposto, só é possível realizar a inicialização do bloco MAX se o valor desconhecido corresponder à saída do bloco.

Analogamente para o bloco MIN, a inicialização só se mostra possível no sentido saída – entrada quando não houver nenhuma variável de entrada conhecida com valor menor do que V_{out} .

Quaisquer incoerências encontradas no processo de inicialização destes blocos, como por exemplo encontrar V_{out} com um valor menor do que alguma variável de entrada em um bloco MAX, interrompe a inicialização do bloco e do CDU e o programa indica que houve erro.

II.4.3 Inicialização do Bloco de Multiplicação Ponderada (MULT)

Encontrar o valor de V_{out} dado o conhecimento de todas as variáveis de entrada do bloco mostra-se bem simples segundo (A.88) ou (29). Porém, caso qualquer uma das variáveis de entrada for igual a zero não há a necessidade de se conhecer todas as variáveis de entrada para se determinar o valor de V_{out} pois este será necessariamente igual a zero.

$$V_{out} = \prod_{i=1}^n a_i \cdot V_{in(i)} \quad (29)$$

Seguindo este mesmo raciocínio, percebe-se que se o valor de V_{out} for igual a zero, só é possível determinar o valor de uma variável de entrada. Se houver mais de uma variável de entrada desconhecida, fica impraticável determinar qual destas é igual a zero, sendo necessário realizar outras inicializações no CDU que possibilitem este cálculo.

II.4.4 Inicialização dos Blocos do Tipo Relé (RLAY, RLY1, RLYR e RLYN)

Os blocos do tipo relé só conseguem realizar a inicialização de suas variáveis, na maioria dos casos, quando o valor inicial de sua última variável de entrada é conhecido. Este valor é utilizado como uma espécie de sinal de controle do bloco e serve como base na seleção das variáveis de entrada que serão reproduzidas em V_{out} . Sendo assim, seu conhecimento é indispensável nestas inicializações.

A inicialização no sentido entrada – saída de qualquer bloco deste grupo ocorre sem maiores problemas sempre que todas as variáveis de entrada forem conhecidas. A inicialização no sentido saída – entrada, no entanto, difere para cada um dos blocos apresentados neste subitem e seus comportamentos de inicialização serão abordados individualmente a seguir.

Em um bloco RLAY a inicialização no sentido saída – entrada apenas permite determinar o valor inicial de uma de suas variáveis de entrada. De acordo com o valor encontrado para V_{in3} e pela lógica das equações (A.97) e (A.98) mostradas no Apêndice A e reproduzidas a seguir é possível determinar o valor de V_{in1} sempre que V_{out} for conhecida e V_{in3} for menor ou igual a zero. Nesta mesma condição, o valor de V_{in2} não pode ser determinado.

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in3} \leq 0, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in1} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & \text{Senão} \\ & V_{out} = V_{in2} \end{aligned} \quad (31)$$

Uma lógica análoga se aplica quando $V_{in3} > 0$ sendo que neste caso apenas V_{in2} pode ser inicializada no sentido saída – entrada.

Em um bloco RLY1, o valor da variável de entrada V_{in1} poderá ser encontrado através do conhecimento da variável V_{out} somente se o valor de V_{in2} for idêntico ao parâmetro de entrada a . Esta característica fica bastante evidenciada ao se analisar (A.99) e (A.100) ou (32) e (33) abaixo.

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in2} = a, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in1} \end{aligned} \tag{32}$$

$$\begin{aligned} & \text{Senão} \\ & V_{out} = 0 \end{aligned} \tag{33}$$

Deste modo, a variável de entrada V_{in1} só fica indeterminada quando V_{in2} for diferente de a e V_{out} for igual a zero. Qualquer outra combinação de valores em V_{out} e V_{in2} impossibilita a inicialização deste bloco.

Em um bloco RLYN praticamente todas as variáveis de entrada ficam indeterminadas ao se inicializar no sentido saída – entrada quando V_{out} for igual a zero e a variável de controle do bloco $V_{in(n)}$ possuir um valor maior do que as $n-1$ entradas. Quando esta situação ocorre fica impossível determinar quaisquer variáveis de entrada através das equações deste bloco.

Outra situação especial ocorre quando V_{out} é diferente de zero e $V_{in(n)}$ possui valores compreendidos no intervalo $[1, n-1]$, onde n corresponde à quantidade de variáveis de entrada. Neste caso, apenas uma das variáveis desconhecidas selecionada pela variável de controle pode ser determinada, e esta apresentará o valor inicial igual ao de V_{out} .

Em um bloco RLYR é possível determinar apenas uma das variáveis de entrada no sentido saída – entrada através da comparação entre os parâmetros de entrada e da variável reguladora $V_{in(n)}$. Estas equações estão mostradas no Apêndice A e serão repetidas a seguir.

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in(n)} \leq a_1, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in1} \end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in(n)} \leq a_2, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in2} \end{aligned} \tag{35}$$

⋮

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in(n)} \leq a_{n-1}, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in(n-1)} \end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned} & \text{Senão} \\ & V_{out} = 0 \end{aligned} \tag{37}$$

Pode-se perceber que se V_{out} for igual a zero e $V_{in(n)}$ não se enquadrar em nenhuma das equações do bloco, todas as demais variáveis de entrada, excetuando-se a variável reguladora, terão seus valores indeterminados. Assim como ocorria com os demais blocos do tipo relé, só é possível determinar uma das variáveis de entrada através das equações (34) a (37).

II.4.5 Inicialização do Bloco Somador (SUM)

Por possuir uma equação matemática bem simples, este bloco não apresenta restrições de inicialização. O cálculo dos valores iniciais de suas variáveis sempre pode ser realizado quando $n-1$ entradas e a saída ou n entradas forem conhecidas.

No caso de haver uma única variável de entrada desconhecida, o seu valor inicial pode ser obtido através da equação (38) descrita a seguir:

$$V_{in(j)} = \frac{1}{a_j} \left[V_{out} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n a_i \cdot V_{in(i)} \right] \tag{38}$$

Onde n representa o numero de variáveis de entrada e a_n representa o peso associado a cada uma delas.

II.4.6 Inicialização do Bloco Arco Tangente 2 (ATAN2)

O bloco ATAN2 não possui nenhum problema quanto à inicialização de suas variáveis no sentido entrada – saída. A maioria dos problemas relacionados à inicialização deste bloco ocorre quando se deseja calcular o valor de uma de suas variáveis de entrada a partir do conhecimento das demais variáveis do bloco.

Este bloco possui apenas duas variáveis de entrada, que serão chamadas de V_{in1} e V_{in2} , e apresenta algumas singularidades que impedem ou facilitam a sua inicialização. Estas características podem ser resumidas nas seguintes lógicas:

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{out} = 0 \text{ ou } k\pi, k = \pm 1, 2, \dots, \text{ então} \\ & V_{in1} = 0 \text{ e} \\ & V_{in2} = \text{indeterminado} \end{aligned} \tag{39}$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{out} = k\pi/2, k = \pm 1, 3, \dots, \text{ então} \\ & V_{in1} = \text{indeterminado e} \\ & V_{in2} = 0 \end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{out} > 0 \text{ e } V_{in1} < 0 \text{ ou} \\ & V_{out} < 0 \text{ e } V_{in1} > 0, \text{ então} \\ & \text{Inicialização Impossível} \end{aligned} \tag{41}$$

Caso os valores da variável de saída V_{out} não se enquadrem nas equações (39) a (41), a inicialização do bloco pode ocorrer sem maiores problemas. Para se determinar as variáveis V_{in1} ou V_{in2} , utilizam-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in2} \text{ é desconhecida,} \\ & V_{in2} = \left(\frac{V_{in1}}{\tan(V_{out})} \right) \end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in1} \text{ é desconhecida,} \\ & V_{in1} = V_{in2} \cdot \tan(V_{out}) \end{aligned} \tag{43}$$

II.5 Sumário do Capítulo

A inicialização dos controladores definidos pelo usuário segue rigorosamente as equações matemáticas que definem seus blocos formadores. Entretanto, o cálculo dos valores iniciais das variáveis não depende somente das equações dos blocos. Esta dependência inclui, também, o tipo da topologia dos controladores envolvidos que pode facilitar ou impossibilitar sua correta inicialização.

Uma vez que não haja problemas para se definir as condições iniciais de todas as variáveis de um determinado bloco, este é dito como inicializado e os valores de suas variáveis podem ser utilizados pelos demais blocos, ou até mesmo por outros CDUs, que porventura compartilhem estas mesmas variáveis.

Deste modo, a inicialização é feita bloco a bloco até que todo o controlador, ou pelo menos maior parte dele, esteja inicializado.

Foram apresentadas neste capítulo as metodologias utilizadas para realizar o cálculo das condições iniciais das variáveis de entrada e de saída dos diferentes blocos existentes nos CDUs, ressaltando as propriedades de cada um deles assim como as dificuldades inerentes às suas inicializações.

Capítulo III

Aplicação da Metodologia de Inicialização a Controladores Reais

III.1 Considerações Iniciais

Este capítulo objetiva mostrar os resultados obtidos na implementação da metodologia adotada para o cálculo das condições iniciais dos CDUs. Para atingir este objetivo foram selecionados controladores com características distintas de inicialização para servir como exemplo da aplicação da metodologia desenvolvida. Todo o processo de inicialização destes exemplos será descrito passo a passo, possibilitando assim esclarecer as eventuais dificuldades que aparecem durante o cálculo das condições iniciais.

Os dois primeiros controladores mostrados serão descritos de forma mais didática para apresentar os passos seguidos durante a inicialização. Os CDUs mostrados no subitem III.2 correspondem aos mesmos apresentados no capítulo II. No entanto, agora serão abordadas todas as funções destes controladores assim como todos os valores de regime permanente de suas variáveis.

Os demais CDUs mostrados são controladores reais pertencentes ao SIN e estão disponibilizados pela internet através do banco de dados para estudos de estabilidade a pequenos sinais no sítio oficial do ONS. Os controladores utilizados são referentes ao cenário de setembro de 2006.

III.2 Controlador Tutorial

Os dois controladores mostrados neste subitem apresentam topologias bem simples e não possuem nenhuma dificuldade adicional para terem suas condições iniciais calculadas. No entanto, são exemplos excelentes para se demonstrar de forma bem didática como o processo de inicialização automática acontece.

As Figuras 4 e 5 apresentam o RAT e o ESP responsáveis pelo controle do sistema formado pelo gerador que oscila contra a barra infinita da Figura 1 do Capítulo II. Agora, porém, são mostradas todas as funções destes controladores e não somente a sua topologia.

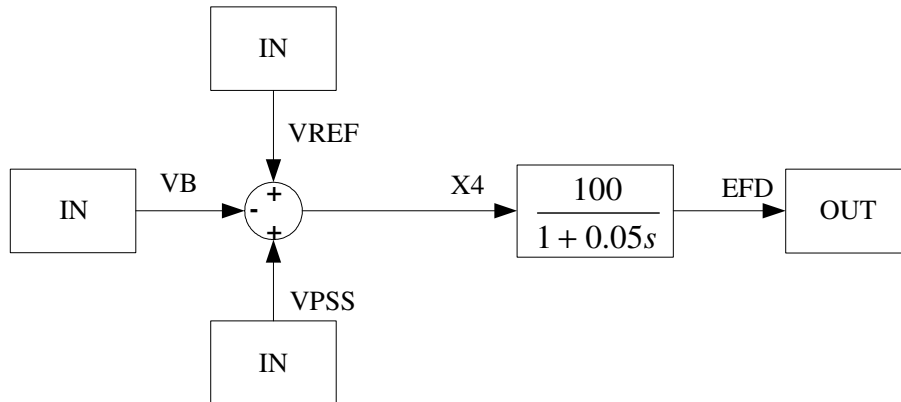


Figura 4: RAT do exemplo Máquina X Barra Infinita.

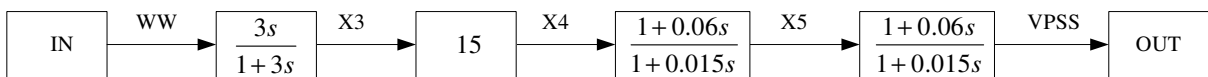


Figura 5: ESP do exemplo Máquina X Barra Infinita.

O processo de inicialização começa por uma análise preliminar das variáveis dos dois CDUs. Dos estudos de fluxo de potência, apenas os valores de VB (tensão no barramento), EFD (tensão de excitação da máquina síncrona) e WW (velocidade síncrona da máquina em p.u.), mostrados na Tabela 1, estão determinados.

Tabela 1: Condições iniciais conhecidas através do estudo de fluxo de potência para os dois CDUs do caso Máquina X Barra Infinita

Tipo do Bloco	Variáveis dos Blocos	Condições Iniciais
IN	WW	1.0000
IN	VB	1.0000
OUT	EFD	1.7583

Como já foi dito anteriormente no capítulo II, a inicialização do RAT está intimamente ligada à inicialização do ESP. Esta dependência ocorre devido à interligação entre os dois CDUs através da variável VPSS. Portanto, a tentativa de inicialização começa pelo ESP e como a única variável conhecida deste CDU é WW, compartilhada pelos blocos IN e LDLG, a inicialização no sentido entrada – saída se torna a única possibilidade de se encontrar as outras condições iniciais.

O bloco de entrada só possui uma única variável que já fora determinada, então, este bloco já pode ser considerado como inicializado. O próximo passo leva à tentativa de inicializar o bloco LDLG. Através de sua função, é possível calcular sua variável de saída nomeada de X3, onde:

$$X3 = \frac{a}{c} \cdot WW = 0 \quad (44)$$

E como as duas variáveis deste bloco LDLG são conhecidas, a sua variável de estado também pode ser calculada de acordo com a equação (45):

$$X = -\frac{b}{d} \cdot WW + X3 = -\frac{3}{3} \cdot 1.0 + 0 = -1 \quad (45)$$

Determinados estes valores, a inicialização prossegue bloco a bloco nesta topologia, que é radial, até que possa ser obtido o valor de VPSS que, como era esperado, também é igual a zero.

É importante neste ponto ressaltar duas informações relevantes:

1. Para o primeiro bloco LDLG inicializado, o cálculo de sua variável de saída independe do conhecimento da variável de entrada, pois em consonância com (44), seu parâmetro a é igual a zero. A inicialização poderia ter começado por este bloco LDLG sem maiores problemas, porém, se WW não fosse uma variável conhecida, a topologia do CDU não permitiria calcular sua condição inicial o que o levaria a ser considerado como não-inicializado.
2. Apesar do valor da variável de saída de um ESP em regime permanente sempre apresentar valor igual a zero devido à presença de pelo menos um bloco LDLG com o parâmetro a nulo, o algoritmo criado não assume esta premissa como verdadeira. Esta condição só é vista como verdade se todas as opções de inicialização já tiverem sido esgotadas. Caso contrário, o valor da variável $VPSS$ será sempre calculado.

Uma vez obtido o valor de $VPSS$, o RAT que se utiliza deste sinal pode ser inicializado. Diferentemente de como ocorreu com o primeiro CDU, a sua inicialização só é possível no sentido saída – entrada. Deste modo, o primeiro valor calculado será o da variável $X4$ através da equação do bloco LDLG que compartilha a variável EFD com o bloco de saída do regulador de tensão.

A equação do bloco LDLG leva ao cálculo dos valores iniciais das variáveis $X4$ e X (variável de estado) utiliza as seguintes equações:

$$X4 = \frac{c}{a} EFD = \frac{1}{100} \cdot 1,7583 = 0.017583 \quad (46)$$

$$X = -\frac{b}{d} \cdot X4 + EFD = -\frac{0}{0.05} \cdot 0.017583 + 1.7583 = 1.7583 \quad (47)$$

Finalmente, o último valor a ser obtido, chamado de $VREF$, corresponde à tensão de referência do RAT . Este valor é calculado pela equação do bloco somador e corresponde a:

$$VREF = X4 - (VPSS - VB) = 0.017583 - (0 - 1.0) = 1.017583 \quad (48)$$

Após este último passo, o cálculo de todas as variáveis foi efetuado com sucesso e a inicialização de ambos os CDUs está concluída.

As Tabelas 2 e 3 contêm as condições iniciais de todas as variáveis dos CDUs apresentados neste caso tutorial e estão organizadas de forma a facilitar a visualização de seus valores. A

coluna designada por “Variáveis do bloco” corresponde apenas à variável de saída e às possíveis variáveis de estado existentes. A coluna designada por “Tipo do Bloco” não apresenta nenhuma menção aos blocos OUT, pois estes só possuem variáveis de entrada cujas condições iniciais já foram abordadas pelos blocos que as compartilham.

Tabela 2: Condições iniciais das variáveis do ESP do caso tutorial.

Tipo do Bloco	Variáveis do Bloco	Condições Iniciais
IN	WW	1.0
LDLG	X	-1.0
	X3	0.0
GAIN	X4	0.0
LDLG	X	0.0
	X5	0.0
LDLG	X	0.0
	VPSS	0.0

Tabela 3: Condições iniciais das variáveis do RAT do caso tutorial.

Tipo do Bloco	Variáveis do Bloco	Condições Iniciais
IN	VB	1.0000
IN	VREF	1.017583
IN	VPSS	0.0000
SUM	X4	0.017583
LDLG	X	1.7583
	EFD	1.7583

III.3 Cálculo das Condições Iniciais de um Regulador de Velocidade

A topologia apresentada na Figura 6 pertence a um CDU real utilizado na modelagem do regulador de velocidade da usina de Guaporé-RS e corresponde ao CDU de número 1445 no arquivo de dados fornecido pelo ONS.

Esta topologia se mostra como um excelente exemplo para o estudo da inicialização automática, pois apresenta um arranjo de blocos um pouco mais complicado do que a dos controladores analisados até então, com um total de 31 blocos, e possui inclusive malhas de realimentação.

As equações deste controlador são mostradas na Figura 7 e a Tabela 4 contém todas as condições iniciais necessárias para o início dos cálculos das condições iniciais das demais variáveis deste regulador.

Tabela 4: Condições iniciais conhecidas através do estudo de fluxo de potência para o caso do regulador de velocidade.

Tipo do Bloco	Variáveis do Bloco	Condições Iniciais
IN	WW	1.0
IN	PT	0.9
CTE	UM	1.0
OUT	PMEC	0.9

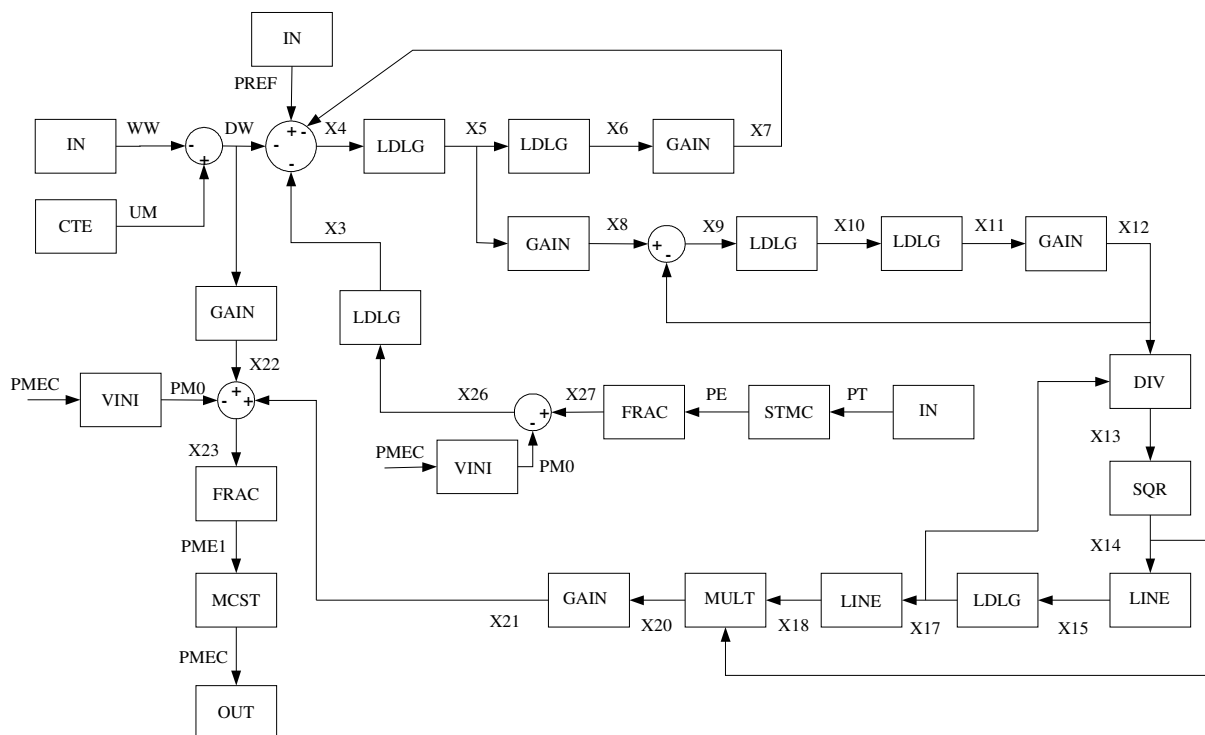


Figura 6: Topologia do RV.

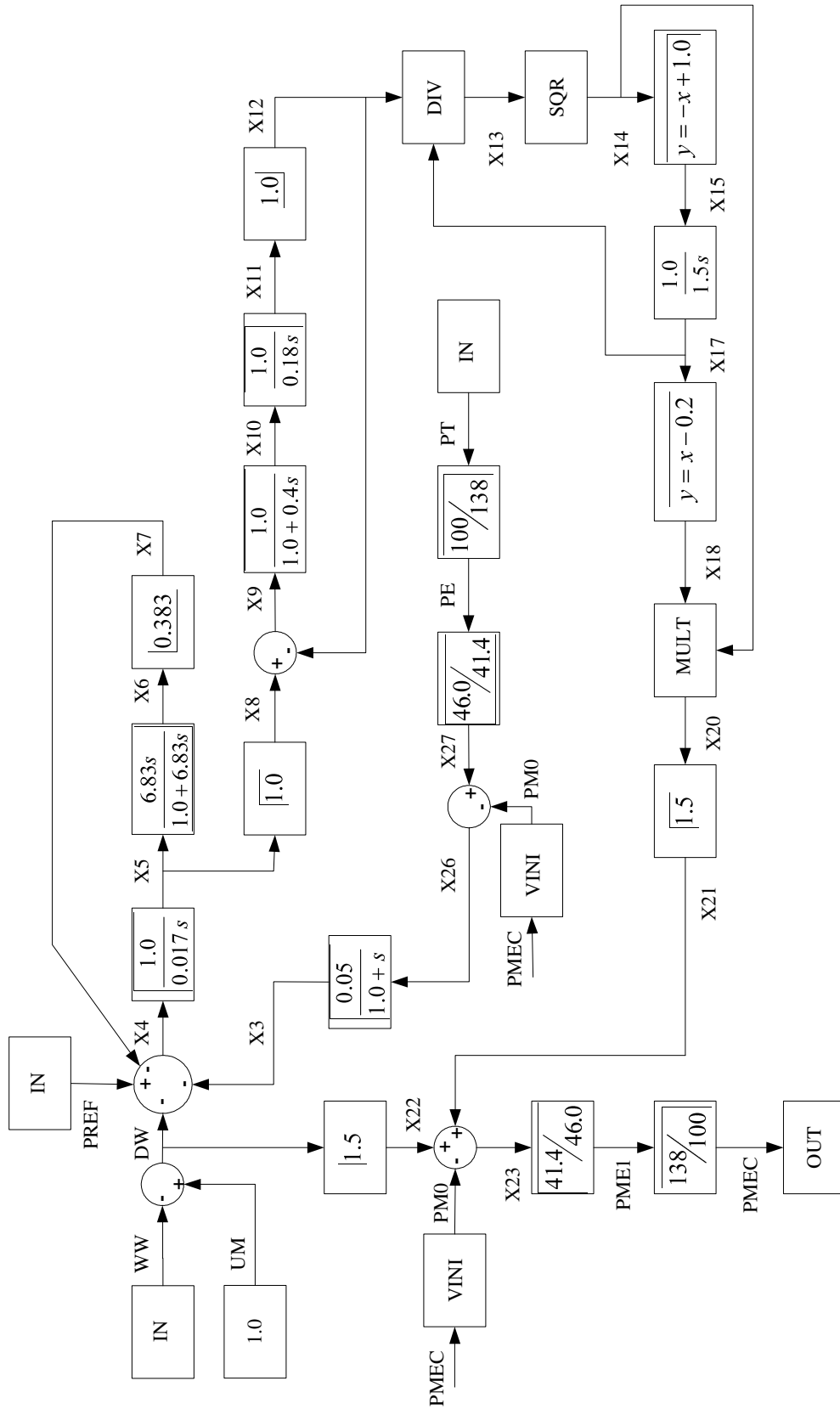


Figura 7: Funções do CDU do RV.

Neste CDU, os valores iniciais previamente conhecidos pertencem à variável de saída do bloco de valor constante (CTE), chamada de UM, e às variáveis WW, P MEC (Potência mecânica no eixo do rotor da máquina síncrona) e PT (Potência ativa no terminal da máquina síncrona). Tendo estes valores como ponto de partida, é possível inicializar dois entre os três blocos IN existentes além dos blocos CTE e OUT. Para os demais blocos, a definição da ordem de inicialização segue a disposição dos mesmos no arquivo de entrada de dados e a viabilidade da realização dos cálculos.

Para facilitar a observação da ordem de inicialização, a Figura 8 mostra a topologia do controlador incluindo a numeração que representa a seqüência adotada para a inicialização de cada variável. Note que, quando duas variáveis distintas apresentarem a mesma numeração, há a indicação de que a inicialização fora concluída a priori (Blocos IN e OUT) ou que estes números representam a mesma variável (Bloco VINI #3).

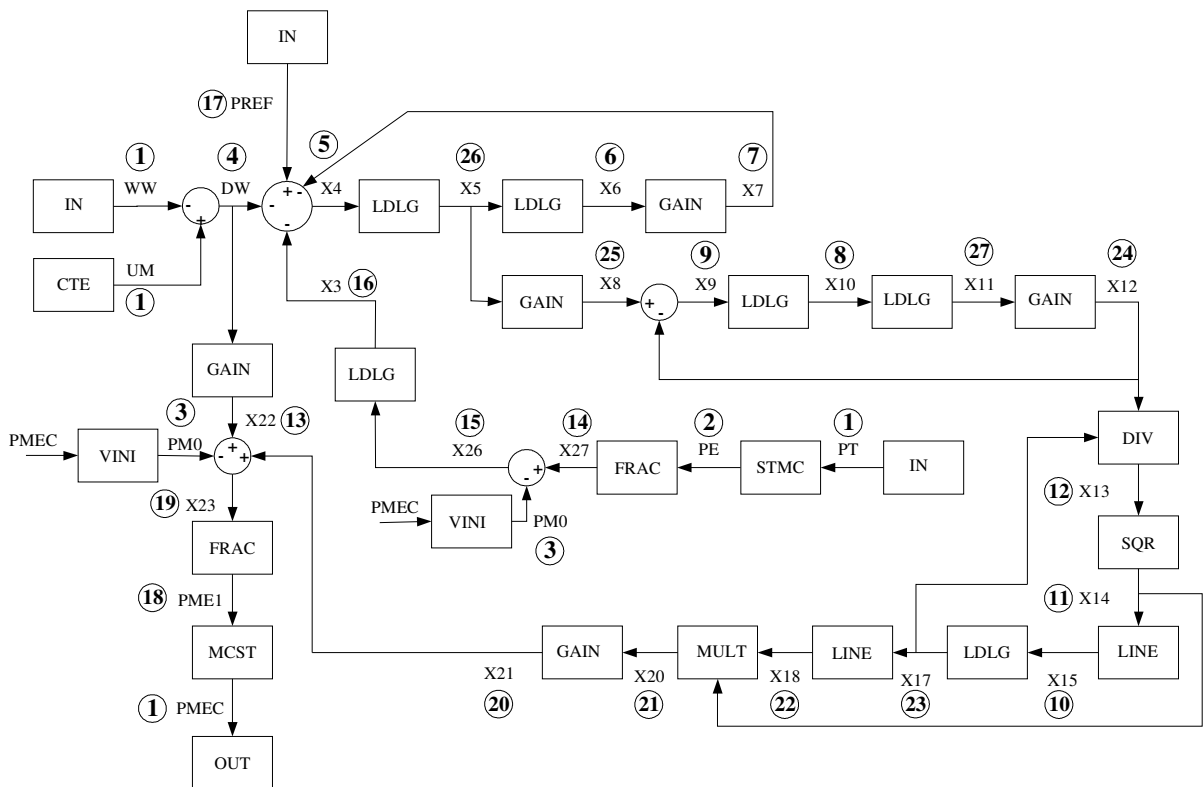


Figura 8: Ordem de inicialização adotada para o regulador de velocidade.

Devido à maior complexidade deste CDU e à organização de seus blocos no arquivo de dados, a ordem adotada para a inicialização dificulta o entendimento deste problema como um

todo. Por este motivo, as Figuras 9 a 11 foram destacadas do controlador original para facilitar a explicação das operações realizadas.

A Figura 9 destaca os sentidos de inicialização da parte do controlador que apresenta o bloco somador cujas variáveis de entrada são X3, X7, DW e PREF e a variável de saída é X4. Neste bloco, a variável de saída X4 pode ser determinada facilmente através da equação do bloco LDLG, cuja variável de entrada é X4, onde:

$$X4 = \frac{c}{a} \cdot X5 = 0 \quad (49)$$

De forma análoga, o bloco LDLG deste mesmo ramo permite determinar X6 e X7, ambos iguais a zero.

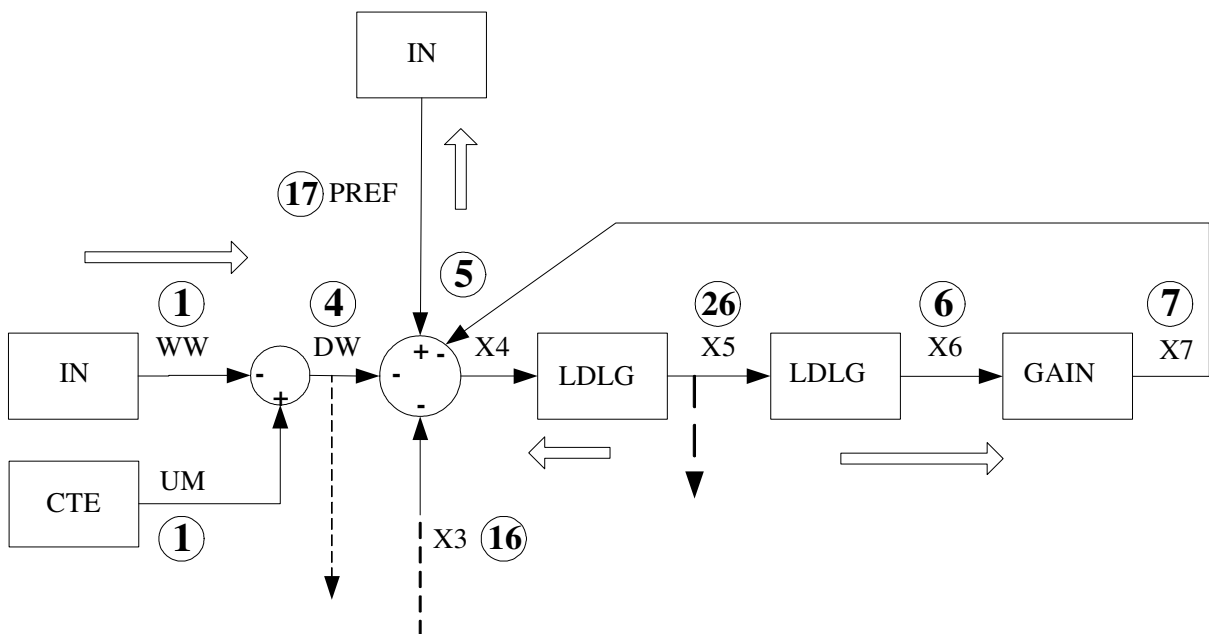


Figura 9: Sentidos de inicialização do primeiro trecho destacado da topologia do RV.

Neste ponto, percebe-se que a determinação da potência de referência (PREF) só depende dos valores de X3 e DW. Para que a variável X3 seja calculada, as equações presentes no ramo destacado na Figura 10 precisam ser resolvidas. Esta mesma Figura permite notar que esta inicialização ocorre no sentido entrada – saída devido ao conhecimento prévio de PT e P MEC. Ao fim de todos os cálculos envolvidos, é possível encontrar os valores de X3 e de X iguais a -0.008768.

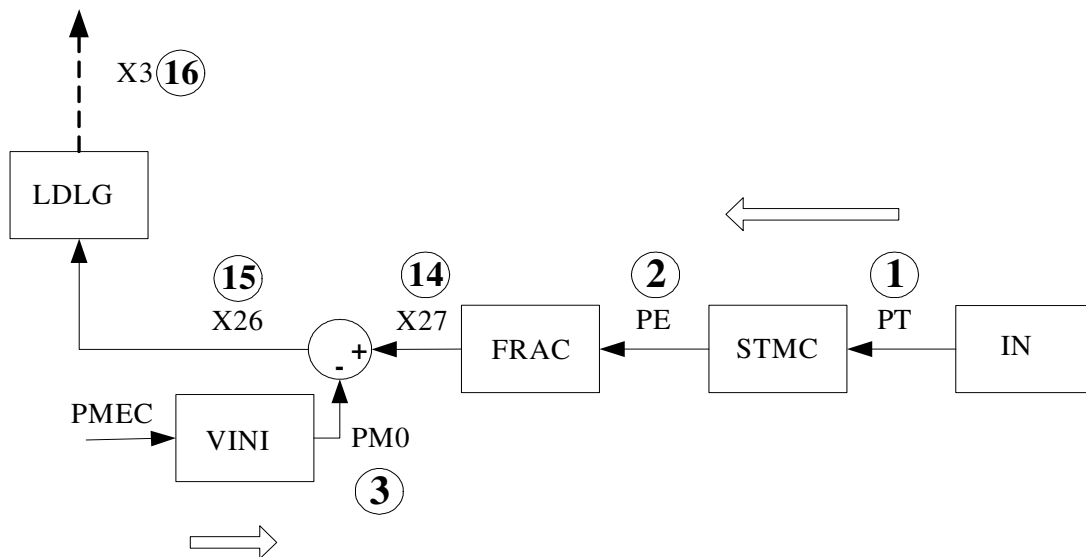


Figura 10: Sentidos de inicialização do segundo trecho destacado da topologia do RV.

No caso da variável de número 4, chamada de DW, a determinação de seu valor inicial é feita pelo conhecimento de duas das três variáveis de seu bloco somador onde:

$$DW = (UM - WW) = (1.0 - 1.0) = 0 \quad (50)$$

Por fim, existem $n-1$ variáveis conhecidas no bloco SUM da Figura 9, o que leva à determinação de PREF (potência de referência do regulador de velocidade) onde:

$$PREF = X4 + DW + X3 + X7 = 0 + 0 - 0.008768 + 0 = -0.008768 \quad (51)$$

Com o cálculo de mais esta variável, boa parte do CDU encontra-se inicializada. Existe, porém, outro trecho que merece atenção e ainda precisa ser inicializado. Esta parte do CDU está apresentada na Figura 11.

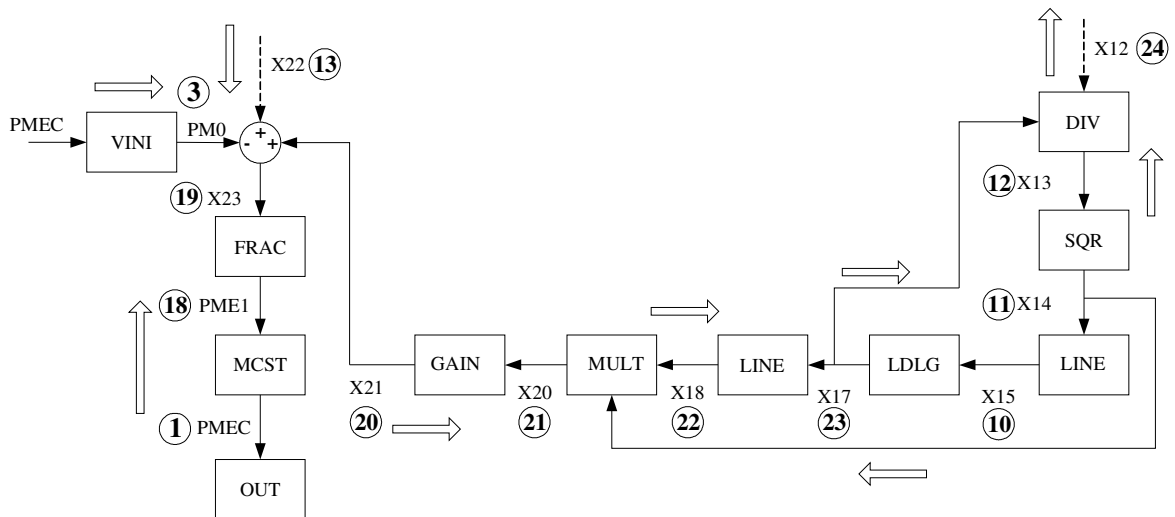


Figura 11: Sentidos de inicialização do terceiro trecho destacado da topologia do RV.

Apesar do bloco LDLG, de variáveis número 10 e 23, facilitar o processo de inicialização, pois viabiliza a determinação de X15, X14 e X13, a inicialização desta parte da topologia só é realizada por completo quando o somador desta figura tiver o valor de sua variável de entrada X21 conhecido. Este valor é imprescindível na obtenção das outras condições iniciais deste trecho do controlador já que a presença de blocos com múltiplas variáveis de entrada (Blocos MULT e DIV) não permite, neste caso, que a inicialização seja feita sem este dado.

Com a inicialização deste último trecho do CDU todo o processo está concluído. A Tabela 5 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5: Condições iniciais das variáveis do RV.

Tipo do Bloco	Variáveis do Bloco	Condições Iniciais
IN	PREF	-0.008768
IN	WW	1.00000
IN	PT	0.90000
STMC	PE	0.65217
VINI	PM0	0.90000
CTE	UM	1.00000
SUM	DW	0.00000

LDLG	X	-0.008768
	X3	-0.008768
SUM	X4	0.00000
LDLG	X	0.083092
	X5	0.083092
LDLG	X	-0.083092
	X6	0.00000
GAIN	X7	0.00000
GAIN	X8	0.083092
SUM	X9	0.00000
LDLG	X	0.00000
	X10	0.00000
LDLG	X	0.083092
	X11	0.083092
GAIN	X12	0.083092
DIV	X13	1.00000
SQR	X14	1.00000
LINE	X15	0.00000
LDLG	X	0.083092
	X17	0.083092
LINE	X18	-0.11691
MULT	X20	-0.11691
GAIN	X21	-0.17536
GAIN	X22	0.00000
SUM	X23	0.72464
SUM	X26	-0.17536
FRAC	X27	0.72464
FRAC	PME1	0.65217
MCST	PMEC	0.900000

III.4 Cálculo das Condições Iniciais de um Regulador Automático de Tensão com Dificuldades de Inicialização

O CDU da Figura 12, que corresponde à TDU da Figura 13, ilustra outro caso de um controlador real do SIN utilizado na modelagem de um RAT. Este CDU é identificado pelo número 305 na base de dados do ONS, e é responsável pela regulação de tensão da usina de Três Marias – MG.

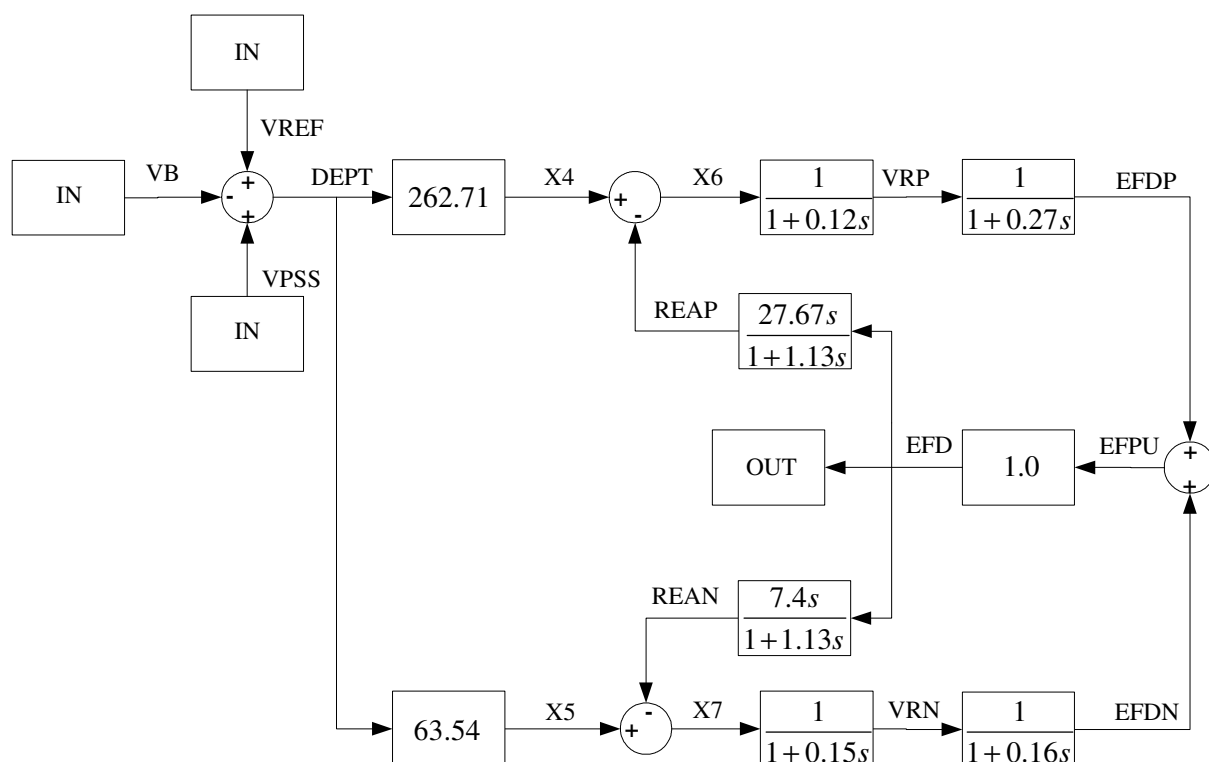


Figura 12: Regulador Automático de Tensão de Três Marias.

A característica principal deste CDU, no tocante à sua inicialização e que justifica a sua inclusão neste trabalho, é o fato de apresentar em sua topologia malhas de realimentação que impossibilitam a inicialização automática.

O ponto de partida do processo de inicialização deste regulador é o bloco OUT. Apesar de existirem, de acordo com a Tabela 6, três variáveis previamente conhecidas, apenas a variável EFD é útil neste processo de inicialização, pois permite obter as variáveis REAN, REAP e EFDN.

No entanto, a inicialização deste CDU não é impossível. Basta que uma das variáveis intermediárias de qualquer uma das malhas de realimentação como, por exemplo, X6 e VRP ou X7 e VRN ou DETP sejam definidas pelo usuário para que todos os valores possam ser calculados.

Esta possibilidade, porém, só será contemplada no capítulo seguinte, onde serão mostradas algumas formas de auxiliar o processo de inicialização automática. Por enquanto, a Tabela 7 sumariza os poucos valores iniciais encontrados e os confronta com os resultados obtidos pelo método de Newton, que é chamado sempre que não é possível a inicialização bloco a bloco de forma automática.

Tabela 7: Comparações entre as condições iniciais encontradas pelo método de Newton e o processo de inicialização automática

Tipo do Bloco	Variáveis do Bloco	Condições Iniciais ao final da inicialização automática	Condições Iniciais encontrados pelo método de Newton
IN	VB	1.0200	1.0200
IN	VREF	<i>indefinido</i>	1.0240
IN	VPSS	0.0000	0.0000
SUM	DETP	<i>indefinido</i>	0.00402
GAIN	X4	<i>indefinido</i>	1.0562
SUM	X6	<i>Indefinido</i>	1.0562
LDLG	X	<i>Indefinido</i>	1.0562
	VRP	<i>Indefinido</i>	1.0562
LDLG	X	<i>indefinido</i>	1.0562
	EFDP	<i>indefinido</i>	1.0562
GAIN	X5	<i>Indefinido</i>	0.25545
SUM	X7	<i>Indefinido</i>	0.25545
LDLG	X	<i>indefinido</i>	0.25545
	VRN	<i>indefinido</i>	0.25545
LDLG	X	<i>indefinido</i>	0.25545
	EFDN	<i>indefinido</i>	0.25545

SUM	EFPU	1.3116	1.3116
LDLG	X	-32.1167	-32.1167
	REAP	0.0000	0.0000
LDLG	X	-8.5892	-8.5892
	REAN	0.0000	0.0000
GAIN	EFD	1.3116	1.3116

III.5 Cálculo das Condições Iniciais do Circuito de Controle de um TCSC

Este último exemplo, mostrado nas Figuras 14 e 15, contempla o estudo da inicialização do circuito de controle do TCSC de Serra da Mesa pertencente à interligação Norte – Sul que corresponde ao CDU de número 197 na base de dados do ONS.

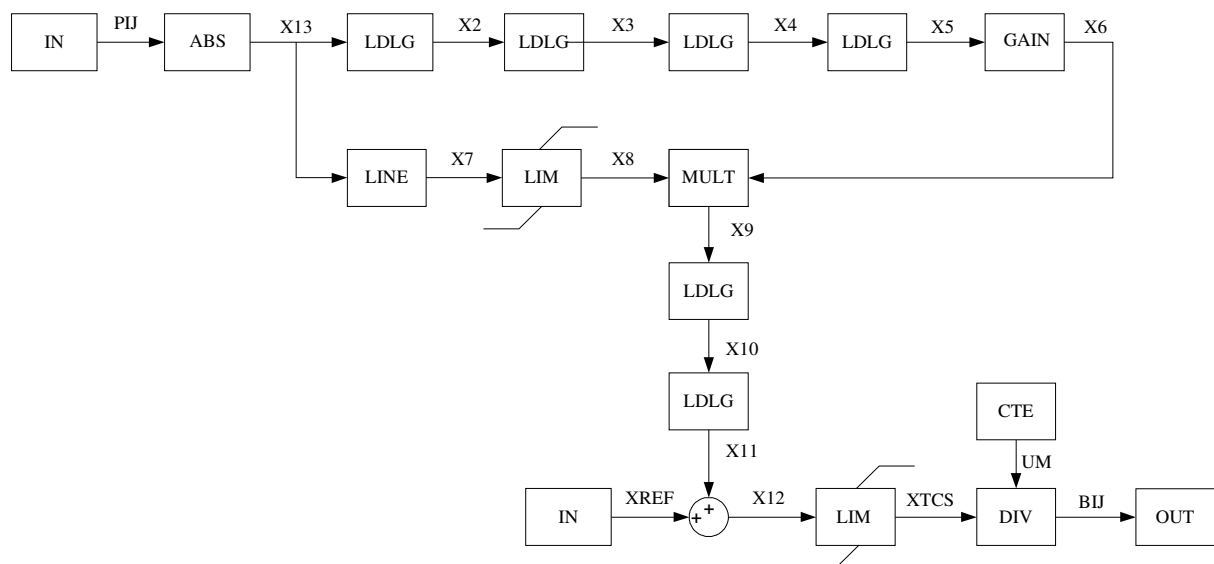


Figura 14: Topologia do controlador do TCSC de Serra da Mesa.

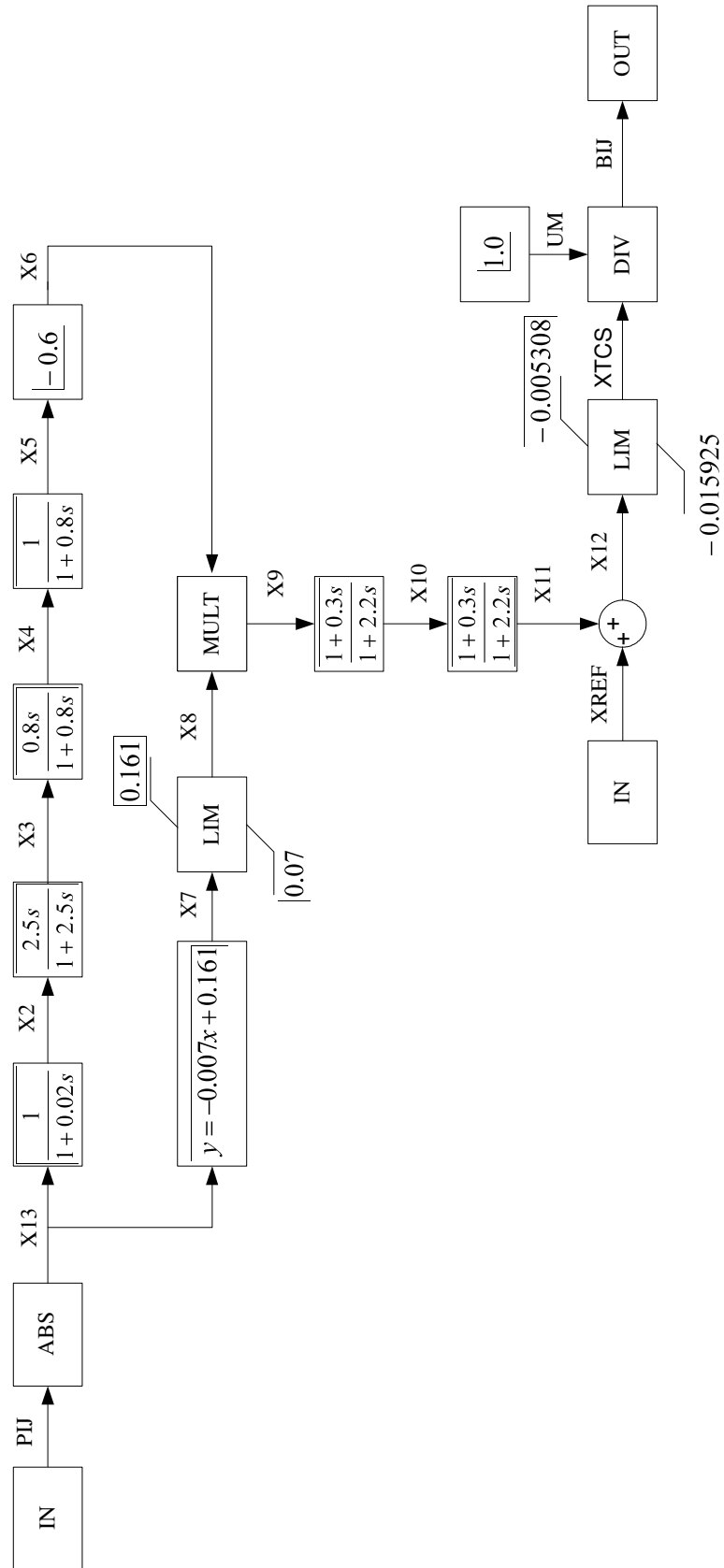


Figura 15: Controlador do TCSC de Serra da Mesa.

Através de uma investigação mais detalhada da topologia da Figura 14 é possível perceber que a inicialização automática pode ser realizada com sucesso através do conhecimento das variáveis BIJ (Susceptância série entre os barramentos $i - j$), PIJ (Fluxo de potência ativa entre os barramentos $i - j$) e UM (valor constante). Todas estão mostradas na Tabela 8.

Tabela 8: Condições iniciais conhecidas através do estudo de fluxo de potência para o caso do TCSC de Serra da Mesa.

Tipo do Bloco	Variáveis do Bloco	Condições Iniciais
IN	PIJ	-12.093
OUT	BIJ	-12.506
CTE	UM	1.0

Percebe-se que devido ao número de variáveis conhecidas e suas disposições na TDU, o processo de inicialização ocorre tanto no sentido entrada – saída quanto no sentido saída – entrada e culmina com a obtenção do valor de referência do controlador (XREF).

Mesmo com a existência dos blocos não-lineares, como é o caso dos blocos limitadores, não são encontradas incoerências nos valores calculados e o processo de inicialização bloco a bloco pôde ser concluído. Todavia, este caso serve para alertar da ocorrência de três características deste caso:

1. A obtenção das condições iniciais deste caso não pode ser obtida apenas pelo método de Newton. Constata-se que, devido à presença de blocos não-lineares, o método de Newton não converge dadas as condições iniciais *default* atribuídas às variáveis internas do controlador. Anteriormente à implementação do processo de inicialização automática, o usuário era obrigado a definir estimativas de valores iniciais de algumas variáveis para conseguir a convergência deste método iterativo. Agora, porém, a definição de estimativas de valor inicial para este CDU através do comando DINI torna-se dispensável.
2. Dependendo do ponto de operação do sistema, podem acontecer incoerências ao se inicializar determinados blocos não-lineares. Neste exemplo tal fato aconteceria se fosse encontrado na saída do bloco limitador um valor que extrapolasse seus limites.

Quando este tipo de situação ocorre, se torna impossível determinar as condições iniciais, o CDU não pode ser inicializado e o erro é indicado pelo programa.

3. Neste regulador, qualquer interferência do usuário no sentido de ajudar a obtenção das condições iniciais poderia levar à ocorrência de problemas no processo de inicialização automática. Se porventura, fossem definidas como estimativa do valor inicial condições diferentes da esperada para a variável XTCS, por exemplo, a tentativa de inicialização do bloco DIV seria frustrada, uma vez que a estimativa do usuário provavelmente divergiria do encontrado pela equação do bloco.

Como não houve nenhum problema nos cálculos das condições iniciais deste CDU, todas as variáveis puderam ser determinadas, e seus valores são abordados na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9: Condições iniciais das variáveis do controlador do TCSC

Tipo do Bloco	Variáveis do Bloco	Condições Iniciais
IN	PIJ	-12.093
IN	XREF	-0.00637
LDLG	X	12.093
	X2	12.093
LDLG	X	-12.093
	X3	0.0
LDLG	X	0.0
	X4	0.0
LDLG	X	0.0
	X5	0.0
GAIN	X6	0.0
LINE	X7	0.076351
LIM	X8	0.076351
MULT	X9	0.0

LDLG	X	0.0
	X10	0.0
LDLG	X	0.0
	X11	0.0
SUM	X12	-0.00637
LIM	XTCS	-0.00637
ABS	X13	12.093
CTE	UM	1.0
DIV	BIJ	156.99

III.6 Sumário do Capítulo

Este capítulo abordou o processo de inicialização de cinco controladores distintos, propiciando um melhor entendimento dos passos seguidos durante a tentativa de se obter as condições iniciais de todas as variáveis de um CDU. Os exemplos descritos contemplaram diferentes características do processo de inicialização e permitiram, em quase todos os casos, que os resultados obtidos fossem tabelados e pudessem ser utilizados em outros estudos.

Os CDUs exemplo consistiam em dois reguladores automáticos de tensão, um estabilizador de sistema de potência, um regulador de velocidade e um circuito de controle de um TCSC, dentre os quais apenas um regulador de tensão não pode ser inicializado de forma automática. Neste caso, a inicialização foi obtida pelo método de Newton originalmente implementado no programa. No próximo capítulo, porém, será apresentado um processo que possibilitará a inicialização bloco a bloco deste controlador através da interferência do usuário no processo de inicialização automática.

Capítulo IV

Resolução de Problemas na Inicialização dos CDUs

IV.1 Considerações Iniciais

Os principais problemas existentes no processo de inicialização automática dos CDUs ocorrem devido à existência de malhas de controle que possuem sentidos desfavoráveis de inicialização. Além disso, blocos com peculiaridades de inicialização, como é o caso dos blocos POLn e LDLG, e blocos não lineares, como é o caso dos blocos RLAY e LIM, podem dificultar este processo.

Em muitos casos, porém, a inicialização pode ser realizada quando uma ou mais condições iniciais de variáveis intermediárias do CDU forem definidas. No entanto, para que sejam feitas estas definições, é necessário disponibilizar meios para que o usuário possa indicar os valores iniciais das variáveis desconhecidas. No programa ANATEM, por exemplo, esta atribuição de condições iniciais é feita através do comando DEFVAL [4]. No programa PacDyn, por outro lado, não existiam meios de o usuário definir valores iniciais das variáveis sendo sempre entregue ao método de Newton a responsabilidade de calcular tais valores.

Para atender a esta necessidade, o comando DVAL, juntamente com os algoritmos que o controlam, foram recentemente implementados no programa PacDyn e permitem o usuário auxiliar o processo de inicialização automática ao atribuir valores às variáveis desconhecidas.

Estes valores podem tanto ser constantes definidas pelo usuário como podem estar relacionados a outras variáveis internas ou externas ao CDU. De qualquer forma, é deveras importante que estas condições representem valores adequados ao controlador e que de forma alguma atrapalhem a inicialização automática.

Deste modo, é foco deste capítulo demonstrar, através da resolução de alguns exemplos, os maiores problemas existentes no processo de inicialização e prover métodos para obter suas resoluções. O último caso que será abordado neste capítulo refere-se a um controlador real do SIN, mostrado anteriormente no Capítulo III, e exemplificará uma situação onde a inicialização não pode ocorrer sem a interferência do usuário.

IV.2 Resolução de Problemas de Inicialização no Sentido Entrada – Saída.

A Figura 16 mostra um caso onde a inicialização das variáveis do trecho destacado de um CDU não pode ser realizada no sentido indicado. Os blocos K1 e K2 deste exemplo podem ser entendidos como um ganho de regime permanente composto por todos os ganhos dos blocos existentes entre as variáveis destacadas. Nota-se que o conhecimento de X1 não é suficiente para a determinação das demais variáveis, pois o bloco somador ainda tem duas outras condições iniciais desconhecidas: X2 e X4.

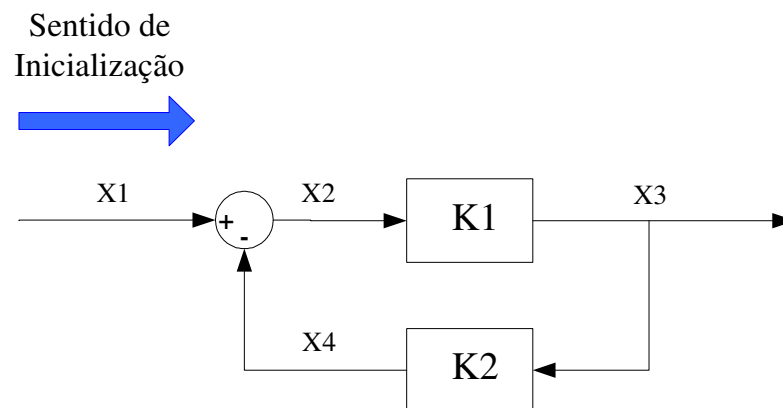


Figura 16: Trecho de um CDU com problemas de inicialização no sentido entrada – saída.

No intuito de auxiliar a inicialização deste trecho do CDU, torna-se indispensável a determinação de pelo menos mais um valor. Pelo diagrama de blocos deste caso, percebe-se que o problema teria solução imediata se fosse possível determinar X3. Esta característica motiva a tentativa de se encontrar uma relação matemática entre X3 e X1 que leve em consideração os ganhos indicados.

Sendo assim, através do diagrama de blocos deste pequeno trecho de um CDU, pode-se montar o seguinte sistema de equações:

$$X2 = X1 - X4 \quad (52)$$

$$X3 = K1 \cdot X2 \quad (53)$$

$$X4 = K2 \cdot X3 \quad (54)$$

Ao substituir as equações (53) e (54) em (52), encontra-se a relação desejada que permite calcular facilmente o valor de X3, que só depende dos ganhos dos blocos de controle da variável X1. A equação (56) mostra, então, a relação entre X3 e X1 encontrada.

$$X1 = \frac{X3}{K1} + K2 \cdot X3 \quad (55)$$

$$X3 = \left(\frac{K1}{1 + K1 \cdot K2} \right) X1 \quad (56)$$

Uma vez definida esta equação, o usuário dispõe de duas maneiras diferentes de se utilizar deste resultado:

1. O usuário pode realizar os cálculos necessários para obtenção de X3 externamente ao programa e, através do comando DVAL, atribuir o valor achado como condição inicial de X3.
2. O usuário pode inserir no diagrama original uma malha de controle que reproduza a relação entre X1 e X3. Como mostrado na Figura 17, a inserção de alguns blocos de controle que simulam a relação entre as variáveis X1 e X3 são utilizadas em conjunto com um bloco de saída de monitoração (OUTD) e, portanto, não alteram a resposta ou as condições iniciais das outras variáveis do CDU. Com este novo diagrama, basta utilizar o comando DVAL e definir X5 como o valor inicial de X3.

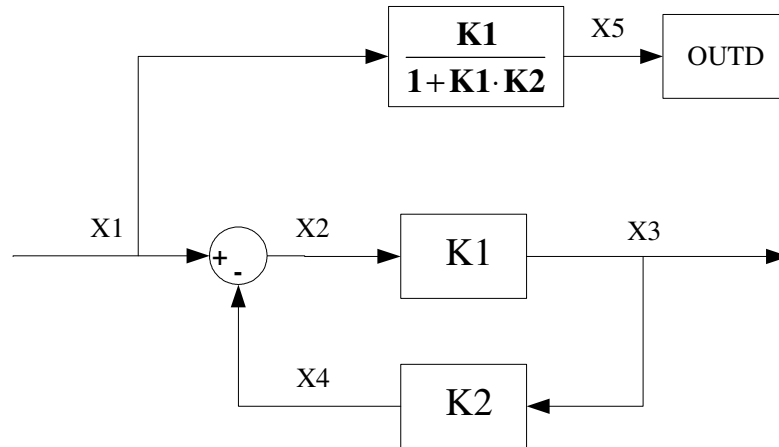


Figura 17: Diagrama de blocos utilizado para resolução do problema de inicialização no sentido entrada – saída.

IV.3 Resolução de Problemas de Inicialização no Sentido Saída – Entrada.

A Figura 18 mostra uma outra situação extremamente corrente na inicialização dos CDUs e que impossibilita a inicialização automática. Analogamente ao que aconteceu no caso onde se deseja resolver problemas de inicialização no sentido entrada – saída, este tipo de problema requer a determinação de uma relação matemática entre duas variáveis: uma conhecida e outra desconhecida. A relação entre estas variáveis também deve levar em conta os ganhos em regime permanente dos blocos pertencentes ao trecho do CDU estudado.

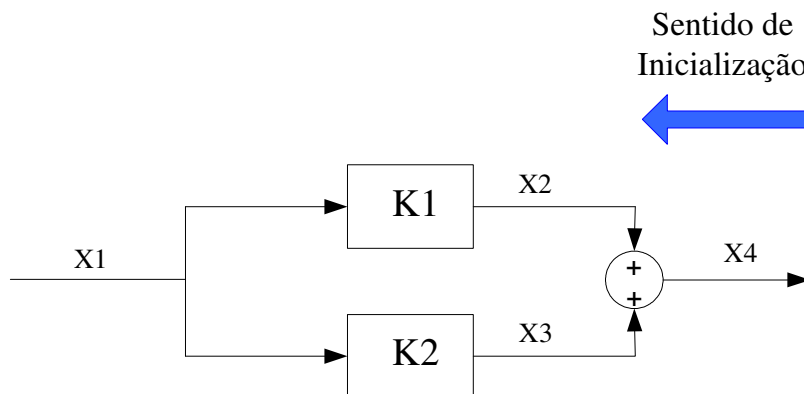


Figura 18: Trecho de um CDU com problemas de inicialização no sentido saída – entrada

Neste caso, deseja-se encontrar uma função que relacione as variáveis X1 e X4 através dos ganhos K1 e K2. Pelo diagrama de blocos mostrado anteriormente, o seguinte sistema de equações pode ser montado:

$$X4 = X2 + X3 \quad (57)$$

$$X2 = K1 \cdot X1 \quad (58)$$

$$X3 = K2 \cdot X1 \quad (59)$$

O que permite determinar a seguinte equação:

$$X1 = \left(\frac{1}{K1 + K2} \right) X4 \quad (60)$$

Com (60), o valor de X1 é facilmente determinado e a atribuição destes valores pode ser feita da mesma forma descrita no subitem IV.2. A Figura 19 mostra o diagrama de blocos contendo a malha de controle adicional que pode ser utilizada neste exemplo.

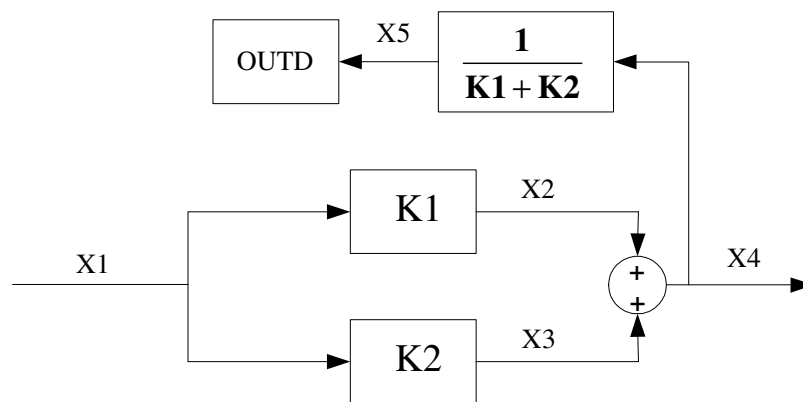


Figura 19: Diagrama de blocos utilizado para resolução do problema de inicialização no sentido saída – entrada.

Finalmente, o valor da variável X5 pode ser atribuído a X1 através do comando DVAL.

IV.4 Resolução do problema de inicialização do RAT de Três Marias

No Capítulo III foi apresentado o caso do regulador de tensão de Três Marias que possui características que não permitem a inicialização automática. O principal problema deste CDU, rerepresentado nas Figuras 20 e 21, reside no fato de que todos os seus blocos somadores possuem duas variáveis desconhecidas e, além disso, apresentam condições iniciais compartilhadas entre si.

Para que se torne mais fácil a dedução de uma relação que viabilize a inicialização automática deste CDU, o diagrama de blocos da Figura 21, que será utilizado como base em deduções posteriores, apresenta todas as suas funções substituídas pelos ganhos de regime permanente de seus blocos. Estes ganhos, cujos valores estão apresentados na Tabela 10, foram nomeados por K_i e serão utilizados na solução deste problema de inicialização.

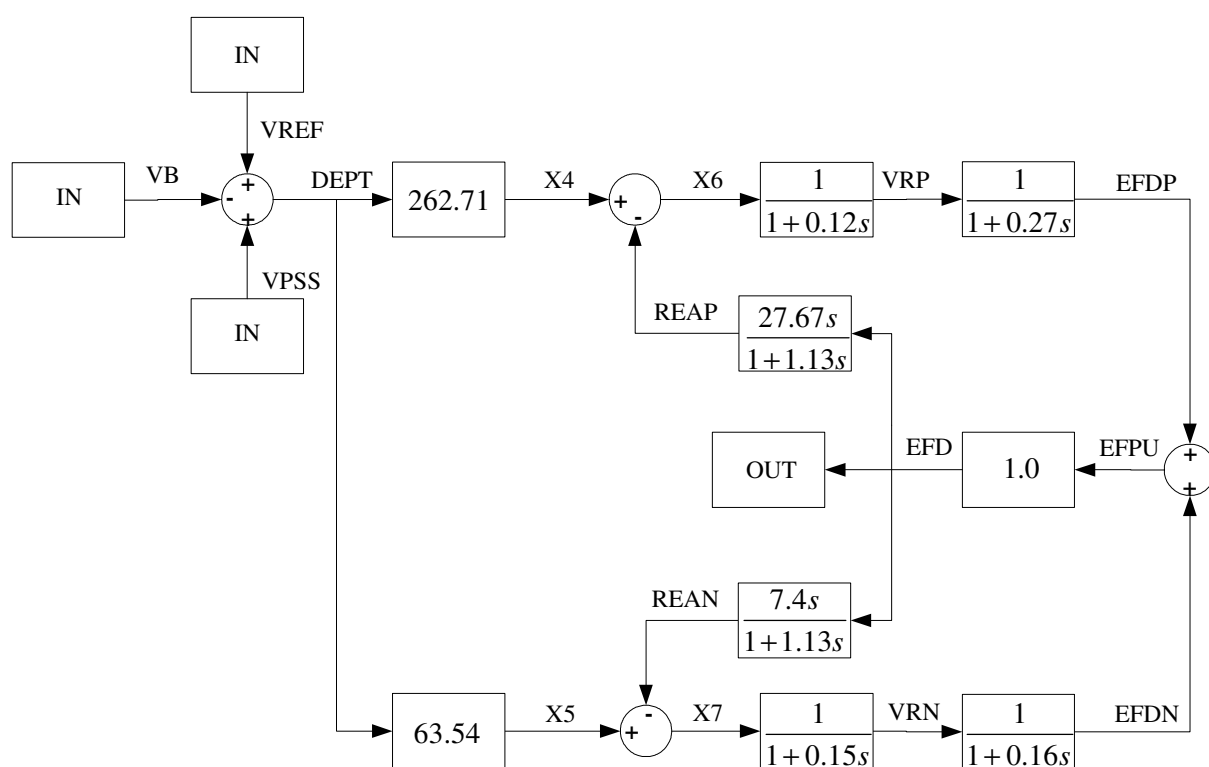


Figura 20: Funções do RAT de Três Marias.

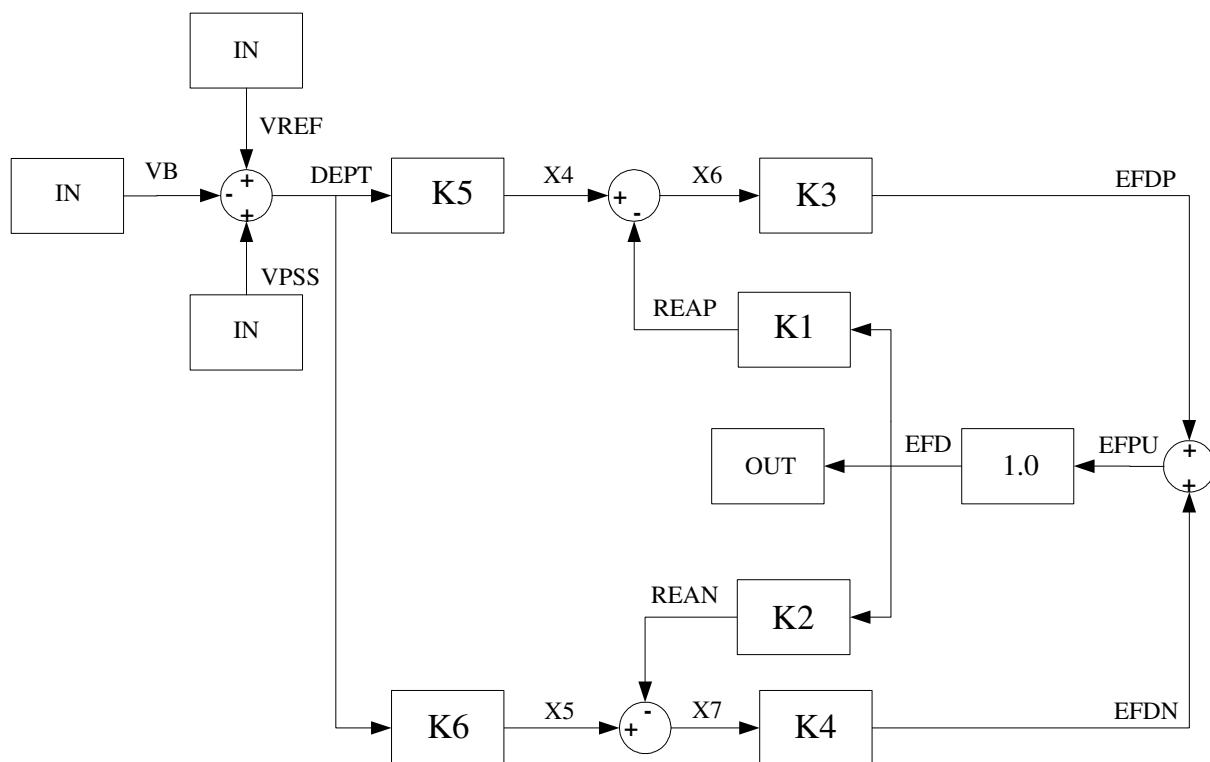


Figura 21: Diagrama de blocos do RAT de Três Marias.

Tabela 10: Valores dos ganhos de regime permanente dos blocos do RAT de Três Marias.

Ganho	Valor do Ganho
K1	0
K2	0
K3	1
K4	1
K5	262.71
K6	63.54

É possível demonstrar de forma bem sucinta, com o auxílio da Figura 21, que obter a solução deste problema sem a utilização de métodos iterativos é completamente viável. Basta apenas encontrar uma função onde a variável DEPT dependa apenas da variável de saída EFD e dos demais ganhos do controlador. Com o valor de DEPT calculado, todas as variáveis do CDU poderão ser corretamente inicializadas.

Parte-se então, para a análise do diagrama de blocos deste CDU objetivando encontrar um sistema de equações que envolva as variáveis desejadas e permita encontrar o valor inicial de DEPT. A partir das equações dos blocos somadores obtém-se:

$$X6 = X4 - K1 \cdot EFD \quad (61)$$

$$X7 = X5 - K2 \cdot EFD \quad (62)$$

$$EFD = K3 \cdot X6 + K4 \cdot X7 \quad (63)$$

De posse destas equações e com o conhecimento de que $X4 = K5 \cdot DEPT$ e $X5 = K6 \cdot DEPT$, a equação (63) pode ser reescrita como:

$$EFD = K3 \cdot [K5 \cdot DEPT - K1 \cdot EFD] + K4 \cdot [K6 \cdot DEPT - K2 \cdot EFD] \quad (64)$$

Finalmente, rearranjando os termos da equação anterior, a relação entre EFD e DEPT pode ser encontrada em função de todos os ganhos de regime permanente envolvidos, onde:

$$DEPT = EFD \left(\frac{1 + K1 \cdot K3 + K2 \cdot K4}{K5 + K6} \right) \quad (65)$$

De forma análoga às soluções apresentadas anteriormente, o valor de DEPT pode ser definido como uma constante ou pode estar relacionada à malha de controle adicional da Figura 22. De qualquer modo, o valor encontrado para a variável DEPT deste regulador corresponde a:

$$DEPT = 1,31116 \left(\frac{1 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1}{262,71 + 63,54} \right) = 0,00402 \quad (66)$$

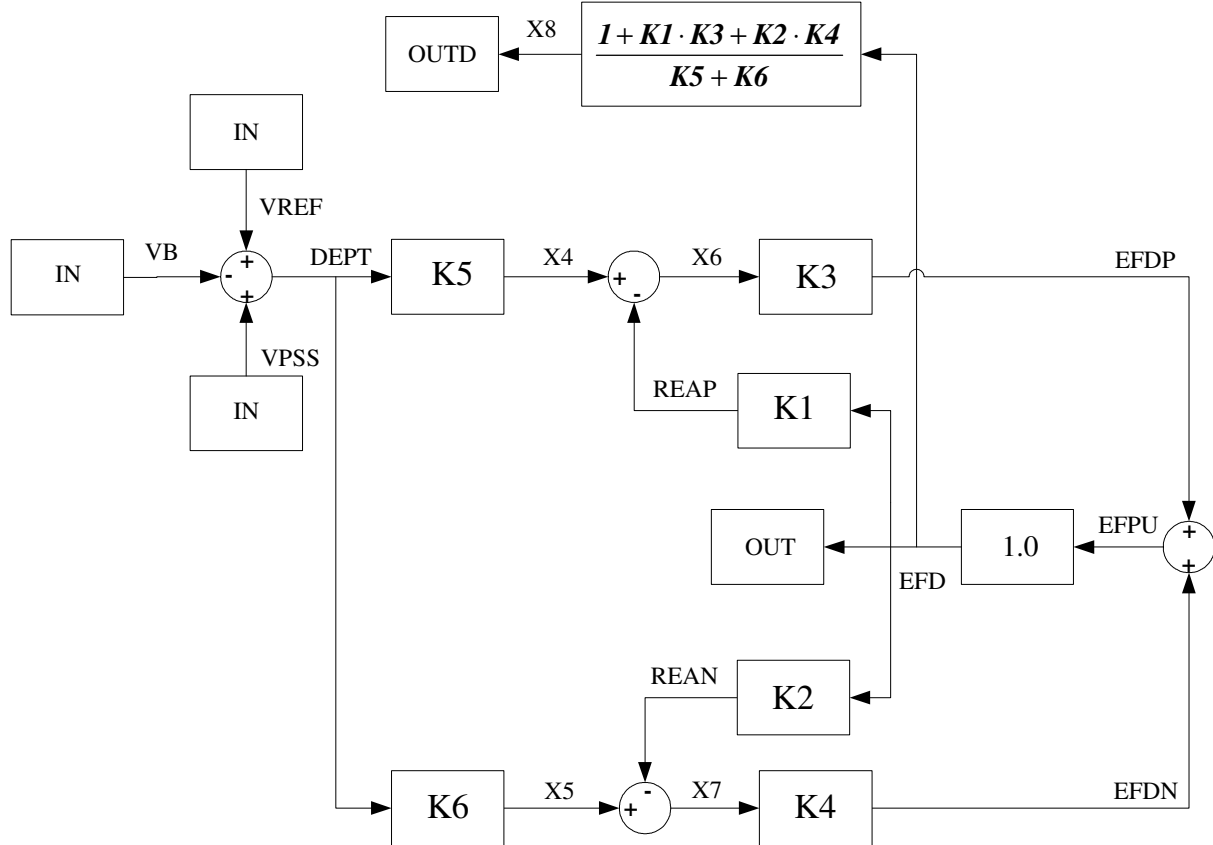


Figura 22: Diagrama de blocos utilizado para resolução do problema de inicialização do caso do RAT de Três Marias.

Após estes passos, os valores das variáveis desconhecidas podem ser determinados e estão mostrados na Tabela 11 que confronta os resultados obtidos pelo método de Newton com os resultados obtidos ao fim do processo de inicialização automática.

Tabela 11: Comparações entre as condições iniciais encontradas pelo método de Newton e o processo de inicialização automática com interferência do usuário.

Tipo do Bloco	Variáveis do Bloco	Condições Iniciais ao final da inicialização automática	Condições Iniciais encontrados pelo método de Newton
IN	VB	1.0200	1.0200
IN	VREF	1.0240	1.0240
IN	VPSS	0.0000	0.0000
SUM	DETP	0.00402	0.00402

GAIN	X4	1.0562	1.0562
SUM	X6	1.0562	1.0562
LDLG	X	1.0562	1.0562
	VRP	1.0562	1.0562
LDLG	X	1.0562	1.0562
	EFD	1.0562	1.0562
GAIN	X5	0.25545	0.25545
SUM	X7	0.25545	0.25545
LDLG	X	0.25545	0.25545
	VRN	0.25545	0.25545
LDLG	X	0.25545	0.25545
	EFDN	0.25545	0.25545
SUM	EFDU	1.3116	1.3116
LDLG	X	-32.1167	-32.1167
	REAP	0.0000	0.0000
LDLG	X	-8.5892	-8.5892
	REAN	0.0000	0.0000
GAIN	EFD	1.3116	1.3116

Vale ressaltar que, neste caso em especial, a interferência do usuário no processo de inicialização possibilitou o cálculo das condições iniciais de todas as variáveis do CDU e que, sem este auxílio, estas condições iniciais jamais poderiam ser determinadas de forma automática pela metodologia adotada.

IV.5 Resultados da Utilização do Comando DVAL

A implementação do comando DVAL no programa PacDyn possibilitou a inicialização de vários CDUs sem a necessidade de recorrer a métodos iterativos para encontrar as condições iniciais de todas as variáveis.

O arquivo de dados dos CDUs fornecidos pelo ONS é composto por um conjunto de 523 controladores, distribuídos em 423 diferentes topologias. Destes 523 controladores, 68 estão desligados e, dessa forma, não participaram deste estudo. Entre os 455 CDUs ativos encontram-se: 189 reguladores automáticos de tensão, 143 reguladores de velocidade, 107 estabilizadores de sistema de potência, 8 equipamentos FACTS e 8 conversores de elos HVDC.

Ao término do processo de inicialização automática, 421 controladores puderam ser inicializados com sucesso sem a interferência do usuário. Os 34 CDUs restantes tiveram suas topologias analisadas separadamente e, sempre que possível, o comando DVAL foi utilizado na definição das condições iniciais desconhecidas.

A partir da inserção de malhas de controle que reproduzem os valores desejados, foram possíveis determinar as condições iniciais de mais 33 controladores. O único controlador que não pode ser inicializado é o regulador de velocidade representado pelo CDU de número 1443. Este controlador apresenta uma complicada topologia que dificulta a obtenção de uma relação capaz de permitir a inicialização automática e foi, portanto, o único caso em que a inicialização só pôde ser feita através do método de Newton.

IV.6 Sumário do Capítulo

Este capítulo contemplou métodos de resolução de problemas na inicialização automática de CDUs através do auxílio prestado pelo usuário do programa PacDyn ao prover os valores de determinadas condições iniciais de variáveis desconhecidas. Foi mostrado, que em muitos casos o processo de inicialização automática pode prosseguir normalmente, convergindo para a inicialização do CDU, se um ou mais valores iniciais forem previamente determinados.

Foram abordados, também, alguns aspectos e os resultados da utilização do comando DVAL, que se mostrou como mais um recurso a ser adotado no cálculo das condições iniciais dos CDUs. Através de casos exemplo, diferentes formas de aplicação deste comando foram apresentadas e permitiram resolver o problema de inicialização do RAT de Três Marias apresentado no Capítulo III.

Capítulo V

Conclusões

V.1 Considerações Gerais

Este trabalho apresentou uma metodologia capaz de realizar o cálculo das condições iniciais dos controladores definidos pelo usuário do programa PacDyn. Ao longo de todo o texto, foram discutidas as principais características referentes à inicialização de diversos tipos de CDU, levando-se em consideração as especificidades de cada um dos blocos dos controladores.

Casos exemplos retirados do banco de dados do ONS foram utilizados para demonstrar, de forma bem didática, como ocorre o processo de inicialização automática. Os resultados obtidos ao final do processo de inicialização serviram para validar a metodologia desenvolvida e alertaram, também, para a existência de casos onde a inicialização bloco a bloco não é possível.

Nos casos onde a inicialização automática só pode ocorrer dada uma interferência do usuário, foi proposta e exemplificada a utilização do comando DVAL, que tem por objetivo auxiliar o processo de inicialização através da definição de valores às condições iniciais desconhecidas que não permitem ser calculadas pelas equações dos blocos às quais elas pertencem.

Com mais este recurso, foi possível obter as condições iniciais de praticamente todas as variáveis de todos CDUs com o acréscimo de apenas 109 linhas no arquivo de dados de controladores que possuía, originalmente, 22235 linhas. Apenas um CDU não permitiu que a inicialização bloco a bloco fosse concluída, o que representa uma quantidade ínfima frente ao número de controladores existentes. Além do mais, para este mesmo caso, houve uma diminuição do número de iterações necessárias para a obtenção de todas as condições iniciais

pois, independentemente do término do processo de inicialização, algumas variáveis puderam ser calculadas facilitando a convergência do método de Newton.

Para a realização deste trabalho foram criadas e implementadas rotinas em linguagem FORTRAN que contribuíram com 2600 linhas de código sem que houvesse comprometimento na velocidade de execução do programa.

V.2 Sugestão para Trabalho Futuro

O algoritmo criado para a realização da inicialização automática dos CDUs permitiu que fossem feitos todos os cálculos necessários para a inicialização bloco a bloco no programa PacDyn. Este tipo de inicialização também ocorre no programa ANATEM com a diferença de que, neste último *software*, não existe a possibilidade de se realizar a inicialização dos CDUs pelo método de Newton. Sendo assim, a utilização do comando DEFVAL é praticamente obrigatória em muitos dos controladores existentes em seus arquivos de entrada de dados.

Esta característica praticamente impedia que fosse feito um algoritmo capaz de compatibilizar os arquivos de dados de controladores utilizados por estes dois programas. Porém, com a implementação de um comando análogo ao DEFVAL no programa PacDyn, torna-se mais fácil compatibilizar estes arquivos visto que, agora, o programa PacDyn poderia se utilizar dos valores iniciais definidos pelo usuário do programa ANATEM.

Portanto, com a metodologia implementada no programa PacDyn torna-se viável a leitura dos CDUs no formato ANATEM. Neste caso, propõe-se como um trabalho futuro a identificação das malhas de controle inativas na análise de estabilidade a pequenos sinais. Para este tipo de análise se torna desnecessária a inclusão das equações dos blocos das malhas inativas na matriz Jacobiana, já que os mesmos só atuam frente a grandes variações internas dos controladores. Isto otimizaria as dimensões da matriz Jacobiana formada a partir dos dados do arquivo de entrada do programa ANATEM.

Apêndice A

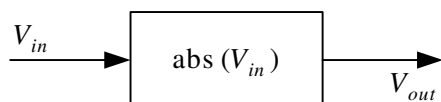
Blocos dos Controladores Definidos pelo Usuário (CDUs) e das Topologias Definidas pelo Usuário (TDUs).

As topologias e os controladores definidos pelo usuário são construídos através das conexões entre blocos elementares. Cada um destes blocos possui uma ou mais variáveis de entrada e apenas uma variável de saída. Além disso, estes blocos podem ser descritos através de uma equação ou um conjunto de equações que regem as relações existentes entre estas variáveis de entrada e a variável de saída.

O objetivo deste apêndice é prover uma breve descrição destes blocos, acentuando suas principais características, assim como descrever as equações que os representam e os parâmetros de entrada que podem ser fornecidos pelo usuário. É importante salientar que algumas destas equações possuem o operador diferencial (d/dt) cuja representação será feita pela letra s .

A.1 Descrição dos Blocos Elementares Existentes

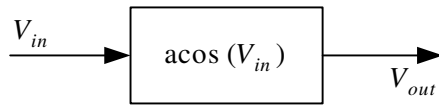
Bloco do valor absoluto (ABS)



Neste bloco, a variável de saída V_{out} é igual ao valor absoluto da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \text{abs} (V_{in}) \tag{A.67}$$

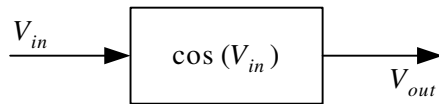
Bloco do arco-cosseno (ACOS)



A variável de saída V_{out} é igual ao arco cosseno da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \text{acos}(V_{in}) \quad (\text{A.68})$$

Bloco do cosseno (COS)



A variável de saída V_{out} é igual ao cosseno da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \text{cos}(V_{in}) \quad (\text{A.69})$$

Bloco de saída constante (CTE)



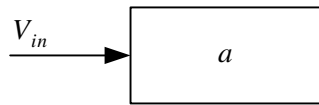
A variável de saída V_{out} é igual a um valor constante dado pelo parâmetro de entrada a .

$$V_{out} = a \quad (\text{A.70})$$

Tabela 12: Parâmetros de entrada do bloco CTE.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	<i>Valor da constante de saída</i>

Bloco de estimativa do valor inicial (DINI)



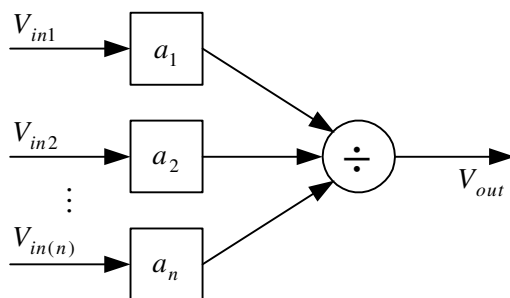
Este bloco permite definir um parâmetro a cujo valor corresponde à estimativa do valor inicial de uma dada variável de entrada V_{in} . O objetivo deste bloco é tornar a inicialização dos CDUs não-lineares mais fácil, pois permite o usuário definir o valor a a ser utilizado na primeira iteração dos cálculos feitos para obtenção do valor inicial de V_{in} .

$$V_{in} = a \tag{A.71}$$

Tabela 13: Parâmetros de entrada do bloco DINI.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	<i>Estimativa do valor inicial</i>

Bloco de divisão ponderada (DIV)



A variável de saída V_{out} é igual à razão entre a primeira variável de entrada V_{in1} , pré-multiplicada pelo seu peso a_1 , e o produtório de todas as demais variáveis de entrada e seus respectivos pesos.

A equação a seguir denota a operação matemática efetuada por este bloco:

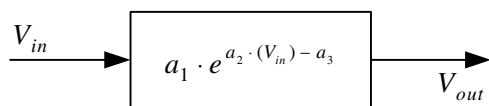
$$V_{out} = \frac{a_1 \cdot V_{in1}}{\prod_{i=2}^n a_i \cdot V_{in(i)}} \quad (\text{A.72})$$

Onde n corresponde ao número de variáveis de entrada.

Tabela 14: Parâmetros de entrada do bloco DIV.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a_i	Peso associado a cada variável de entrada i .

Bloco exponencial (EXP)



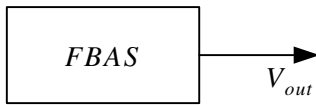
A variável de saída V_{out} é igual à exponencial da variável de entrada V_{in} dados os parâmetros de entrada a_1 , a_2 e a_3 onde:

$$V_{out} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot (V_{in} - a_3)} \quad (\text{A.73})$$

Tabela 15: Parâmetros de entrada do bloco EXP.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a_1	Primeiro parâmetro do bloco.
a_2	Segundo parâmetro do bloco.
a_3	Terceiro parâmetro do bloco.

Bloco de Potência Base de FACTS (FBAS)



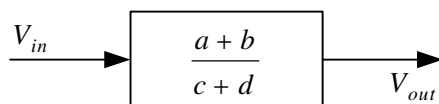
A variável de saída V_{out} é igual ao valor da potência base, em MVA, do equipamento *FACTS* especificado pelos parâmetros de entrada *NB1* e *NB2*. Então:

$$V_{out} = \text{Potência base do equipamento FACTS associado.} \quad (\text{A.74})$$

Tabela 16: Parâmetros de entrada do bloco FBAS.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
<i>NB1</i>	<i>Primeiro número associado ao FACTS.</i>
<i>NB2</i>	<i>Segundo número associado ao FACTS. (somente quando necessário)</i>
<i>NB3</i>	<i>Terceiro número associado ao FACTS. (somente quando necessário)</i>

Bloco Fração (FRAC)



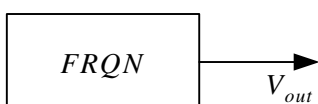
A variável de saída V_{out} é igual à variável de entrada V_{in} multiplicada pelo quociente dos parâmetros de entrada a , b , c e d definidos pelo usuário, onde:

$$V_{out} = \frac{a + b}{c + d} \cdot V_{in} \quad (\text{A.75})$$

Tabela 17: Parâmetros de entrada do bloco FRAC.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	Primeiro parâmetro do numerador.
b	Segundo parâmetro do numerador.
c	Primeiro parâmetro do denominador.
d	Segundo parâmetro do denominador.

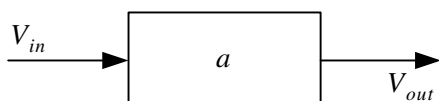
Bloco da Frequência do Sistema CA (FRQN)



A variável de saída V_{out} é igual à frequência do sistema CA em Hertz.

$$V_{out} = \text{Frequência do sistema em Hertz.} \quad (\text{A.76})$$

Bloco de Ganho (GAIN)



A variável de saída V_{out} é igual à variável de entrada V_{in} multiplicada pelo parâmetro de entrada a que representa o ganho deste bloco. Portanto:

$$V_{out} = a \cdot V_{in} \quad (\text{A.77})$$

Tabela 18: Parâmetros de entrada do bloco GAIN.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	Valor do ganho.

Bloco de Entrada (IN)



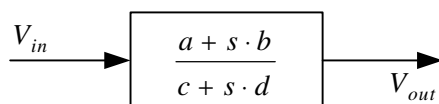
Este bloco faz a ligação entre uma variável interna do controlador (V_{out}) e uma variável externa V_{in} onde:

$$V_{out} = V_{in} \quad (\text{A.78})$$

Tabela 19: Parâmetros de entrada do bloco IN.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
$NB1$	Primeiro número associado ao FACTS.
$NB2$	Segundo número associado ao FACTS. (somente quando necessário)
$NB3$	Terceiro número associado ao FACTS. (somente quando necessário)

Bloco Lead-Lag (LDLG)



A variável de saída V_{out} é igual à variável de entrada V_{in} multiplicada por $\left(\frac{a + s \cdot b}{c + s \cdot d}\right)$, onde s é a variável de Laplace. Portanto, a equação que representa este bloco é dada por:

$$V_{out} = \frac{a + s \cdot b}{c + s \cdot d} \cdot (V_{in}), \quad (d \neq 0) \quad (\text{A.79})$$

A despeito da equação (A.79), este bloco pode ser descrito também através de uma equação algébrica e de uma equação de estado dadas por:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = -\frac{c}{d} \cdot \mathbf{X} + \frac{a \cdot d - c \cdot b}{d^2} \cdot (V_{in}) \quad (\text{A.80})$$

E

$$V_{out} = \mathbf{X} + \frac{b}{d} \cdot (V_{in}) \quad (\text{A.81})$$

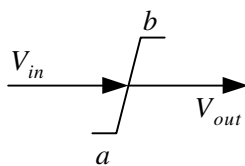
Onde \mathbf{X} é a variável de estado do bloco.

Tabela 20: Parâmetros de entrada do bloco LDLG.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	Primeiro parâmetro do numerador.
b	Segundo parâmetro do numerador.
c	Primeiro parâmetro do denominador.
d	Segundo parâmetro do denominador cujo valor deve ser diferente de zero.

Nota: Para implementar aproximadamente um bloco derivativo, o parâmetro d deve ser inserido com valor igual ou inferior a 0.001s.

Bloco de Limite (LIM)



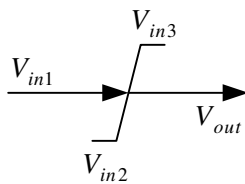
A variável de saída V_{out} é igual à variável de entrada V_{in} limitada entre os valores dos parâmetros a (limite inferior) e b (limite superior).

$$V_{out} = \text{LIM}(V_{in}, a, b) \quad (\text{A.82})$$

Tabela 21: Parâmetros de entrada do bloco LIM.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	Valor do limite inferior.
b	Valor do limite superior.

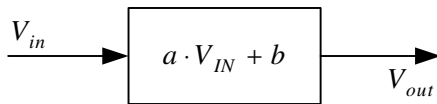
Bloco de Limite Variável (LIMV)



A variável de saída V_{out} é igual à variável de entrada V_{in1} limitada entre os valores das variáveis V_{in2} (limite inferior) e V_{in3} (limite superior).

$$V_{out} = \text{LIM}(V_{in1}, V_{in2}, V_{in3}) \tag{A.83}$$

Bloco de Equação da Retas (LINE)



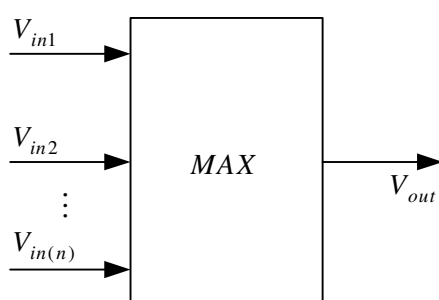
A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada V_{in} aplicada à equação de uma reta cujos coeficientes angular e linear correspondem aos parâmetros de entrada a e b definidos pelo usuário.

$$V_{out} = a \cdot V_{in} + b \tag{A.84}$$

Tabela 22: Parâmetros de entrada do bloco LINE.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	<i>Coeficiente angular da reta.</i>
b	<i>Coeficiente linear da reta.</i>

Bloco do Valor Máximo (MAX)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada ($V_{in1}, V_{in2}, \dots, V_{in(n)}$) com o maior valor.

$$V_{out} = \mathbf{MAX} (V_{in1}, V_{in2}, \dots, V_{in(n)}) \quad (\text{A.85})$$

Onde n corresponde ao número de variáveis de entrada.

Bloco de Mudança de Base - da Base da Máquina para a Base do Sistema (MCST)



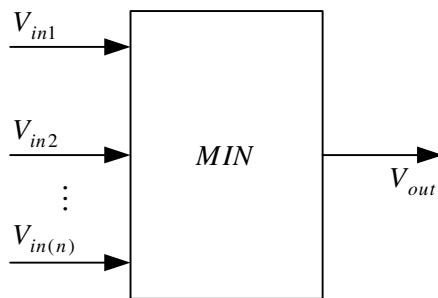
A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada V_{in} multiplicada pela razão entre a base de potência da máquina, especificada pelos parâmetros $NB1$ e $NB2$, e a base de potência do sistema cujo valor mais comumente adotado é 100 MVA.

$$V_{out} = \frac{\text{Base de Potência da Máquina}}{\text{Base de Potência do Sistema}} \cdot V_{in} \quad (\text{A.86})$$

Tabela 23: Parâmetros de entrada do bloco MCST.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
$NB1$	Primeiro número associado à máquina.
$NB2$	Segundo número associado à máquina. (somente quando necessário)

Bloco do Valor Mínimo (MIN)

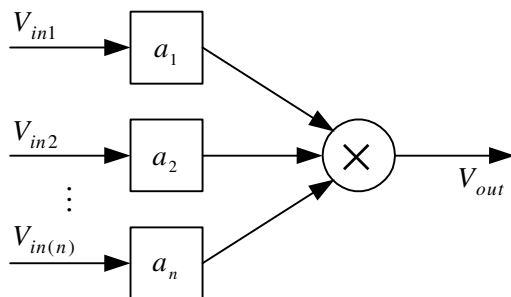


A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada ($V_{in1}, V_{in2}, \dots, V_{in(n)}$) com o menor valor.

$$V_{out} = \mathbf{MIN} (V_{in1}, V_{in2}, \dots, V_{in(n)}) \quad (\text{A.87})$$

Onde n corresponde ao número de variáveis de entrada.

Bloco de Multiplicação Ponderada (MULT)



A variável de saída V_{out} é igual ao produto de todas as variáveis de entrada ($V_{in1}, V_{in2}, \dots, V_{in(n)}$), pré-multiplicadas pelos seus respectivos pesos (a_1, a_2, \dots, a_n), portanto:

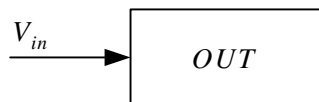
$$V_{out} = \prod_{i=1}^n a_i \cdot V_{in(i)} \quad (\text{A.88})$$

Onde n corresponde à quantidade de variáveis de entrada.

Tabela 24: Parâmetros de entrada do bloco MULT.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a_i	<i>Peso associado a cada variável. (Valor padrão: 1.0)</i>

Bloco de Saída (OUT)



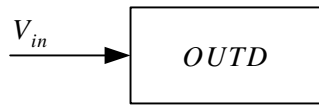
Este bloco faz a ligação entre uma variável interna do controlador V_{in} e uma variável externa V_{out} que será utilizada como sinal externo de algum outro equipamento. Sendo assim:

$$V_{out} = V_{in} \quad (\text{A.89})$$

Tabela 25: Parâmetros de entrada do bloco OUT.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
$NB1$	<i>Primeiro número associado à variável externa.</i>
$NB2$	<i>Segundo número associado à variável externa . (somente quando necessário)</i>
$NB3$	<i>Terceiro número associado à variável externa . (somente quando necessário)</i>

Bloco de Saída de Monitoração (OUTD)



Este bloco faz a ligação entre uma variável interna do controlador V_{in} e uma variável externa V_{out} que é utilizada para propósitos de monitoração, visto que esta variável não é utilizada como sinal externo para entrada de nenhum outro equipamento.

$$V_{out} = V_{in} \quad (\text{A.90})$$

Tabela 26: Parâmetros de entrada do bloco OUTD.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
<i>NB1</i>	<i>Primeiro número associado à variável externa.</i>
<i>NB2</i>	<i>Segundo número associado à variável externa . (somente quando necessário)</i>
<i>NB3</i>	<i>Terceiro número associado à variável externa . (somente quando necessário)</i>

Bloco Base de Potência da Máquina (PBAS)



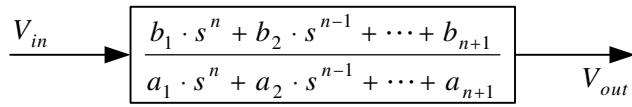
A variável de saída V_{out} é igual ao valor da base de potência da máquina (em MVA) especificada pelos parâmetros *NB1* e *NB2*.

$$V_{out} = \text{Base de Potência da Máquina (MVA)} \quad (\text{A.91})$$

Tabela 27: Parâmetros de entrada do bloco PBAS.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
NB1	Primeiro número associado à máquina.
NB2	Segundo número associado à máquina. (somente quando necessário)

Bloco Polinomial (POLn)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada V_{in} multiplicada pela razão entre duas funções polinomiais no domínio s (Variável de Laplace).

A maior ordem admitida para as funções deste bloco é quatro, simplesmente pelo fato de que a quantidade de campos para os dados de entrada é limitada. Portanto, pode-se definir a equação deste bloco como:

$$V_{out} = \frac{b_1 \cdot s^n + b_2 \cdot s^{n-1} + \dots + b_{n+1}}{a_1 \cdot s^n + a_2 \cdot s^{n-1} + \dots + a_{n+1}} \cdot V_{in} \quad (\text{A.92})$$

Reescrevendo (A.92) na forma matricial encontra-se:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{a_2}{a_1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{a_3}{a_1} & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ -\frac{a_{n+1}}{a_1} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \frac{b_2}{a_1} - \frac{b_1 \cdot a_2}{a_1^2} \\ \frac{b_3}{a_1} - \frac{b_1 \cdot a_3}{a_1^2} \\ \vdots \\ \frac{b_{n+1}}{a_1} - \frac{b_1 \cdot a_{n+1}}{a_1^2} \end{bmatrix} \cdot (V_{in}) \quad (\text{A.93})$$

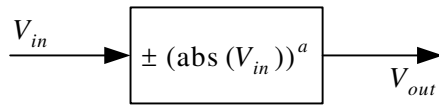
$$V_{out} = [I \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \cdot \mathbf{X} + \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \cdot (V_{in}) \quad (\text{A.94})$$

Onde \mathbf{X} é o vetor de variáveis de estado.

Tabela 28: Parâmetros de entrada do bloco POLn.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
b_n	<i>Coeficiente do numerador associado ao termo de maior ordem (n) do bloco polinomial. (maior valor = 4). Este valor deve ser diferente de zero.</i>
b_{n-1}	<i>Coeficiente do numerador associado ao termo de ordem (n-1) do bloco polinomial.</i>
b_{n-2}	<i>Coeficiente do numerador associado ao termo de ordem (n-2) do bloco polinomial.</i>
b_{n-3}	<i>Coeficiente do numerador associado ao termo de ordem (n-3) do bloco polinomial. (Apenas para polinômios de terceira e quarta ordens)</i>
b_{n-4}	<i>Coeficiente do numerador associado ao termo de ordem (n-4) do bloco polinomial. (Apenas para polinômios de quarta ordem)</i>
a_n	<i>Coeficiente do denominador associado ao termo de maior ordem (n) do bloco polinomial. (maior valor = 4).</i>
a_{n-1}	<i>Coeficiente do denominador associado ao termo de ordem (n-1) do bloco polinomial.</i>
a_{n-2}	<i>Coeficiente do denominador associado ao termo de ordem (n-2) do bloco polinomial.</i>
a_{n-3}	<i>Coeficiente do denominador associado ao termo de ordem (n-3) do bloco polinomial. (Apenas para polinômios de terceira e quarta ordens)</i>
a_{n-4}	<i>Coeficiente do denominador associado ao termo de ordem (n-4) do bloco polinomial. (Apenas para polinômios de quarta ordem)</i>

Bloco de Potenciação (POW)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada V_{in} elevada à potência especificada pelo parâmetro de entrada a definido pelo usuário.

$$V_{out} = \pm(\text{abs}(V_{in}))^a \quad (\text{A.95})$$

Tabela 29: Parâmetros de entrada do bloco POW.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	Expoente da variável de entrada.

Nota: O sinal adotado para a variável de saída V_{out} é o mesmo especificado para a variável de entrada V_{in} . Esta premissa garante que a função seja biunívoca.

Bloco de Sinal de Referência (REF)



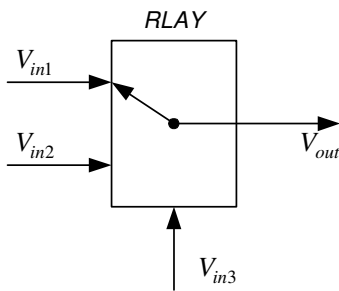
Este bloco produz um sinal de referência constante, cujo valor é computado iterativamente, de forma a fazer com que as variáveis de saída do controlador atinjam seus valores de regime permanente.

Algumas destas referências são sinais pertencentes a determinados equipamentos como por exemplo VREF (tensão de referência do regulador automático de tensão) e XREF (variável de referência de equipamento FACTS). É interessante notar que é possível modelar um sinal de referência através da utilização de um bloco de entrada (IN) seguido pelos nomes das variáveis externa e interna (vide descrição do bloco de entrada).

Este bloco apresenta, então, a seguinte equação:

$$\text{Saída do controlador} = \text{Valor de regime permanente da variável} \quad (\text{A.96})$$

Bloco do Tipo Relé (RLAY)



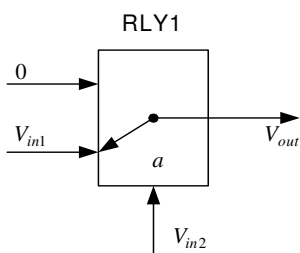
A variável de saída V_{out} corresponde à primeira variável de entrada V_{in1} se a terceira variável V_{in3} for igual ou menor do que zero. Caso contrário, a variável de saída V_{out} é igual à segunda variável de entrada V_{in2} .

Pode-se seguir, então, a seguinte lógica para determinar a saída do bloco *RLAY*:

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in3} \leq 0, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in1} \end{aligned} \tag{A.97}$$

$$\begin{aligned} & \text{Senão} \\ & V_{out} = V_{in2} \end{aligned} \tag{A.98}$$

Bloco do Tipo Relé (RLY1)



A variável de saída V_{out} corresponde à primeira variável de entrada V_{in1} se a segunda variável V_{in2} for igual ao parâmetro de entrada a definido pelo usuário. Caso contrário, a variável de saída é igual a zero.

Da mesma forma como foi descrito o bloco *RLAY*, a variável de saída deste bloco pode ser determinada pela seguinte lógica de equações:

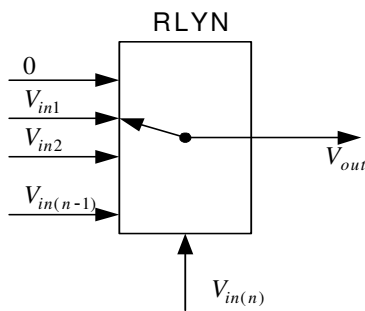
$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in2} = a, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in1} \end{aligned} \tag{A.99}$$

$$\begin{aligned} & \text{Senão} \\ & V_{out} = 0 \end{aligned} \tag{A.100}$$

Tabela 30: Parâmetros de entrada do bloco RLY1.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a	Parâmetro de entrada.

Bloco do Tipo Relé (RLYN)



De uma forma mais geral, a variável de saída V_{out} deste bloco corresponde à variável de entrada $V_{in(n-1)}$ se a variável $V_{in(n)}$ for igual a $n-1$, onde n é o número de variáveis de entrada.

Deste modo, a variável de saída V_{out} corresponde à primeira ou à segunda variáveis de entrada V_{in1} ou V_{in2} se a variável $V_{in(n)}$ for igual a 1(um) ou 2(dois) respectivamente.

Caso nenhuma das condições possa ser satisfeita, o valor da variável de saída V_{out} é igual a zero.

Para definição do valor da variável de saída V_{out} a seguinte lógica pode ser utilizada:

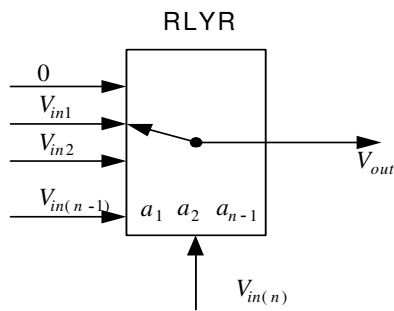
$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in(n)} = 1, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in1} \end{aligned} \tag{A.101}$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in(n)} = 2, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in2} \end{aligned} \tag{A.102}$$

⋮

$$\begin{aligned} & \text{Senão} \\ & V_{out} = 0 \end{aligned} \tag{A.103}$$

Bloco do Tipo Relé (RLYR)



A variável de saída V_{out} corresponde à primeira variável de entrada V_{in1} se o valor da variável $V_{in(n)}$ for igual ou menor do que o valor do parâmetro de entrada a_1 . Da mesma forma, esta variável corresponderá ao valor da variável V_{in2} caso $V_{in(n)}$ seja menor ou igual ao parâmetro de entrada a_2 . Generalizando esta regra, a variável de saída V_{out} corresponde à variável de entrada $V_{in(n-1)}$ se a variável $V_{in(n)}$ for menor ou igual ao valor do parâmetro a_{n-1} . Se nenhuma das condições for satisfeita, o valor de V_{out} é igual a zero.

Desta forma, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in(n)} \leq a_1, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in1} \end{aligned} \tag{A.104}$$

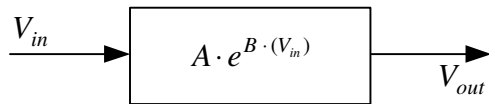
$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in(n)} \leq a_2, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in2} \end{aligned} \tag{A.105}$$

⋮

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in(n)} \leq a_{n-1}, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{in(n-1)} \end{aligned} \tag{A.106}$$

$$\begin{aligned} & \text{Senão} \\ & V_{out} = 0 \end{aligned} \tag{A.107}$$

Bloco de Saturação (SAT)



A variável de saída V_{out} é igual à exponencial da variável de entrada V_{in} em função das constantes A e B calculadas a partir dos parâmetros de entrada a_1 , a_2 , a_3 e a_4 definidos pelo usuário.

A relação entre as variáveis de entrada e saída é dada por:

$$V_{out} = A \cdot e^{B \cdot V_{in}} \tag{A.108}$$

Onde

$$\begin{cases} a_2 = A \cdot e^{B \cdot a_1} \\ a_4 = A \cdot e^{B \cdot a_2} \end{cases} \tag{A.109}$$

E as constantes A e B podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$A = e^{\frac{a_2}{B \cdot a_1}} \tag{A.110}$$

E

$$B = \frac{\ln\left(\frac{a_2}{a_4}\right)}{a_1 - a_3} \tag{A.111}$$

Tabela 31: Parâmetros de entrada do bloco SAT.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a_1	Primeiro parâmetro de entrada.
a_2	Segundo parâmetro de entrada.
a_3	Terceiro parâmetro de entrada.
a_4	Quarto parâmetro de entrada.

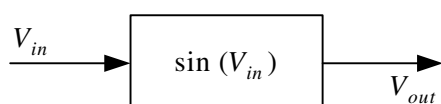
Bloco da Potência Base do Sistema CA (SBAS)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor da potência base, em MVA, do sistema.

$$V_{out} = \text{Potência Base do Sistema.} \quad (\text{A.112})$$

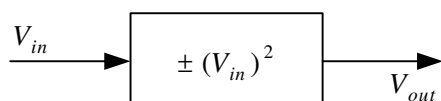
Bloco Seno (SIN)



A variável de saída V_{out} é igual ao seno, dado em radianos, da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \sin (V_{in}) \quad (\text{A.113})$$

Bloco da Potência ao Quadrado (SQR)

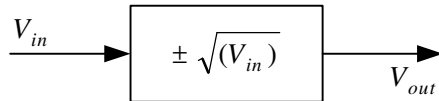


O valor da variável de saída V_{out} é igual ao quadrado do valor da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \pm (V_{in})^2 \quad (\text{A.114})$$

Nota: O sinal adotado para a variável de saída V_{out} é o mesmo especificado para a variável de entrada V_{in} . Esta premissa garante que a função seja biunívoca.

Bloco da Raiz Quadrada (SQRT)



O valor da variável de saída V_{out} é igual à raiz quadrada do valor da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \pm \sqrt{(V_{in})} \quad (\text{A.115})$$

Nota: O sinal adotado para a variável de saída V_{out} é o mesmo especificado para a variável de entrada V_{in} . Esta premissa garante que a função seja biunívoca.

Bloco de Mudança de Base – da Base do Sistema para a Base da Máquina (STMC)



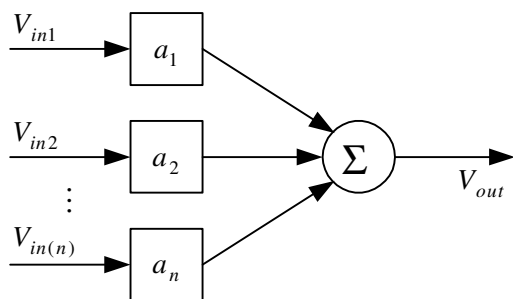
A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada V_{in} multiplicada pela razão entre a base de potência do sistema (geralmente 100 MVA) e a base de potência da máquina especificada pelos parâmetros $NB1$ e $NB2$.

$$V_{out} = \frac{\text{Base de Potência do Sistema}}{\text{Base de Potência da Máquina}} \cdot V_{in} \quad (\text{A.116})$$

Tabela 32: Parâmetros de entrada do bloco STMC.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
<i>NB1</i>	<i>Primeiro número associado à máquina.</i>
<i>NB2</i>	<i>Segundo número associado à máquina. (somente quando necessário)</i>

Bloco de Soma Ponderada (SUM)



A variável de saída V_{out} é igual ao somatório de todas as variáveis de entrada pré-multiplicadas por seus respectivos pesos a_n .

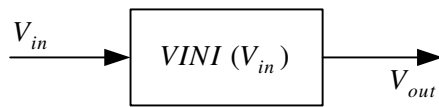
$$V_{out} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot (V_{in(i)}) \quad (\text{A.117})$$

Onde n corresponde ao número de variáveis de entrada.

Tabela 33: Parâmetros de entrada do bloco SUM.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
a_i	<i>Peso associado a cada variável. (Valor padrão: 1.0)</i>

Bloco do Valor Inicial (VINI)



Este bloco define um valor de referência que pode ser igual ao valor de uma variável interna ou externa ao controlador. Se V_{in} for uma variável interna, o bloco não possui parâmetros de entrada. Caso contrário, é necessário definir o valor dos parâmetros de entrada que estarão associados à variável externa.

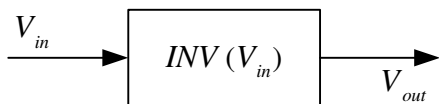
$$V_{out} = VINI(V_{in}) \quad (A.118)$$

Onde $VINI(V_{in})$ é igual ao valor inicial de V_{in} .

Tabela 34: Parâmetros de entrada do bloco VINI.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
<i>NB1</i>	<i>Primeiro número associado à variável externa.</i>
<i>NB2</i>	<i>Segundo número associado à variável externa. (somente quando necessário)</i>
<i>NB3</i>	<i>Terceiro número associado à variável externa. (somente quando necessário)</i>

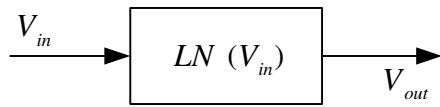
Bloco do Valor Inverso (INV)



A variável de saída V_{out} é igual ao inverso do valor da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \frac{1}{V_{in}}, V_{in} \neq 0 \quad (A.119)$$

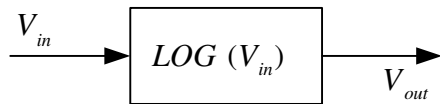
Bloco do Logaritmo Natural (LN)



A variável de saída V_{out} é igual ao logaritmo natural da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \log_e(V_{in}), V_{in} > 0. \quad (\text{A.120})$$

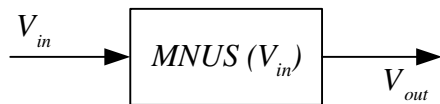
Bloco do Logaritmo de Base 10 (LOG)



A variável de saída V_{out} é igual ao logaritmo de base 10 da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \log_{10}(V_{in}), V_{in} > 0. \quad (\text{A.121})$$

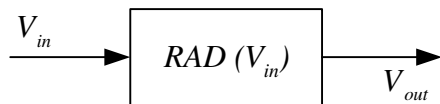
Bloco de Inversão de Sinal (MNUS)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor negativo da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = -V_{in} \quad (\text{A.122})$$

Bloco de Conversão de Graus para Radianos (RAD)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada V_{in} em radianos.

$$V_{out} = \frac{\pi}{180} V_{in} \quad (\text{A.123})$$

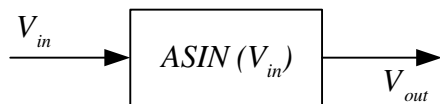
Bloco de Conversão de Radianos para Graus (DEG)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada V_{in} em graus.

$$V_{out} = \frac{180}{\pi} V_{in} \quad (\text{A.124})$$

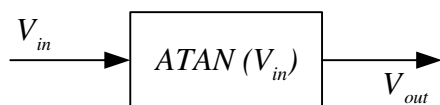
Bloco Arco-seno (ASIN)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor do arco seno, em radianos, da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \text{asin}(V_{in}) \quad (\text{A.125})$$

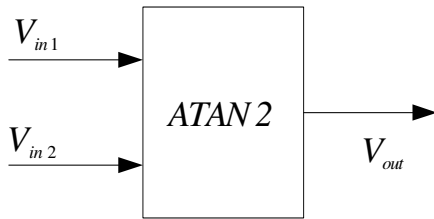
Bloco Arco Tangente (ATAN)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor do arco tangente, em radianos, da variável de entrada V_{in} .

$$V_{out} = \text{atan}(V_{in}), \text{ onde } -\frac{\pi}{2} < V_{out} < \frac{\pi}{2}. \quad (\text{A.126})$$

Bloco Arco Tangente 2 (ATAN2)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor do arco tangente, em radianos, da razão entre as variáveis de entrada V_{in1} e V_{in2} onde:

$$V_{out} = atan2(V_{in1}, V_{in2}) = atan\left(\frac{V_{in1}}{V_{in2}}\right) \quad (\text{A.127})$$

Vale salientar que este bloco não só calcula o valor do arco tangente como também é capaz de determinar o quadrante no qual a variável de saída se encontra. Para tal, a seguinte lógica é utilizada:

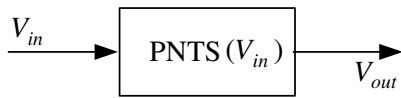
$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in2} \neq 0, \text{ então} \\ & -\pi \leq V_{out} \leq \pi \end{aligned} \quad (\text{A.128})$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in2} = 0 \text{ e } V_{in1} > 0, \text{ então} \\ & V_{out} = \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (\text{A.129})$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in2} = 0 \text{ e } V_{in1} < 0, \text{ então} \\ & V_{out} = -\frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (\text{A.130})$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in2} = 0 \text{ e } V_{in1} = 0, \text{ então} \\ & V_{out} = V_{out}(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (\text{A.131})$$

Bloco de Interpolação (PNTS)



A variável de saída V_{out} é igual ao valor da variável de entrada V_{in} aplicada à equação da reta que interpola certos parâmetros de entrada definidos pelo usuário.

Estes parâmetros de entrada formam pares ordenados (x_i, y_i) que são utilizados na obtenção da equação da reta necessária para o cálculo do valor da variável V_{out} . São utilizados os pares ordenados cujos valores de x_i e x_{i+1} compõem um intervalo que compreenda o valor de V_{in} .

Para este cálculo é utilizado o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned} & \text{Se } X_i \leq V_{in} < X_{i+1}, i = 1, n-1, \text{ então} \\ & V_{out} = Y_i + \frac{Y_{i+1} - Y_i}{X_{i+1} - X_i} (V_{in} - X_i) \end{aligned} \quad (\text{A.132})$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in} < X_1, \text{ então} \\ & V_{out} = Y_1 + \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (V_{in} - X_1) \end{aligned} \quad (\text{A.133})$$

$$\begin{aligned} & \text{Se } V_{in} \geq X_n, \text{ então} \\ & V_{out} = Y_{n-1} + \frac{Y_n - Y_{n-1}}{X_n - X_{n-1}} (V_{in} - X_{n-1}) \end{aligned} \quad (\text{A.134})$$

Tabela 35: Parâmetros de entrada do bloco PNTS.

Parâmetros de entrada do bloco	Descrição
x_i	Valor da abcissa i .
y_i	Valor da ordenada i .

Bibliografia

[1] Manual do Usuário – PacDyn – V7.0 Dec. 2006.

[2] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Base de dados de estabilidade. Disponível em: <http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_perturbacoes.aspx>. Acesso em: 23 nov. 2007.

[3] Ogata, Katsuhiko. “Engenharia de Controle Moderno”, 4 ed. São Paulo, SP, Editora: Pearson/Prentice Hall, 2003. p.19-22

[4] RANGEL, Ricardo Diniz; GOMES JUNIOR, Sergio. Material Didático do Curso de Treinamento do Programa ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos. Maio, 2000. p. 73-80.