



UNIFEI

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

André Snaider

**Validação da Modelagem de Carga dos Sistemas Elétricos com Foco no
Fenômeno de FIDVR Através da Aplicação de Simulação Dinâmica Híbrida**

Itajubá, Minas Gerais

2025

André Snaider

**Validação da Modelagem de Carga dos Sistemas Elétricos com Foco no
Fenômeno de FIDVR Através da Aplicação de Simulação Dinâmica Híbrida**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Antonio Carlos Zambroni de Souza

Coorientador: Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino

Itajubá, Minas Gerais

2025

André Snaider

Validação da Modelagem de Carga dos Sistemas Elétricos com Foco no Fenômeno de FIDVR Através da Aplicação de Simulação Dinâmica Híbrida

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 22 de dezembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Antonio Carlos Zambroni de Souza
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Benedito Donizeti Bonato
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Dr. Luiz Cláudio de Araújo Ferreira
Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Antonio Carlos Zambroni de Souza
Orientador

Itajubá, Minas Gerais, 2025.

Dedico este trabalho à minha família,
meu alicerce e minha maior inspiração.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação é o testemunho da minha resiliência e da vitória em cada etapa superada. Este marco reflete, além do esforço pessoal, a força inestimável do apoio e incentivo recebidos. Por terem sido decisivos em momentos cruciais, é uma honra expressar aqui o meu mais sincero agradecimento a seguir.

Aos meus amados pais, Samuel e Alegria, dedico a mais profunda gratidão. Este trabalho é o resultado direto do amor e do apoio incondicional. Seu esforço para me proporcionar a melhor educação possível pavimentou esta jornada. Seu suporte inabalável e presença constante nos momentos difíceis foram a força que garantiu minha superação. Por tudo, e principalmente pelo amor, o meu eterno muito obrigado.

Alessandra, meu amor infinito, este trabalho é, na essência, nosso. Você é minha maior fonte de inspiração, meu motivo de orgulho e o alicerce da minha vida. Seu apoio, amor e a convicção inabalável com que sempre acreditou em mim foram o combustível para persistir nas fases mais exigentes. Por estar sempre ao meu lado e pelo seu amor, dedico a você todo o sucesso desta jornada.

Aos meus amados filhos, David e Rafael, dedico o meu mais profundo amor e carinho incondicional. Vocês são a minha maior e mais pura fonte de energia para tudo. Por vocês e para vocês, esta conquista ganha seu verdadeiro significado.

À minha amada irmã, Marcelle. Você é minha referência e a materialização do amor incondicional em minha jornada. Sua inspiração foi essencial para a minha determinação. Minha eterna gratidão.

Aos meus orientadores Antonio Carlos Zambroni de Souza e Antonio Felipe da Cunha de Aquino. Vocês foram anjos que D's colocou no meu caminho. Sua parceria, dedicação, inesgotável paciência e carinho foram a luz desta jornada. Por terem acreditado em mim, garantiram a superação e a feliz conclusão desta dissertação. Minha eterna gratidão.

Ao meu sogro Claudio Roberto e à minha sogra Sarita. Agradeço pelo apoio oferecido durante este período de intensa dedicação. Sua generosidade e amor foram fundamentais para a tranquilidade e o equilíbrio que a minha família precisou para atravessar esta jornada. Meu muito obrigado.

Aos meus colegas do ONS, pelo companheirismo, pelas trocas de conhecimento e pelo ambiente de aprendizado contínuo que tanto contribuiu para minha formação profissional e acadêmica.

RESUMO

O planejamento, estabilidade e segurança, dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) dependem criticamente da precisão das simulações dinâmicas, que, por sua vez, exigem uma representação fidedigna de seus componentes. Ocorre que a crescente complexidade da carga moderna, rica em motores e eletrônicos, tornou os modelos estáticos simplificados (como o ZIP) insuficientes para capturar a dinâmica essencial, comprometendo a robustez das análises. Essa limitação é particularmente evidente na incapacidade de representar o Atraso na Recuperação da Tensão Pós-Falta (FIDVR - *Fault-Induced Delayed Voltage Recovery*), um fenômeno crítico em áreas com alta concentração de motores de indução que, após uma falta, provoca um afundamento sustentado de tensão, impulsionado pelo *stall* dos motores e elevando perigosamente a demanda de corrente, com sério risco à estabilidade. Embora a parametrização de modelos dinâmicos seja tradicionalmente dispendiosa, o advento das Unidades de Medição Fasorial (PMUs) oferece a oportunidade de utilizar dados de sincrofasores de alta resolução obtidos durante perturbações naturais. Diante disso, este trabalho objetiva demonstrar e avaliar a Simulação Dinâmica Híbrida como uma ferramenta eficaz de parametrização e validação de modelos dinâmicos de carga em SEP, focada na análise do FIDVR. Os objetivos específicos incluem a implementação desta metodologia, que combina sinergicamente dados de PMUs com modelos computacionais, e sua aplicação em uma região crítica do Sistema Interligado Nacional (SIN). A pesquisa compara os resultados com os modelos estáticos (ZIP) e modelos compostos (ZIP+MI), confirmando a relevância dos modelos dinâmicos e propondo um caminho mais eficiente e preciso para aprimorar a segurança e a operação dos sistemas de potência.

Palavras-chave: Simulação Dinâmica Híbrida, Modelos de Carga, Validação de Modelos, Atraso na Recuperação da Tensão Pós-Falta (FIDVR), Estabilidade, Motor de Indução, ZIP, PMU, Ar-Condicionado

ABSTRACT

The planning, stability and safety of modern Electric Power Systems (EPS) critically depend on the accuracy of dynamic simulations, which require a faithful representation of their components. However, the increasing complexity of modern load, heavily featuring motors and electronic devices, has rendered simplified static load models (such as the ZIP model) insufficient to capture the essential intrinsic dynamics, thus compromising the robustness of analyses. This limitation is particularly evident in the inability to adequately represent Fault-Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR), a critical phenomenon in areas with high induction motor concentration. Following a fault, FIDVR causes a sustained voltage sag and slow recovery, driven by motor stall, which dangerously increases current demand and poses a severe threat to voltage stability. While dynamic model parameterization is traditionally costly, the advent of Phasor Measurement Units (PMUs) provides an opportunity to use high-resolution synchrophasor data captured during natural system disturbances. The main objective of this work is, therefore, to demonstrate and evaluate Hybrid Dynamic Simulation as an effective tool for the parameterization and validation of dynamic load models in PES, focusing on the analysis of voltage instability phenomena like FIDVR. Specific objectives include the implementation of this methodology, which synergistically combines PMU data with detailed computational models, and its application in a critical region of the Brazilian National Interconnected System (SIN). The research compares the results against static (ZIP) models, confirming the relevance of dynamic models and proposing a more efficient and precise path toward enhancing the safety and operation of power systems.

Keywords: Hybrid Dynamic Simulation, Load Models, Model Validation, FIDVR (Fault-Induced Delayed Voltage Recovery), Stability, Induction Motor, ZIP, PMU (Phasor Measurement Unit), Air Conditioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Comportamento da carga eletrônica [7]	28
Figura 2-2 – Estrutura do Modelo Composto de Carga (CLM) [9]	32
Figura 3-1- Perfil de tensão típico durante um evento de FIDVR - [5], [10], [11], [12].....	36
Figura 3-2 – FIDVR – Sul da Califórnia (EUA) [13].....	38
Figura 3-3 FIDVR – Maçambará/RS (Brasil) [14].....	39
Figura 3-4 - FIDVR – Rio Branco e Porto Velho (AC/RN) Brasil [14].....	40
Figura 3-5 - Perda de Sincronismo – Rio Branco e Porto Velho (AC/RN) - Brasil [14].....	41
Figura 4-1 Diagrama Conceitual de Simulação Dinâmica Híbrida - SDH	43
Figura 4-2 Interpolação de Amostras Registradas no Processo de uma SDH	45
Figura 4-3 – Fluxograma da SDH – Método Direto.....	46
Figura 4-4 Esquema do Método do Transformador Defasador [17], [20].....	47
Figura 4-5 Esquema do Método do Gerador de Resposta Rápida [16], [20].	48
Figura 4-6 Esquema do Método da Impedância Variável [20].	48
Figura 4-7 Esquema do Método das Potências Injetadas [20].	49
Figura 4-8 - Situação da área Acre/Rondônia no minuto anterior à ocorrência do dia 13/09/2022 [21]	51
Figura 4-9 - Esquema do Método da CDC [18]	51
Figura 4-10 - Substituição do <i>back-to-back</i> (BTB) por uma carga	52
Figura 4-11 - Fluxograma da SDH pelo método da CDC	52
Figura 4-12 - Diagrama de Blocos - CDU da CDC no Anatem	53
Figura 4-13 - Tensão SDH(CDC) x PMU	54
Figura 4-14 - Frequência SDH(CDC) x PMU	54
Figura 5-1 Tensão [SE Rio Branco 230 kV] - ZIP	57
Figura 5-2 Tensões [SE Rio Branco 230 kV] – ZIP+MI	57
Figura 5-3 Rede reduzida para a SDH (região de Rio Branco)	58
Figura 5-4 Diagrama de Blocos - CDU do Regulador de Tensão para SDH no Anatem	60

Figura 5-5 Diagrama de Blocos - CDU do Regulador de Velocidade para SDH no Anatem	60
Figura 5-6 Tensão na SE Rio Branco 230 kV	61
Figura 5-7 Potências Ativas na SE Rio Branco 230 kV	61
Figura 5-8 Potências Reativas na SE Rio Branco 230 kV	62
Figura 5-9 Comparação de Tempos de Processamento	63
Figura 5-10 Carga Ativa [SE Rio Branco]	66
Figura 5-11 Esquema dos Cenários da Etapa 2 - Modelo Composto.....	68
Figura 5-12 – Modelo Anarede - Motor de Indução [25]	69
Figura 5-13 Modelo Anatem – Motor de Indução [26].....	69
Figura 5-14 FLXA – 30%MI	71
Figura 5-15 FLXR – 30%MI	72
Figura 5-16 FLXA – 40%MI	72
Figura 5-17 FLXR – 40%MI	73
Figura 5-18 FLXA – 50%MI	73
Figura 5-19 FLXR – 50%MI	74
Figura 5-20 Mapa de Disperção das IDTs - FLXA.....	78
Figura 5-21 Mapa de Disperção das IDTs - FLXR.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de Modelos de Carga [6], [7].....	23
Tabela 2 - Valores típicos de expoentes utilizados no modelo exponencial de carga [7].....	26
Tabela 3 – Demais Casos Notáveis de FIDVR [15].....	41
Tabela 4 - Análise de Discrepâncias – IDT ETAPA 1	66
Tabela 5 – Parâmetros Típicos – Ar Condicionado : [22]	70
Tabela 6 - Análise de Discrepâncias – IDT ETAPA 2	75
Tabela 7 – Variações de Parâmetros MODELO ZIP	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Anarede	Programa de Análise de Redes
Anatem	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
BTB	Back-To-Back
CDU	Controlador Definido pelo Usuário
CLM	<i>Composite Load Model</i>
ERAC	Esquema Regional de Alívio de Carga
FIDVR	Fault-Induced Delayed Voltage Recovery
IEEE	IEEE The Institute of Electrical and Electronics Engineers
MI	Motor de Indução
NERC	North American Electric Reliability Corporation
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDC	Concentrador de dados fasoriais
PMU	Unidade de Medição Fasorial
PPS	Proteção de Perda de Sincronismo
RT	Reguladores de tensão
RV	Reguladores de velocidade
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	16
1.2	RELEVÂNCIA DA REPRESENTAÇÃO DE CARGA DINÂMICA E O FENÔMENO FIDVR	17
1.3	JUSTIFICATIVA E OPORTUNIDADE	17
1.4	OBJETIVOS	18
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	MODELAGEM DE CARGA	20
2.1	VISÃO GERAL DA MODELAGEM DE CARGA	20
2.2	RELEVÂNCIA DAS DIRETRIZES DO MODELO DE CARGA PARA OPERAÇÃO E PLANEJAMENTO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA	21
2.3	MODELOS DE CARGA	23
2.3.1	MODELOS DE CARGA ESTÁTICOS	23
2.3.1.1	MODELO DE CARGA LINEAR	23
2.3.1.2	<i>MODELO DE CARGA POLINOMIAL (ZIP)</i>	<i>24</i>
2.3.1.3	<i>MODELO DE CARGA EXPONENCIAL</i>	<i>25</i>
2.3.1.4	<i>MODELO COMPLETO DE CARGA ESTÁTICA</i>	<i>26</i>
2.3.1.5	<i>MODELO ESTÁTICO DE MOTOR DE INDUÇÃO</i>	<i>27</i>
2.3.1.6	<i>MODELO DE CARGA COM INTERFACE DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA</i>	<i>27</i>
2.3.2	MODELOS DE CARGA DINÂMICA	29
2.3.2.1	<i>MODELO DE CARGA DINÂMICA EXPONENCIAL</i>	<i>29</i>
2.3.2.2	<i>MODELO DINÂMICO DE MOTOR DE INDUÇÃO</i>	<i>29</i>
2.3.2.3	<i>FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MOTOR DE INDUÇÃO</i>	<i>31</i>
2.3.2.4	<i>MODELO COMPOSTO DE CARGA</i>	<i>31</i>
2.3.2.5	<i>MODELO DE CARGA DE DISTRIBUIÇÃO</i>	<i>33</i>
2.3.2.6	<i>MODELO DE CARGA DE BARRAMENTO DE POTÊNCIA AGREGADO</i>	<i>33</i>
2.3.2.7	<i>MODELO GENÉRICO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO ELÉTRICO DISTRIBUÍDO</i>	<i>34</i>
3	<i>FAULT INDUCED DELAYED VOLTAGE RECOVERY – FIDVR</i>	<i>35</i>
3.1	CONCEITO - FIDVR	35
3.2	REGISTROS DE OCORRÊNCIAS - FIDVR	37

3.2.1	Califórnia - EUA	37
3.2.2	Maçambará/RS - Brasil	38
3.2.3	Rio Branco e Porto Velho (AC/RN) – Brasil	39
3.2.4	Casos Notáveis de FIDVR	41
4	SIMULAÇÃO DINÂMICA HÍBRIDA – SDH.....	43
4.1	CONCEITO	43
4.2	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	45
4.2.1	MÉTODO DIRETO.....	46
4.2.2	MÉTODO INDIRETO	46
4.2.2.1	<i>MÉTODO DO TRANSFORMADOR DEFASADOR</i>	<i>47</i>
4.2.2.2	<i>MÉTODO DO GERADOR DE RESPOSTA RÁPIDA.....</i>	<i>47</i>
4.2.2.3	<i>MÉTODO DA IMPEDÂNCIA VARIÁVEL</i>	<i>48</i>
4.2.2.4	<i>MÉTODO DAS POTÊNCIAS INJETADAS</i>	<i>49</i>
4.3	IMPLEMENTAÇÃO NO SOFTWARE ANATEM.....	49
4.3.1	ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO	49
4.3.1.1	<i>DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA</i>	<i>50</i>
4.3.1.2	<i>PREPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO.....</i>	<i>50</i>
4.3.1.3	<i>RESULTADOS DA SDH.....</i>	<i>53</i>
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5	ESTUDO DE CASO	56
5.1	OBJETIVO	56
5.2	PREPARAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	56
5.3	ETAPA 1 – 100% MODELO ZIP	59
5.3.1	Avaliação da SDH – Método do Gerador de Resposta Rápida.....	59
5.3.2	Ganho de Tempos de Processamento – SDH	62
5.3.3	SDH Otimização do Modelo de Carga ZIP – SDH	64
5.3.4	Indicadores para Domínio do Tempo	64
5.3.5	Resultados - ETAPA 1	65
5.4	ETAPA 2 – MODELO COMPOSTO – ZIP + MI	67
5.4.1	Modelo de Carga Composto	67
5.4.2	Modelo Motor de Indução – Anarede e Anatem.....	68
5.4.3	Parâmetros do Motor de Indução – Anarede e Anatem	70
5.4.4	Resultados - ETAPA 2	71
6	CONCLUSÃO	80

6.1	TRABALHOS FUTUROS	81
6.1.1	Otimização e Automação do Processo de Parametrização	81
6.1.2	Validação com Dados do Sistema Real	81
6.1.3	Expansão do Escopo de Modelagem.....	82
7	REFERÊNCIAS	83
7.1	ANEXO A.....	85
7.2	ANEXO B.....	86

1 INTRODUÇÃO

Diante da crescente complexidade operacional dos sistemas de energia elétrica, a precisão das simulações computacionais torna-se um requisito fundamental. Esta seção deste trabalho introduz os desafios impostos pela evolução e complexidade da carga e a insuficiência dos modelos estáticos frente a fenômenos de natureza dinâmica, como o Atraso na Recuperação da Tensão Pós-Falta (*Fault-Induced Delayed Voltage Recovery* – FIDVR), apresentando a Simulação Dinâmica Híbrida como uma ferramenta promissora para a validação de modelos e parâmetros de carga.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A segurança, confiabilidade e estabilidade na operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) modernos dependem criticamente da precisão com que os comportamentos dinâmicos dos sistemas podem ser simulados e previstos. As simulações dinâmicas são a base para a tomada de decisão em todas as fases do planejamento (expansão da rede, estudos de estabilidade) e da operação (avaliação de segurança em tempo real e ajustes do ponto de operação). Para que tais simulações forneçam resultados robustos, a representação de seus componentes deve ser fidedigna. Dentre os componentes do sistema, as cargas têm evoluído e ganhado complexidade, tornando-se de extrema relevância na análise de fenômenos mais desafiadores.

Historicamente, na indústria da energia elétrica tem-se adotado modelos de carga estáticos simplificados, como o modelo polinomial ZIP, que representa a potência consumida como uma função algébrica da tensão. O modelo ZIP, apesar de sua simplicidade computacional, não é capaz de capturar a natureza intrinsecamente dinâmica associada à evolução de alguns tipos de carga, que passaram a ser compostos por dispositivos eletrônicos e, notavelmente, motores. Essa limitação merece uma atenção especial pois impede a reprodução adequada de fenômenos dinâmicos críticos que podem levar à instabilidade do sistema.

1.2 RELEVÂNCIA DA REPRESENTAÇÃO DE CARGA DINÂMICA E O FENÔMENO FIDVR

A limitação dos modelos de carga estáticos é particularmente evidente na análise do fenômeno do Atraso na Recuperação da Tensão Pós-Falta (*Fault-Induced Delayed Voltage Recovery* - FIDVR). Em regiões com elevada concentração de cargas do tipo motor de indução – como as áreas de clima quente, onde o consumo de aparelhos de ar-condicionado é a maior demanda residencial em dias de pico – a ocorrência de curtos-circuitos pode deflagrar o FIDVR.

O FIDVR manifesta-se como um afundamento de tensão sustentado após a eliminação da falta, seguido por uma recuperação notavelmente lenta, com a duração do período crítico frequentemente da ordem de segundos. Este fenômeno está ligado ao *stall* (bloqueio ou operação com alto escorregamento) dos motores de baixa inércia, o que provoca um aumento expressivo e perigoso da demanda de corrente (5 a 6 vezes o valor nominal). Um perfil de tensão baixo e sustentado aumenta o risco de perdas de carga descontroladas e deixa o sistema vulnerável a colapsos ou a novos distúrbios, representando uma ameaça direta à estabilidade de tensão.

1.3 JUSTIFICATIVA E OPORTUNIDADE

O processo tradicional de parametrização e validação de modelos de carga — que historicamente envolve simulações, ensaios controlados e dispendiosas campanhas de medições em campo — demanda grande esforço, gera custos elevados e pode reduzir a disponibilidade operacional dos ativos. Estas dificuldades têm sido obstáculos para a atualização dos modelos dinâmicos da carga.

A necessidade de modelos mais precisos, contudo, coincide com o avanço tecnológico em medição: o advento das Unidades de Medição Fasorial (PMUs). As PMUs fornecem dados de sincrofasores com alta resolução temporal, permitindo o aproveitamento das medidas obtidas durante perturbações naturais do próprio sistema (faltas e contingências). Este recurso tem potencial para reduzir a necessidade de intervenções no sistema destinadas a validação de modelos.

Neste cenário, destacam-se metodologias que exploram os dados das PMUs, para validar modelos. Entre elas, a Simulação Dinâmica Híbrida emerge como uma técnica de validação de modelos particularmente promissora. Esta metodologia permite a combinação sinérgica de dados de sincrofasores em tempo real (representando a porção do sistema conhecida) e modelos computacionais detalhados (representando o componente, como o modelo de carga, que se deseja validar) em um mesmo ambiente de simulação.

1.4 OBJETIVOS

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral demonstrar e avaliar a eficácia da Simulação Dinâmica Híbrida como ferramenta de parametrização e validação de modelos dinâmicos de carga em Sistemas Elétricos de Potência, com foco na análise de fenômenos de instabilidade de tensão como a FIDVR.

Os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- Realizar uma revisão bibliográfica e analisar o estado da arte dos modelos de carga aplicáveis a estudos elétricos de sistemas de potência, com ênfase na representação de motores de indução e na compreensão do fenômeno FIDVR.
- Apresentar a técnica de Simulação Dinâmica Híbrida, abrangendo desde a definição do seu conceito e as etapas para implementação até a avaliação dos ganhos e novas oportunidades proporcionadas pela metodologia.
- Aplicar a metodologia proposta para a parametrização e validação de modelos de carga em uma região crítica do Sistema Interligado Nacional (SIN), sujeita ao fenômeno do Atraso na Recuperação da Tensão Pós-Falta.
- Comparar os resultados obtidos pela Simulação Dinâmica Híbrida com os modelos de carga estáticos (ZIP) atualmente utilizados.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Apresenta a contextualização do problema de modelagem de carga, a motivação para a pesquisa, o problema a ser resolvido e os objetivos propostos.

- **Capítulo 2 – Modelos de Carga: Conceitos e Estado da Arte:** Detalha os conceitos de **modelos dinâmicos e estáticos de carga** (como o modelo ZIP). Este capítulo abrange a fundamentação teórica sobre os modelos de carga utilizados em estudos de Sistemas Elétricos de Potência (SEP).
- **Capítulo 3 – Fenômeno FIDVR:** Este capítulo é dedicado à conceituação e análise detalhada do fenômeno Atraso na Recuperação da Tensão Pós-Falta (FIDVR) e suas implicações operacionais.
- **Capítulo 4 – Simulação Dinâmica Híbrida:** Detalha a **metodologia da Simulação Dinâmica Híbrida**, seus princípios e as ferramentas necessárias para sua implementação.
- **Capítulo 5 – Estudo de Caso: Aplicação no Sistema Interligado Nacional (SIN):** Descreve o estudo de caso a ser realizado, incluindo a caracterização da área de estudo no SIN suscetível ao FIDVR, a obtenção dos dados de campo e o passo a passo da parametrização e validação dos modelos de carga utilizando a técnica da simulação dinâmica híbrida.
- **Capítulo 6 – Análise de Resultados, Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros:** Apresenta e discute os resultados do estudo de caso. Por fim, resume as principais contribuições do trabalho, conclui sobre a eficácia dos modelos dinâmicos de carga perante o FIDVR e sugere direções para futuras pesquisas na área.

2 MODELAGEM DE CARGA

Neste capítulo, são estabelecidas as fundamentações teóricas sobre a representação das cargas em estudos de sistemas elétricos de potência. A seção 2.1 apresenta uma visão geral da modelagem de carga, contrastando a evolução da complexidade da carga com a capacidade dos modelos mais comuns em reproduzir seus comportamentos. Em seguida, a seção 2.2 discute a relevância dessas definições para o planejamento e operação dos sistemas elétricos de potência, abordando o dilema entre o conservadorismo e o otimismo nas representações da carga para as simulações computacionais. Por fim, a seção 2.3 detalha as categorias e tipos de modelos de carga disponíveis na literatura.

2.1 VISÃO GERAL DA MODELAGEM DE CARGA

A modelagem de carga desempenha um dos papéis fundamentais para análise, planejamento e controle do sistema de elétrico de potência. Estudos têm mostrado a relevância de representações precisas de carga na avaliação de estabilidade de sistemas elétricos de potência. Entretanto, enquanto as estruturas e características da carga mudam constantemente ao longo do tempo, a maioria dos modelos de carga atualmente em uso pelo setor foram desenvolvidos há várias décadas e não passaram por atualizações [1], [2].

As características das cargas influenciam significativamente o desempenho em regime permanente e transitório do sistema de potência. Portanto, para realizar análises de desempenho adequadas dos sistemas de energia elétrica, além dos esforços para se obter representações adequadas dos modelos de geração, transmissão e distribuição de energia, é necessário empenho também nos processos de desenvolvimento de modelos de carga precisos.

Os modelos de carga atualmente utilizados geralmente não são capazes de reconstruir as grandes perturbações mais recentes através da realização de simulações e análises “post-mortem” [3], [4].

A modelagem de carga configura-se como uma tarefa intrinsecamente complexa devido à multiplicidade de fatores intervenientes, tais como a heterogeneidade dos tipos de cargas, a variabilidade espaço-temporal da demanda e a frequente escassez de dados estruturais detalhados. Este cenário é agravado pela necessidade de incorporar características de tecnologias emergentes associadas às redes inteligentes, incluindo geradores distribuídos (GDs), Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), veículos elétricos (VEs) e o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD). Consequentemente, as incertezas advindas do vasto número de componentes, cuja composição oscila conforme condições climáticas e sazonais, impõem desafios adicionais à validação dos parâmetros. O objetivo primordial da modelagem, portanto, é sintetizar essa complexidade desenvolvendo modelos matemáticos simplificados, mas capazes de aproximar com fidelidade o comportamento real da carga [1].

Embora o setor elétrico tenha reconhecido o impacto da representação da carga na estabilidade há muito tempo, nas análises da estabilidade do sistema de potência, os esforços se concentram principalmente nos modelos de unidades geradoras.

2.2 RELEVÂNCIA DAS DIRETRIZES DO MODELO DE CARGA PARA OPERAÇÃO E PLANEJAMENTO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

Em sistemas elétricos de potência, a simulação computacional baseada em modelos de componentes apropriados é uma ferramenta indispensável. Ela não apenas permite que engenheiros compreendam profundamente o comportamento dinâmico da rede, mas também norteia decisões críticas de operação e planejamento. Nesse contexto, a representação adequada da carga tornou-se cada vez mais relevante, uma vez que o uso de diferentes modelos pode conduzir a resultados divergentes e impactar significativamente a precisão dos estudos.

No entanto, a modelagem da carga nesses estudos é frequentemente simplificada. Ela não se limita apenas aos dispositivos ou consumidores finais, mas abrange toda a rede não representada após o ponto de interconexão. Essa simplificação impõe um dilema que deve ser cuidadosamente avaliado: uma

modelagem excessivamente conservadora pode indicar margens de estabilidade muito estreitas, como na avaliação de limites de intercâmbio entre subsistemas, levando a investimentos desnecessários para mitigar problemas improváveis. Por outro lado, uma modelagem excessivamente otimista pode ocultar vulnerabilidades reais, criando riscos operacionais onde eventos supostamente seguros podem desencadear grandes blecautes. Portanto, a segurança e a eficiência do sistema elétrico dependem diretamente de uma modelagem precisa e adequada a cada tipo de estudo.

A complexidade dessa modelagem advém de diversos fatores, como a ampla distribuição geográfica das cargas, a dificuldade na classificação dos consumidores (residencial, comercial, industrial) e a variabilidade de sua composição em função do horário, da estação do ano e da temperatura local. Além disso, o cenário atual apresenta novos desafios com a expansão de fontes distribuídas de energia (DER), a crescente penetração de motores e de cargas eletrônicas complexas. Esses elementos aumentam a característica não linear da carga e influenciam o comportamento dinâmico do sistema. Consequentemente, modelos simplificados, que historicamente eram satisfatórios para cargas convencionais, mostram-se hoje inadequados para representar fielmente a realidade da geração distribuída e das novas tecnologias de consumo.

Diante desse cenário, operadores de sistemas, centros de pesquisa e a academia têm realizado um esforço considerável nas últimas décadas para desenvolver novos modelos e métodos de parametrização. A validação desses novos modelos depende crucialmente da infraestrutura de medição. A ampliação do registro de perturbações, especialmente com a difusão da medição sincronizada de fasores (PMUs), tem permitido uma detecção mais precisa de erros de modelagem e, com o desenvolvimento de métodos adequados, a localização de suas fontes. Assim, a incorporação de modelos avançados aliada a uma parametrização validada por medições de campo constitui o caminho para mitigar os riscos e incertezas na operação do sistema [2].

2.3 MODELOS DE CARGA

Este item apresenta os principais modelos de carga existentes. Estes modelos matemáticos buscam representar de forma mais fidedigna o comportamento destas cargas. A estrutura destes modelos pode ser estática ou dinâmica, sempre relacionando variações de tensão e frequência com as potências ativa e reativa consumidas pela carga. A Tabela 1 apresenta a estrutura de modelos de carga utilizados nos estudos de estabilidade eletromecânica [5], [6].

Tabela 1 – Tipos de Modelos de Carga [6], [7]

MODELOS DE CARGA	CATEGORIA	TIPOS DE MODELOS DE CARGA
	ESTÁTICO	Modelo de Carga Linear
		Modelo de Carga Polinomial (ZIP)
		Modelo de Carga Exponencial
		Modelo Completo de Carga Estática
		Modelo Estático de Motor de Indução
		Modelo de Carga com Interface Eletrônica de Potência
	DINÂMICO	Modelo de Carga Dinâmica Exponencial
		Modelo Dinâmico de Motor de Indução
		Função de Transferência de Motor de Indução
		Modelo Composto de Carga
		Modelo de Carga de Distribuição
		Modelo de Carga de Barramento de Potência Agregado
		Modelo Genérico de Sistema de Armazenamento Elétrico Distribuído

2.3.1 MODELOS DE CARGA ESTÁTICOS

2.3.1.1.1 MODELO DE CARGA LINEAR

O modelo de carga linear é adequado para modelar os cenários em que a tensão apresenta pequenas variações, por exemplo, a análise de estabilidade de pequenas perturbações. Embora o modelo de carga linear seja simples, para cenários de grandes variações de tensão, o modelo de carga linear será impreciso no cálculo do resultado. O modelo de carga linear é descrito pelas equações (2.1) e (2.2):

$$P = P_n \left[a_0 + a_1 \frac{U}{U_n} \right] \quad (2.1)$$

$$Q = Q_n \left[b_0 + b_1 \frac{U}{U_n} \right] \quad (2.2)$$

onde:

U_n e f_n : Tensão e frequência nominal;

P_n e Q_n : Potência ativa e reativa referentes à tensão e frequência nominais;

a_0, a_1, b_0 e b_1 : Parâmetros.

2.3.1.2 MODELO DE CARGA POLINOMIAL (ZIP)

O modelo de carga polinomial tem como base um polinômio de segunda ordem para representação da carga. É um modelo amplamente utilizado e que possui muitos tipos de variantes. Este modelo consiste em componentes de carga do tipo impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P) e, portanto, foi nomeado como “modelo ZIP”. O modelo ZIP é considerado o modelo padrão na maior parte dos estudos de simulação e é mostrado a seguir nas equações (2.3) e (2.4).

$$P = P_n \left[p_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + p_2 \left(\frac{U}{U_n} \right) + p_3 \right] \quad (2.3)$$

$$Q = Q_n \left[q_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + q_2 \left(\frac{U}{U_n} \right) + q_3 \right] \quad (2.4)$$

onde:

p_1 e q_1 : Parâmetros relacionados à parcela de impedância (Z) constante;

p_2 e q_2 : Parâmetros relacionados à parcela de corrente (I) constante;

p_3 e q_3 : Parâmetros relacionados à parcela de potência (P) constante;

Cada parcela do modelo ZIP pode ser evidenciada nas condições a seguir:

$$p_2 = p_3 = q_2 = q_3 = 0 \rightarrow P(U) = p_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 ; Q(U) = q_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \rightarrow Z_{CTE} \quad (2.5)$$

$$p_1 = p_3 = q_1 = q_3 = 0 \rightarrow P(U) = p_2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^1 ; Q(U) = q_2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^1 \rightarrow I_{CTE} \quad (2.6)$$

$$p_1 = p_2 = q_1 = q_2 = 0 \rightarrow P(U) = p_3 \left(\frac{U}{U_n} \right)^0 ; Q(U) = q_3 \left(\frac{U}{U_n} \right)^0 \rightarrow P_{CTE} \quad (2.7)$$

Os coeficientes são escolhidos tais que $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ e $q_1 + q_2 + q_3 = 1$.

O efeito do desvio de frequência Δf na carga pode ser incluído utilizando os multiplicadores $(1 + K_{pf}\Delta f)$ e $(1 + K_{qf}\Delta f)$, conforme segue:

$$P = P_n \left[p_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + p_2 \left(\frac{U}{U_n} \right) + p_3 \right] (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (2.8)$$

$$Q = Q_n \left[q_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + q_2 \left(\frac{U}{U_n} \right) + q_3 \right] (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (2.9)$$

onde:

$K_{pf} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta f} \right)$: Representa variação da potência ativa com desvio de frequência;

$K_{qf} = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta f} \right)$: Representa variação da potência reativa com desvio de frequência;

Entretanto, opta-se geralmente por desconsiderar o impacto dos desvios de frequência, visto que as oscilações de tensão são preponderantes tanto em incidência quanto em significância [8].

2.3.1.3 MODELO DE CARGA EXPONENCIAL

No modelo de carga exponencial existe apenas um expoente para a parte ativa e um para a parte reativa da carga. Estes expoentes são parâmetros do modelo, e as potências ativa P e reativa Q . Embora seja de fácil identificação e útil para estudos analíticos, sua interpretação física e generalização podem ser complexas. Vale ressaltar que, apesar de a parcela dependente da frequência ser por vezes desconsiderada quando as variações de tensão são dominantes, a possibilidade de incluir essa sensibilidade é um diferencial importante desta representação. O modelo é mostrado a seguir nas equações (2.10) e (2.11).

$$P = P_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} \left(\frac{f}{f_n} \right)^{k_{pf}} \quad (2.10)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} \left(\frac{f}{f_n} \right)^{k_{qf}} \quad (2.11)$$

Valores típicos dos expoentes utilizados para alguns tipos comuns de carga são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores típicos de expoentes utilizados no modelo exponencial de carga [7]

TIPO DE CARGA	k_{pu}	k_{qu}
Lâmpada Incandescente	1,54	0
Ar – Condicionado	0,5	2,5
Ventilador de Forno	0,08	1,6
Carregador de Baterias	2,59	4,06
Lâmpada Fluorescente	2,07	3,21

Assim, as parcelas da frequência podem ser modificadas na tensão nominal U_n para a série Taylor, conforme mostrado nas equações (2.12) e (2.13).

$$P = P_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} (1 + k_{pf} \Delta f) \quad (2.12)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (2.13)$$

2.3.1.4 MODELO COMPLETO DE CARGA ESTÁTICA

Um modelo completo de carga estática é adequado para modelar cenários de perfis baixos de tensões nos quais são consideradas características estáticas e dinâmicas. Nessas situações, as cargas estáticas diminuem até certo ponto. Por exemplo, dispositivos eletrônicos de potência podem desligar quando a tensão estiver abaixo de 80% da nominal, condicionadores de ar residenciais podem desligar quando supridos por 40% a 52% da tensão nominal, lâmpadas fluorescentes compactas podem desligar entre 17% e 35% da tensão nominal. O modelo abrangente de carga estática contém um modelo polinomial e dois modelos exponenciais, mostrado a seguir nas equações (2.14) e (2.15) .

$$P = P_n [P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}] \quad (2.14)$$

$$Q = Q_n [Q_{ZIP} + Q_{EX1} + Q_{EX2}] \quad (2.15)$$

onde:

$$P_{ZIP} = P_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + P_2 \left(\frac{U}{U_n} \right) + P_3$$

$$P_{EX1} = P_4 \left(\frac{U}{U_n} \right)^{a1} (1 + k_{pf1} \Delta f)$$

$$P_{EX2} = P_5 \left(\frac{U}{U_n} \right)^{a2} (1 + k_{pf2} \Delta f)$$

$$Q_{ZIP} = Q_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + Q_2 \left(\frac{U}{U_n} \right) + Q_3$$

$$Q_{EX1} = Q_4 \left(\frac{U}{U_n} \right)^{b_1} (1 + k_{qf1} \Delta f)$$

$$Q_{EX2} = Q_5 \left(\frac{U}{U_n} \right)^{b_2} (1 + k_{qf2} \Delta f)$$

a_1, a_2, b_1 e b_2 são dependentes da tensão e variam quando a tensão cai abaixo de um determinado limite para manter a estabilidade numérica nas simulações.

2.3.1.5 MODELO ESTÁTICO DE MOTOR DE INDUÇÃO

O modelo estático de motor de indução é adequado quando a percepção dos motores de indução nas cargas totais atinge uma percentagem significativa. O modelo é mostrado a seguir nas equações (2.16) e (2.17).

$$P = \frac{\left(R_s + \frac{R_r}{S} \right) U^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{S} \right)^2 + (X_{\gamma s} + X_{\gamma r})^2} \quad (2.16)$$

$$Q = \frac{(X_{\gamma s} + X_{\gamma r}) U^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{S} \right)^2 + (X_{\gamma s} + X_{\gamma r})^2} + \frac{U^2}{X_s} \quad (2.17)$$

onde:

R_s : é a resistência do estator

R_r : é a resistência do rotor

S : é o escorregamento

$X_{\gamma s}$: é a reatância de dispersão do estator

$X_{\gamma r}$: é a reatância de dispersão do rotor

$X_s = X_m + X_{\gamma s}$: é a reatância shunt em que X_m é a reatância de magnetização

2.3.1.6 MODELO DE CARGA COM INTERFACE DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

O modelo de carga com interface de eletrônica de potência é adequado quando muitos dispositivos eletrônicos de potência não lineares podem estar com alto

grau de inserção na carga. O modelo contém principalmente quatro tipos de categorias de carga, ou seja, cargas de fonte de alimentação CC, fontes de energia com eficiência energética, cargas monofásicas e cargas trifásicas. Todas as cargas com interface eletrônica de potência precisam ser modeladas separadamente. Geralmente, o modelo de carga com interface eletrônica de potência pode ser modelado tanto com o modelo polinomial quanto com o modelo exponencial.

A modelagem matemática de cargas com interface de eletrônica de potência é composta de duas premissas:

1. potência ativa e reativa constantes para uma faixa de tensão especificada, e
2. redução linear no consumo de potência ativa e reativa à medida que a tensão cai abaixo da faixa especificada, para representar o desligamento por subtensão desses dispositivos.

O modelo também permite que uma porcentagem especificada da carga eletrônica (representada pelo fator $frcel$) seja reconectada ao sistema na medida em que a tensão seja recuperada conforme os limites estabelecidos após o desligamento. O comportamento da carga eletrônica é apresentado na Figura 2-1. O modelo inicia uma redução linear da potência ativa/reactiva solicitada do sistema a partir do limite estabelecido pelo parâmetro $Vd1$. O desligamento total desses componentes é realizado quando a tensão terminal ultrapassa o limite estabelecido pelo parâmetro $Vd2$. No processo de recuperação são utilizados os parâmetros $Vmin$ e $frcel$, para calcular a fração da carga que será recuperada pós-distúrbio.

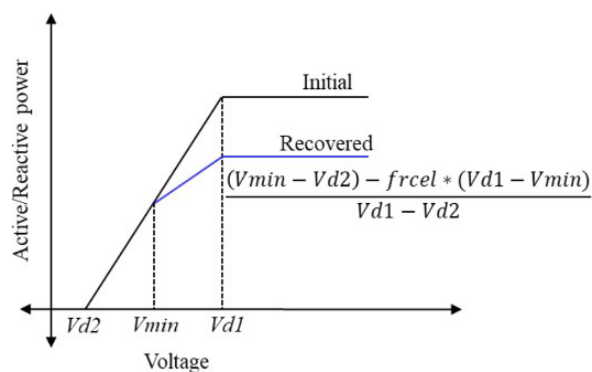


Figura 2-1 Comportamento da carga eletrônica [7]

2.3.2 MODELOS DE CARGA DINÂMICA

2.3.2.1 MODELO DE CARGA DINÂMICA EXPONENCIAL

O modelo de carga dinâmica exponencial é adequado quando a tensão de motores de indução, aquecedores e comutadores apresentam variações. Como o modelo de carga dinâmica exponencial não considera o acoplamento inerente entre a potência ativa e a reativa absorvida dos motores de indução, este modelo apresenta desvantagens em produzir a dinâmica de curto prazo das cargas quando há uma alta penetração de motores de indução. No entanto, este modelo apresenta vantagens para o estudo de estabilidade de tensão a longo prazo. O modelo é mostrado a seguir nas equações (2.18), (2.19), (2.20) e (2.21).

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_s(U) - P_t(U) = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} - P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \quad (2.18)$$

$$T_Q \frac{dQ_r}{dt} + Q_r = Q_s(U) - Q_t(U) = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\beta_s} - Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\beta_t} \quad (2.19)$$

$$P_l = P_r + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \quad (2.20)$$

$$Q_l = Q_r + Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\beta_t} \quad (2.21)$$

onde:

P_r e Q_r : potência ativa e reativa recuperada

P_0 e Q_0 : valor inicial da potência ativa e reativa antes da mudança de tensão

U_0 : valor de tensão inicial

T_p e T_Q : constantes o tempo de recuperação de potência ativa e reativa

α_s e β_s : expoentes em regime permanente de tensão de potência ativa e reativa

α_t e β_t : expoentes transitórios de tensão de potência ativa e reativa

P_l e Q_l : consumo de potência ativa e reativa

2.3.2.2 MODELO DINÂMICO DE MOTOR DE INDUÇÃO

O modelo dinâmico de motor de indução é adequado para cenários em que há uma alta penetração deste tipo de carga. Normalmente, o modelo de quinta ordem é frequentemente usado para motores de indução maiores ou quando o motor de indução tem uma resposta significativa. Em algumas aplicações práticas, os

transitórios do estator são desprezados e os modelos dinâmicos de terceira ordem são suficientes. Além disso, para aplicações de baixa tensão, motores de indução monofásicos são frequentemente usados. Aqui, um modelo de motor de indução trifásico abrangente de quinta ordem é mostrado como segue nas equações de (2.22) a (2.30).

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{d\tau} - \omega_s \psi_{qs} \quad (2.22)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{d\tau} - \omega_s \psi_{ds} \quad (2.23)$$

$$u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{d\tau} - (\omega_s - \omega) \psi_{qr} \quad (2.24)$$

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{d\tau} + (\omega_s - \omega) \psi_{dr} \quad (2.25)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{(M_e - M)}{\omega_b T_m} \quad (2.26)$$

$$\psi_{ds} = X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \quad (2.27)$$

$$\psi_{qs} = X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \quad (2.28)$$

$$\psi_{dr} = X_m i_{ds} + X_r i_{dr} \quad (2.29)$$

$$\psi_{qr} = X_m i_{qs} + X_r i_{qr} \quad (2.30)$$

onde:

u_{ds}, u_{qs}, u_{dr} e u_{qr} : componentes de tensão do estator e do rotor

i_{ds}, i_{qs}, i_{dr} e i_{qr} : componentes da corrente do estator e do rotor

$\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{dr}$ e ψ_{qr} : fluxos concatenados do estator e do rotor

ω_b : frequência angular base

$X_r = X_m + X_{rr}$: reatância do rotor

M : torque de carga mecânica

$M_e = X_m(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr})$: o torque eletromagnético

$\tau = \omega_b t$: tempo normalizado

T_m : constante de tempo mecânica do motor

2.3.2.3 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MOTOR DE INDUÇÃO

A função de transferência do motor de indução é adequada quando o motor de indução é combinado com a carga estática. Geralmente existem funções de transferência de primeira, segunda e terceira ordem. As funções de transferência de primeira ordem são mostradas nas equações (2.31) e (2.32), as de segunda ordem nas equações (2.33) e (2.34) e por fim, as de terceira ordem são apresentadas nas equações (2.35) e (2.36).

$$\Delta P(s) = \frac{k_{pf} + T_{pf}s}{1 + T_1s} \Delta f(s) + \frac{k_{pu} + T_{pu}s}{1 + T_1s} \Delta U(s) \quad (2.31)$$

$$\Delta Q(s) = \frac{k_{qf} + T_{qf}s}{1 + T_1s} \Delta f(s) + \frac{k_{qu} + T_{qu}s}{1 + T_1s} \Delta U(s) \quad (2.32)$$

$$\frac{\Delta P(s)}{\Delta U} = \frac{k_{pu}(1 + T_{3p}s)}{(1 + T_{1p}s)(1 + T_{2p}s)} \quad (2.33)$$

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta U} = \frac{k_{qu}(1 + T_{3q}s)}{(1 + T_{1q}s)(1 + T_{2q}s)} \quad (2.34)$$

$$\frac{\Delta P(s)}{\Delta U} = \frac{k_{pu}(1 + T_{4p}s)(1 + T_{5p}s)}{(1 + T_{1p}s)(1 + T_{2p}s)(1 + T_{3p}s)} \quad (2.35)$$

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta U} = \frac{k_{qu}(1 + T_{4q}s)(1 + T_{5q}s)}{(1 + T_{1q}s)(1 + T_{2q}s)(1 + T_{3q}s)} \quad (2.36)$$

2.3.2.4 MODELO COMPOSTO DE CARGA

O modelo composto de carga é adequado quando dispositivos estáticos e dinâmicos estão conectados ao mesmo barramento no qual os dispositivos dinâmicos representam principalmente o motor de indução. Os componentes das correntes d e q da carga resistiva e capacitiva são mostrados a seguir nas equações (2.37) até (2.40).

$$i_{dr} = \frac{u_{ds}}{R} \quad (2.37)$$

$$i_{qr} = \frac{u_{qs}}{R} \quad (2.38)$$

$$i_{dc} = \frac{u_{qs}}{X_c} \quad (2.39)$$

$$i_{qc} = \frac{u_{ds}}{X_c} \quad (2.40)$$

Em 2015, a NERC revisou seus critérios de confiabilidade para exigir o uso de modelos dinâmicos de carga em estudos de planejamento da operação na América do Norte. Uma força-tarefa para modelagem de carga foi criada, tendo como resultado a criação do modelo CLM (*Composite Load Model*), estado-da-arte para modelagem de carga, mostrado na Figura 2-2.

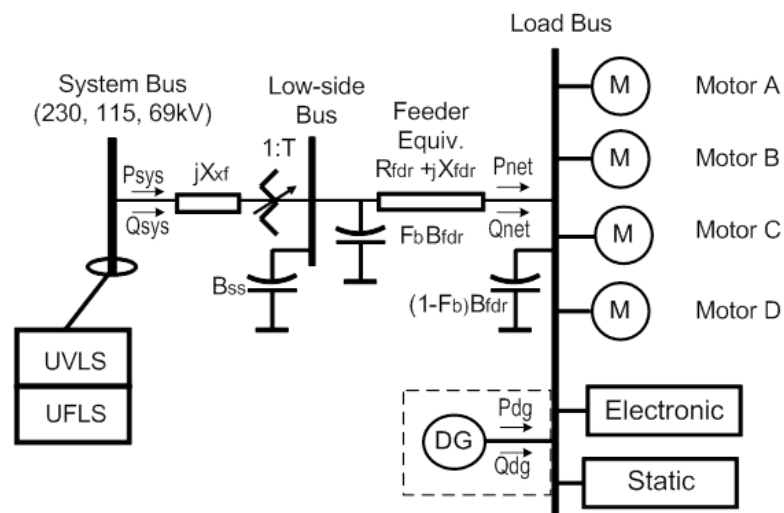


Figura 2-2 – Estrutura do Modelo Composto de Carga (CLM) [9]

O CLM inclui a representação de uma impedância equivalente do alimentador da distribuição, entre a média e a baixa tensão, quatro tipos de motores, cargas eletrônicas e estáticas (modelo ZIP), além de recursos energéticos distribuídos (REDs). Os motores são divididos em quatro tipos:

- Motor A: compressores trifásicos de torque constante utilizados para refrigeração e condicionamento de ar;
- Motor B: ventiladores trifásicos de alta inércia com torque proporcional ao quadrado da velocidade;
- Motor C: bombas trifásicas de baixa inércia com torque proporcional ao quadrado da velocidade;
- Motor D: compressores monofásicos, usualmente utilizados em aparelhos de ar-condicionado residenciais.

A modelagem dos recursos energéticos distribuídos pode ser feita através de modelos estáticos (similares ao modelo ZIP) ou através de modelos dinâmicos, que representam mais detalhadamente o desempenho destes inversores.

2.3.2.5 MODELO DE CARGA DE DISTRIBUIÇÃO

O modelo de carga de distribuição é adequado para cenários com influências de carga de motores de indução, alimentadores distribuídos e transformadores distribuídos conectados na rede. O modelo de carga basicamente é composto dos modelos de cada tipo da carga e depois são somados para formar o modelo de carga de distribuição.

2.3.2.6 MODELO DE CARGA DE BARRAMENTO DE POTÊNCIA AGREGADO

Este modelo é adequado para representar um barramento com vários tipos de cargas agregadas no qual os componentes de carga e os parâmetros dos elementos da rede de energia elétrica entre os nós e a carga precisam ser totalmente considerados. Especificamente, este modelo de carga do barramento equivalente levaria em conta o impacto da reatância de um barramento em massa para o barramento de utilização, o impacto líquido da saturação dos transformadores de distribuição e o impacto dos capacitores e cabos *shunt*. A carga, excluindo a compensação capacitiva estimada, é mostrada a seguir nas equações (2.41) e (2.42).

$$P(t) = [1 - k_p\{U(t) - 1\}](1 - P_{drop}) + P_{dyn}\{G(t) - 1\}U^2(t) \quad (2.41)$$

$$Q(t) = [1 - k_q\{U(t) - 1\}](1 - Q_{drop}) + Q_{dyn}\{G(t) - 1\}U^2(t) \quad (2.42)$$

onde:

k_p e k_q : constantes características

P_{drop} e Q_{drop} : quedas de carga relacionadas à tensão mínima do barramento

P_{dyn} e Q_{dyn} : magnitudes dos componentes de carga dinâmica

G_t : condutância do motor

2.3.2.7 MODELO GENÉRICO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO ELÉTRICO DISTRIBUÍDO

O modelo genérico do sistema de armazenamento elétrico distribuído é adequado quando o sistema elétrico está conectado a uma rede em que a estrutura é flexível e permite a modelagem de diferentes tipos de tecnologias de armazenamento e estratégias de controle. Este modelo foi projetado para análise de sistema baseada em software e pode gerar resultados precisos para um grande sistema de energia com convergência rápida. Existem três versões da estrutura para o sistema de armazenamento elétrico distribuído: o modelo instantâneo/completo para análise transitória e harmônica, o modelo médio para variáveis elétricas e o modelo para análise de pequenos sinais e estabilidade transitória.

3 FAULT INDUCED DELAYED VOLTAGE RECOVERY – FIDVR

3.1 CONCEITO - FIDVR

Em regiões de clima quente, o consumo de energia elétrica é muito elevado principalmente devido à demanda de cargas de ar-condicionado. É a maior carga de uso em residência em um dia típico de verão, que pode variar entre 1 kW (tipo janela) até 7 kW (sistema central) por residência familiar. Falhas no sistema elétrico em dias quentes em áreas com alta concentração deste tipo de carga (motores de indução de baixa inércia como ar-condicionado) podem levar à ocorrência do fenômeno do atraso na recuperação da tensão do sistema no pós-falta, relacionado ao *stall* destes motores, para o que hoje se conhece como FIDVR. Este fenômeno ocorre em função do aumento da demanda de corrente consumida por estes motores quando operam com seus rotores bloqueados durante a situação de *stall*, usualmente de 5 a 6 vezes o valor de regime permanente [5], [10].

O fenômeno do atraso na recuperação de tensão do sistema (FIDVR) é observado no sistema elétrico em que, como o nome indica, ocorre um afundamento sustentado de tensão após uma falta com uma recuperação lenta. O período inicial deste fenômeno, onde o sistema permanece com o perfil de tensão baixo, é relativamente longo com a sua duração na ordem dos segundos. Existe uma grande preocupação nesta fase da FIDVR quanto a ocorrências de perdas de cargas de forma descontrolada ou quanto da vulnerabilidade do sistema a uma nova falta.

A *North American Electric Reliability Corporation* (NERC) descreve o FIDVR como “fenômeno pelo qual a tensão do sistema permanece em níveis significativamente reduzidos por vários segundos após uma falha de transmissão, subtransmissão ou distribuição ter sido eliminada” [11].

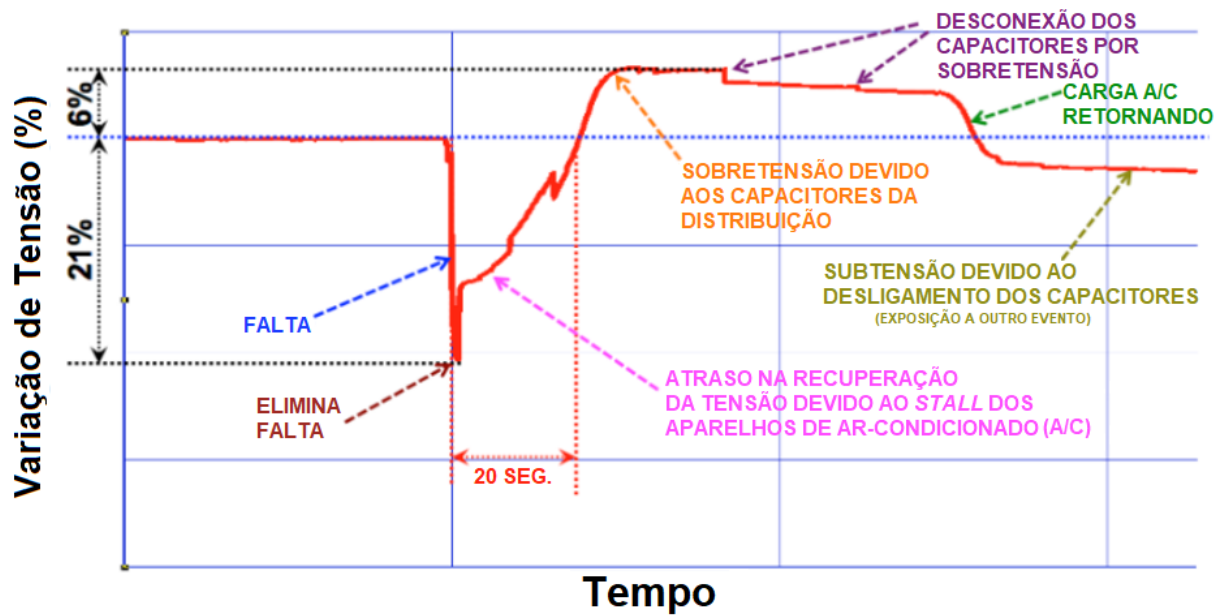


Figura 3-1- Perfil de tensão típico durante um evento de FIDVR - [5], [10], [11], [12]

A Figura 3-1 mostra o perfil de tensão de um sistema de transmissão durante um evento real de FIDVR. É possível identificar a sequência típica deste fenômeno no gráfico conforme destacado a seguir:

1. Ocorre uma falta no sistema elétrico de potência provocando um afundamento de tensão;
2. As proteções do sistema são sensibilizadas e atuam eliminando a falta;
3. Após a eliminação da falta, observa-se um atraso na recuperação da tensão do sistema devido ao bloqueio dos motores de indução (ex: ar-condicionado);
4. Na próxima fase verifica-se sobretensão devido a desconexão por proteção das cargas do tipo motores de indução junto com a entrada de bancos de capacitores shunt na fase que a tensão estava baixa;
5. Desconexão dos bancos de capacitores shunt por sobretensão;
6. Reconexão das cargas do tipo de motores de indução;
7. Sistema resultante com subtensão devido às desconexões dos bancos de capacitores shunt e normalização das cargas ficando vulnerável a consequências mais severas caso ocorra uma nova falta neste período.

Como já mencionado no início deste capítulo, em geral, áreas com alta penetração de motores de indução são mais suscetíveis ao fenômeno FIDVR.

Determinadas regiões em períodos com índices de calor extremos podem ter mais de 60% da sua carga composta por aparelhos de ar-condicionado. Quando a tensão nestes aparelhos cai abaixo de um limite, o torque desenvolvido pelo motor não é suficiente para manter o compressor ligado e há o *stall* do motor, e a partir deste momento há uma elevação de 5 a 6 vezes na demanda da corrente consumida.

Para que seja possível identificar e analisar este fenômeno no ambiente de simulações e estudos de sistemas elétricos, é necessário utilizar uma modelagem apropriada dos motores de indução na representação da carga, normalmente caracterizados por motores de baixa inércia.

Enquanto muitos trabalhos se dedicaram ao estudo das especificidades e à modelagem de carga necessária para sua avaliação, outros trabalhos se concentraram em solucionar a ocorrência deste fenômeno bem como mitigar suas consequências.

3.2 REGISTROS DE OCORRÊNCIAS - FIDVR

Nesta seção são apresentados exemplos de ocorrências do fenômeno da lenta recuperação de tensão nos sistemas elétricos registrados tanto nos Estados Unidos como no Sistema Interligado Nacional (SIN).

3.2.1 Califórnia - EUA

Na Figura 3-2, são apresentados os registros de tensão com base em medidas de PMU de uma ocorrência do fenômeno de FIDVR no sul do estado da Califórnia (EUA), uma região de clima desértico conhecida por suas cargas predominantemente compostas por condicionadores de ar residenciais. Esses condicionadores de ar são responsáveis por um aumento no consumo de energia elétrica de até 60% durante os meses de verão.

De acordo com [13], uma falha no sistema de transmissão da região levou a uma queda de tensão para 89,7 kV (78% do valor nominal), o que resultou no travamento dos compressores dos condicionadores de ar e, conseqüentemente, em

um significativo aumento na demanda de potência reativa, mantendo a subtensão por vários segundos. Observa-se que a subestação Valley foi a mais impactada nesse evento, especialmente o sistema de distribuição de 115 kV, onde levou aproximadamente 27 segundos para que a tensão se recuperasse ao nível de regime permanente. A interrupção das cargas por rejeição natural e a atuação da proteção térmica dos compressores contribuíram para uma recuperação mais rápida do sistema; no entanto, a tensão continuou a subir até próximo de 125 kV (109% do valor da tensão nominal) devido entrada de bancos de capacitores para controle de tensão do sistema que foram ligados durante a fase de recuperação lenta de tensão e permaneceram conectados ao sistema, sendo corrigida após 10 segundos com o desligamento dos mesmos.

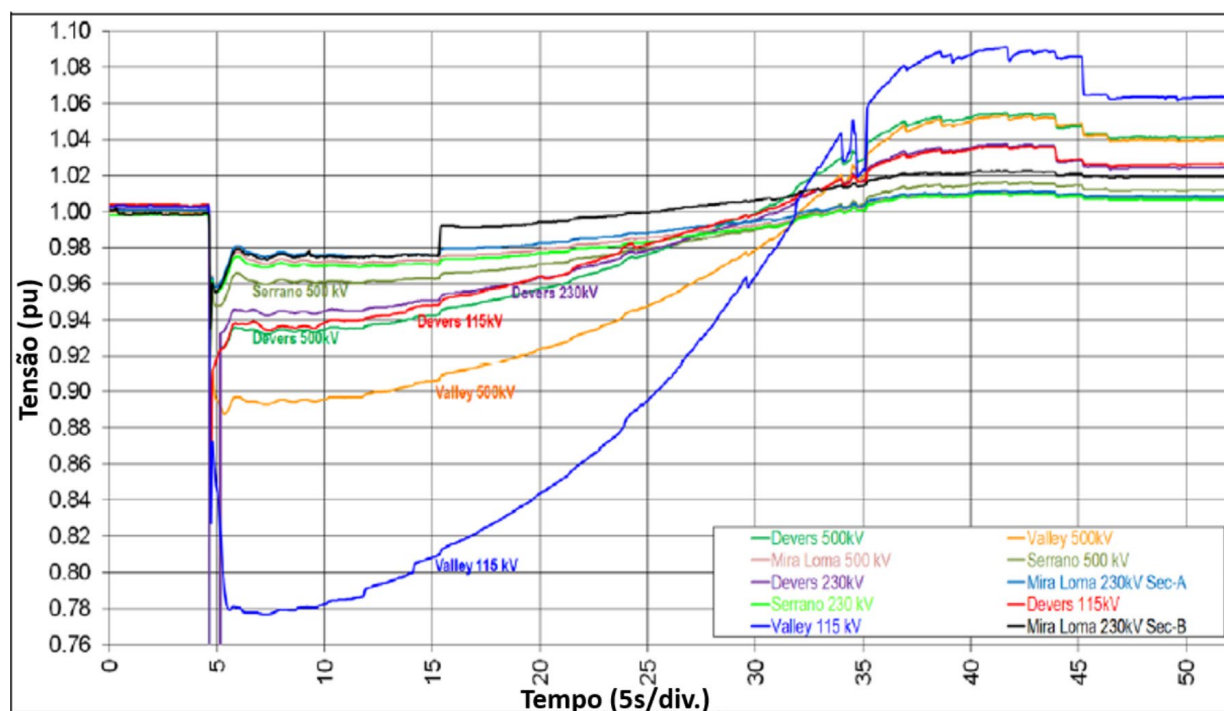


Figura 3-2 – FIDVR – Sul da Califórnia (EUA) [13]

3.2.2 Maçambará/RS - Brasil

Em dezembro de 2013, o Sistema Interligado Nacional (SIN) testemunhou um incidente significativo no Rio Grande do Sul, com o registro de FIDVR. O problema teve origem na explosão de um transformador de corrente da subestação Santa Rosa 1. Como resultado, várias linhas de transmissão foram desconectadas devido à atuação de suas proteções de retaguarda remota. Isso levou inclusive a

desligamentos de gerações como a da UHE São José e de outras pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) na região em função da atuação de proteções anti-ilhamento.

Essa sequência de eventos resultou em subtensão generalizada no estado do Rio Grande do Sul sensibilizando esquemas de corte de carga por subtensão. É importante ressaltar que a área em questão é caracterizada por extensas plantações de arroz, que são irrigadas por bombas hidráulicas acionadas por motores de indução e, devido a essas características do sistema, houve uma rejeição natural de carga de aproximadamente 870 MW.

A Figura 3-3 exibe a oscilografia de tensão da subestação Maçambará 230 kV. Observa-se a sequência do fenômeno da lenta recuperação de tensão, iniciando com a queda de tensão e lenta recuperação até a interrupção das cargas principalmente compostas por motores de indução que ficaram travados. Isso resultou em níveis de tensão significativamente elevados em comparação aos níveis pré-falta.



Figura 3-3 FIDVR – Maçambará/RS (Brasil) [14]

3.2.3 Rio Branco e Porto Velho (AC/RN) – Brasil

Um incidente em setembro de 2015 no Sistema Interligado Nacional (SIN) ocorreu nos estados do Acre e Rondônia. Um curto-circuito monofásico afetou a fase

C da Linha de Transmissão 230 kV Abunã / Porto Velho circuito 2, resultando em um significativo afundamento de tensão. Esse evento foi seguido por uma recuperação lenta de tensão nas subestações Rio Branco e Porto Velho 230 kV, conforme mostrado na Figura 3-4. Devido ao clima quente e úmido da região, há uma alta concentração de condicionadores de ar nesta região, o que pode ter contribuído para o afundamento de tensão e sua recuperação lenta, devido ao aumento na demanda por potência reativa desses equipamentos no momento da ocorrência.

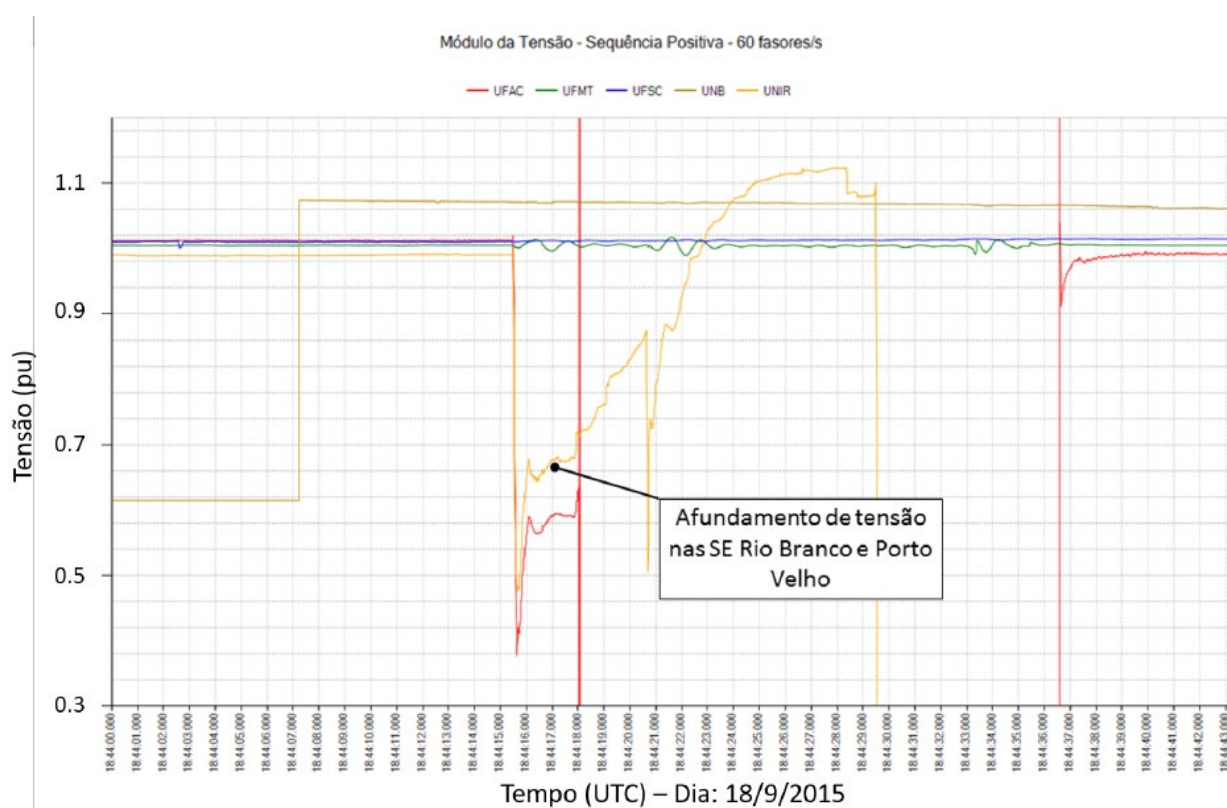


Figura 3-4 - FIDVR – Rio Branco e Porto Velho (AC/RN) Brasil [14]

A combinação desses dois problemas, juntamente com o desligamento de uma quantidade significativa de carga, resultou no sistema Acre / Rondônia exportando o excedente de potência gerada pelo *Back-to-Back* (404 MW) e pela UHE Samuel (164 MW). Isso causou uma perda de sincronismo do sistema em relação ao Sistema Interligado Nacional (SIN), conforme ilustrado na Figura 3-5, levando a atuação da Proteção de Perda de Sincronismo (PPS), que abriu as Linhas de 230 kV Ji-Paraná / Pimenta Bueno circuitos 1 e 2, isolando-o do restante do sistema. Houve uma sobrefrequência significativa devido ao excesso de potência neste sistema, levando ao desligamento dos filtros *Back-to-Back* e, por fim, ao colapso do sistema

Acre / Rondônia. No total, aproximadamente 695 MW de carga foram interrompidos durante esse distúrbio.

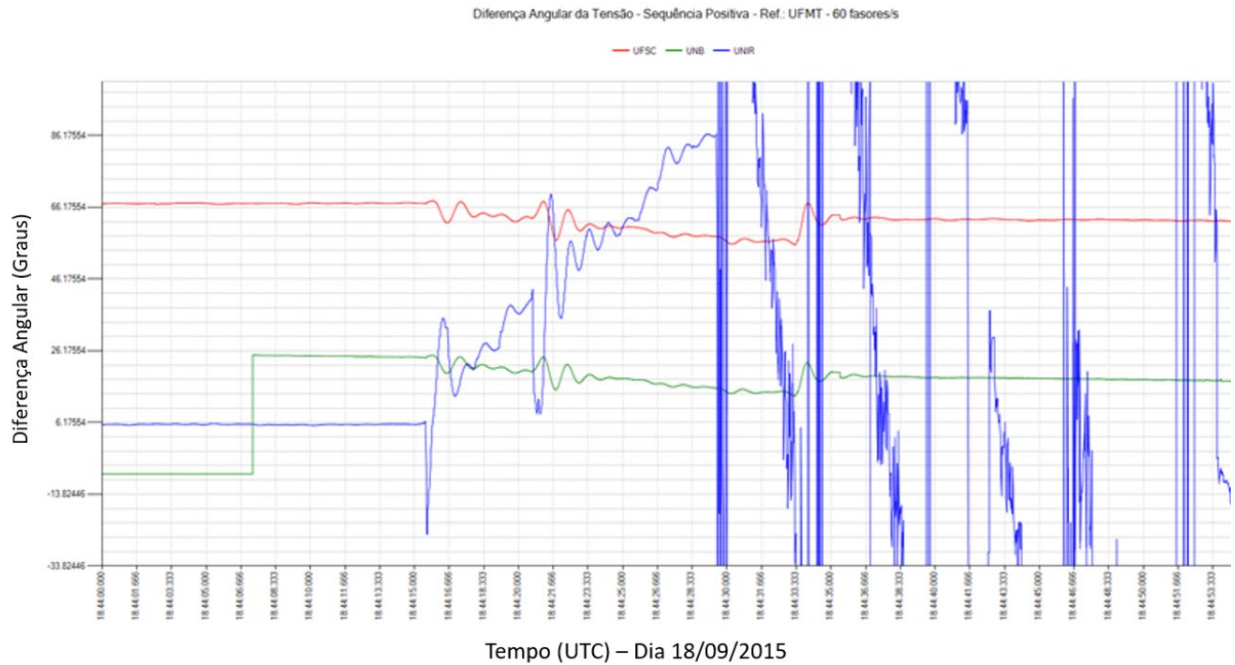


Figura 3-5 - Perda de Sincronismo – Rio Branco e Porto Velho (AC/RN) - Brasil [14]

3.2.4 Casos Notáveis de FIDVR

A Tabela 3 compila dados referentes a eventos significativos envolvendo o fenômeno de Atraso na Recuperação da Tensão Pós-Falta (FIDVR), detalhando a data, localização, duração e impactos observados [15].

Tabela 3 – Demais Casos Notáveis de FIDVR [15]

Data	Local	Duração	Carga interrompida	Notas
28/07/2003	Arizona Public Service/Phoenix	Vários segundos	440 MW	Perda de geração: 2.600 MW Número de clientes afetados: 90.000
01/07/2003	Arizona Public Service/Phoenix	9 segundos	1000 MW	Número de clientes afetados: 48.000

Data	Local	Duração	Carga interrompida	Notas
30/07/1999	Southern Balancing Authority/ Atlanta, Georgia	15 segundos	1900 MW	Perda de geração: 1.165 MW
05/08/1997	Southern California Edison/ Hesperia	20-25 segundos	3500 MW	---
29/07/1995	Arizona Public Service/Phoenix	20 segundos	2100 MW	---
03/05/1994	Florida Power and Light Company/Dade County	8 segundos	450 MW	---
18/08/1988	Florida Power and Light Company/Miami	10 segundos	825 MW	---
22/08/1987	Tennessee Valley Authority/ Memphis	10-15 segundos	1265 MW	---

Ocorrências frequentes de distúrbios que afetam a estabilidade da tensão pode ser um problema persistente em áreas com uma alta concentração de motores de indução, seja em sistemas de condicionadores de ar, bombeamento, ou em contextos industriais, entre outros. Para viabilizar uma análise aprofundada dos distúrbios nessas regiões, é essencial realizar simulações dinâmicas que levem em conta o comportamento transitório desses motores como parte da carga. Essas simulações permitem identificar eventuais desvios dos padrões de segurança operacional do sistema, possibilitando, assim, a investigação e implementação de medidas corretivas para prevenir ou minimizar potenciais colapsos de tensão no futuro.

No capítulo a seguir, é apresentada a técnica da simulação dinâmica híbrida – SDH com objetivo de expor a sua relevância e potencialidade de implementação para validar resultados e desempenhos de modelos dinâmicos, de forma a garantir que os resultados obtidos através estudos elétricos de sistemas de potência estão aderentes à realidade e mitigar a possibilidade de desvio entre os valores medidos e simulados.

4 SIMULAÇÃO DINÂMICA HÍBRIDA – SDH

4.1 CONCEITO

O conceito básico de simulação híbrida ou *playback simulation* trata da injeção de grandezas elétricas, obtidas via medição ou monitoramento de sistemas reais, em *softwares* de simulação dinâmica de sistemas de potência [16].

O processo da SDH está ilustrado na Figura 4-1. Os dados fasoriais são medidos por uma ou mais Unidades de Medição Fasorial (do inglês *Phasor Measurement Unit*- PMU), e armazenados em um concentrador de dados fasoriais (do inglês *Phasor Data Concentrator* - PDC) (Figura 4-1 (a)). Os dados de medição são injetados no modelo de simulação do subsistema sob análise (Figura 4-1 (b)), visando reproduzir o comportamento do sistema externo conectado ao subsistema sob simulação (por exemplo, uma unidade geradora ou área do sistema elétrico).

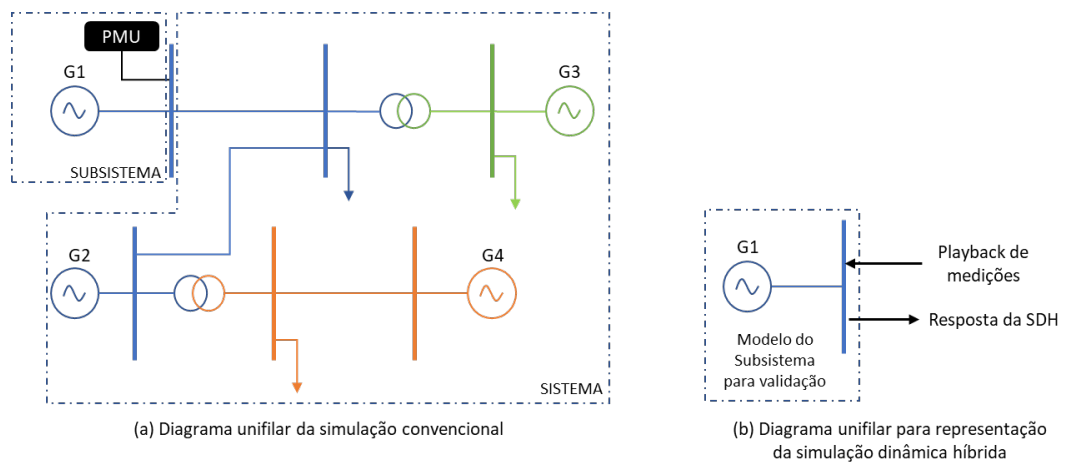


Figura 4-1 Diagrama Conceitual de Simulação Dinâmica Híbrida - SDH

Tradicionalmente, simulação dinâmica de sistemas de potência e medições em campo são realizadas e analisadas separadamente. Com o paradigma da SDH, trazem-se para o ambiente de simulação dados de eventos verificados na prática por medições em campo.

A técnica de SDH pode ser interpretada como uma interface entre sistemas reais e simulações computacionais. Assim, traz-se para o ambiente de simulação, eventos verificados na prática por medições em campo [17].

O maior ganho com a utilização da técnica, sem dúvida, refere-se à comparação entre sinais medidos em campo e respostas obtidas via simulação híbrida numa base comum, fato que implica na possibilidade de validação de modelos dinâmicos. A rigor, se o modelo se encontra ajustado, respostas obtidas via simulação híbrida devem ser similares às aquelas coletadas por sistemas de aquisição de dados [18].

Além do benefício da validação de modelos, a SDH possui outras vantagens aplicáveis à área de estudos elétricos, dentre as quais destacam-se:

- I. Validação de modelos de máquinas síncronas, sistemas de controle e cargas dinâmicas;
- II. Reprodução de cenários reais com fidelidade (*playback* de eventos);
- III. Representação do comportamento de sistemas externos por meio das condições das barras de fronteira. As dinâmicas dos demais elementos estão incluídas nos registros e, portanto, não precisa ser representada na simulação.
- IV. Redução do número de componentes a serem analisados no caso de validação de modelos;
- V. Auxílio no entendimento do desempenho do sistema de potência;
- VI. Identificação de causas de perturbações;
- VII. Comparação das respostas de distintos programas de simulação por meio de modelos corretos e registros conhecidos;
- VIII. Reprodução de grandezas não disponíveis para medição e que possam interessar para a análise do sistema.
- IX. Possibilidade de comparação entre medições e simulações nas mesmas condições de operação (cenários de perturbação).

Um ponto que merece atenção durante o processo de uma simulação dinâmica híbrida é a necessidade de compatibilização dos intervalos de amostragem dos registros de medição empregados e do passo de simulação definido no *software* de simulação dinâmica.

Unidades de Medição Fasorial que operam, por exemplo, a 60 fasores/s, fornecem registros em intervalos de aproximadamente 16,67 ms, enquanto normalmente são utilizados passos de integração da ordem de 1 a 5 ms em simulações dinâmicas. Nestes casos quando a diferença de tempo entre amostras obtidas não coincide com o passo de simulação do *software* de simulação dinâmica, os registros devem passar por um processo de interpolação numérica para compatibilização dos intervalos de amostragem que pode ser realizada pelo próprio *software* ou pelo usuário a fim de gerar as amostras não obtidas via medição.

Na Figura 4-2 é apresentado este processo no qual o registro de medição fictício possui 30 amostras por segundo e o passo de simulação é igual a 0,0111 s e é feita a interpolação linear. Na prática, pode ser realizada pela própria ferramenta de simulação, o que é conveniente para implementação da SDH.

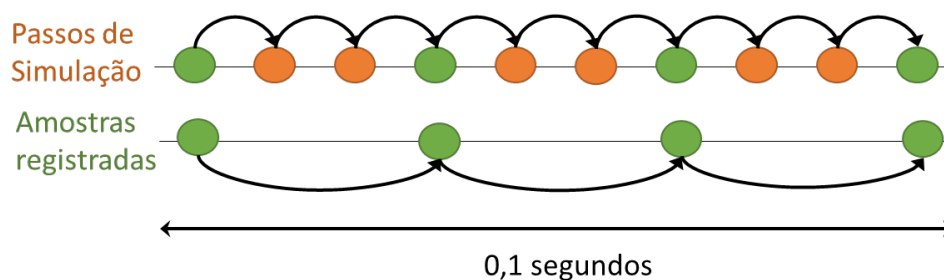


Figura 4-2 Interpolação de Amostras Registradas no Processo de uma SDH

4.2 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Existem dois métodos para implementar uma simulação dinâmica híbrida que são classificados da seguinte forma [17], [19], [20]:

- Método Direto: onde é possível acessar o esquema de solução das equações algébrico-diferenciais via programação computacional;
- Método Indireto: onde se utiliza componentes externos a fim de emular o comportamento dinâmico de grandezas em *softwares* comerciais de simulação de sistemas elétricos de potência.

4.2.1 MÉTODO DIRETO

Quando definida a estratégia pelo método direto, é necessária a manipulação direta no vetor de equações algébrico-diferenciais. Parte da rede terá seus valores de tensão inseridas diretamente através do arquivo de dados registrados.

O fluxograma do processo de simulação dinâmica híbrida via método direto está ilustrado na Figura 4-3.

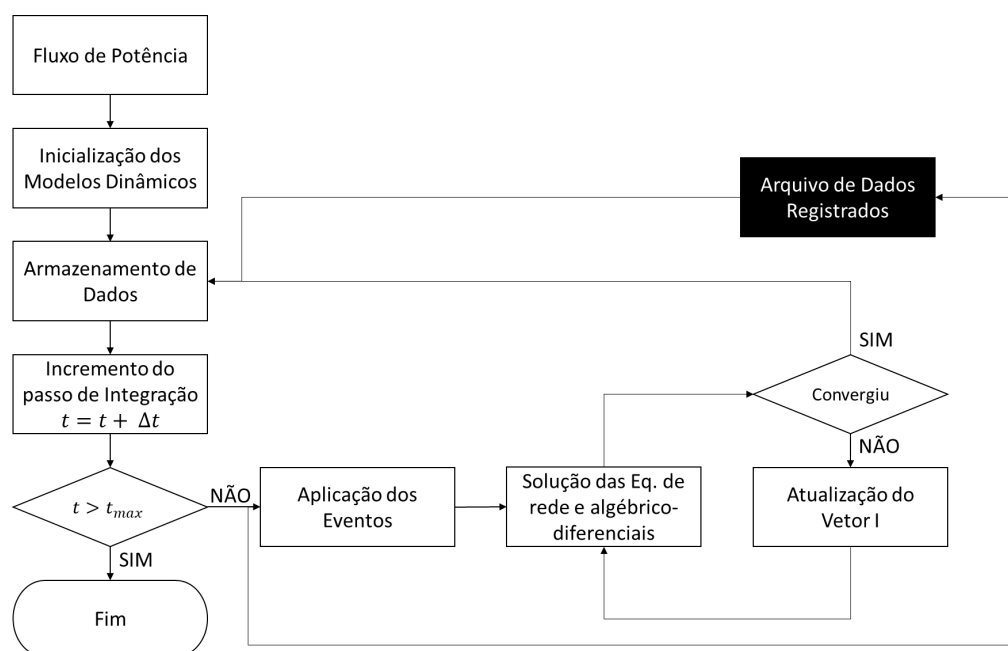


Figura 4-3 – Fluxograma da SDH – Método Direto

4.2.2 MÉTODO INDIRETO

No método indireto empregam-se elementos do sistema, como geradores, transformadores e cargas, os quais possuem controles definidos que ditam o comportamento de grandezas baseado em dados externos. Existem na literatura os seguintes métodos indiretos:[19]

- Método do transformador defasador;
- Método do gerador de resposta rápida;
- Método da impedância variável;
- Método das potências injetadas;

4.2.2.1 MÉTODO DO TRANSFORMADOR DEFASADOR

O método do transformador defasador consiste em definir os valores de magnitude de tensão “V” e de ângulo “ θ ” da barra fronteira ao subsistema a ser estudado, através do emprego de um transformador defasador ideal e de um gerador representado pelo modelo clássico.

O gerador aplicado neste método possui constante de inércia elevada, reatância transitória de eixo direto baixa e fornece tensão de referência constante, com magnitude “ E_g ” em 1 p.u. e ângulo “ δ_g ” em 0 graus, como ilustrado na Figura 4-4.

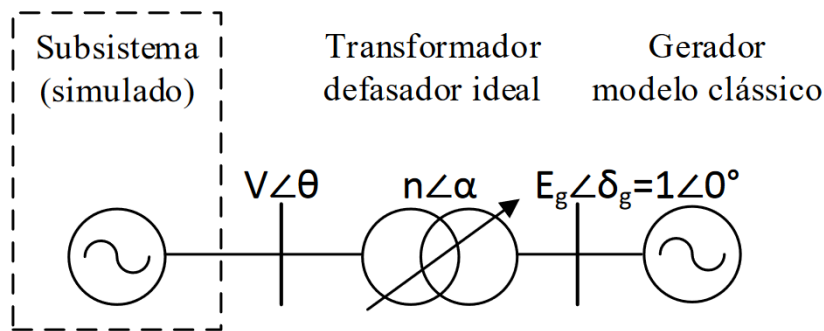


Figura 4-4 Esquema do Método do Transformador Defasador [17], [20].

Desta forma, a cada passo de simulação, o valor do tap “n” e da fase “ α ” do transformador defasador são atualizados, respectivamente, pelas Equações (4.1) e (4.2).

$$n = \left(\frac{V}{E} \right) = V \quad (4.1)$$

$$\alpha = \theta - \delta = \theta \quad (4.2)$$

4.2.2.2 MÉTODO DO GERADOR DE RESPOSTA RÁPIDA

O método do gerador de resposta rápida consiste em definir a tensão e a frequência da barra de fronteira do subsistema a ser estudado por meio de um gerador associado a reguladores de tensão (RT) e velocidade (RV) de resposta rápida. Neste método o gerador também deve possuir constante de inércia baixa, e reatância transitória de eixo direto baixa. O método pode ser verificado na Figura 4-5.

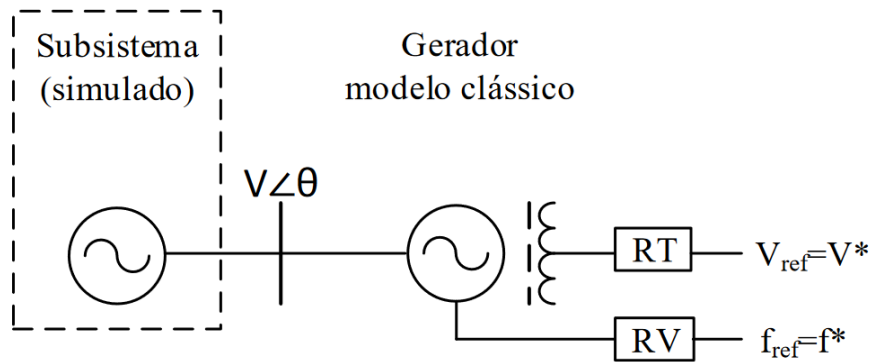


Figura 4-5 Esquema do Método do Gerador de Resposta Rápida [16], [20].

O valor da tensão “ V^* ” e da frequência do sinal “ f^* ” registradas são usadas como referências, respectivamente, para o RT e o RV. Em função da inércia baixa do gerador e da resposta praticamente instantânea da unidade geradora e dos controladores associados, a tensão terminal do subsistema segue os valores registrados [17], [20].

4.2.2.3 MÉTODO DA IMPEDÂNCIA VARIÁVEL

No método da impedância variável, o elemento do sistema que será controlado com dados externos é representado por uma impedância “ $Z(k)$ ” calculada, a cada passo de simulação, pela razão entre a tensão “ $V(k)$ ” e a corrente injetada “ $I(k)$ ” da barra fronteira do subsistema a ser estudado, conforme ilustrado na Figura 4-6 e definido pela Equação (4.3).

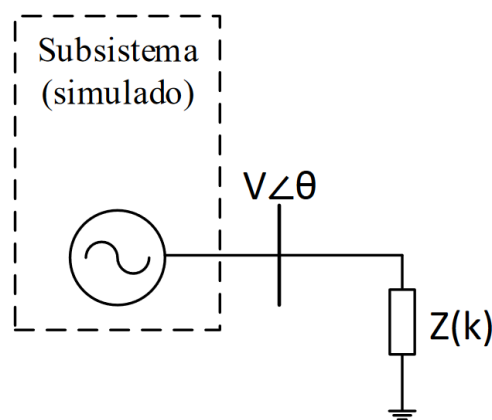


Figura 4-6 Esquema do Método da Impedância Variável [20].

$$Z(k) = \left(\frac{V(k)}{I(k)} \right) \quad (4.3)$$

4.2.2.4 MÉTODO DAS POTÊNCIAS INJETADAS

Por fim, o método das potências injetadas consiste em definir a potência ativa “P(k)” e reativa “Q(k)” registradas na barra fronteira do subsistema a ser estudado a cada passo de integração, conforme esquema da Figura 4-7.

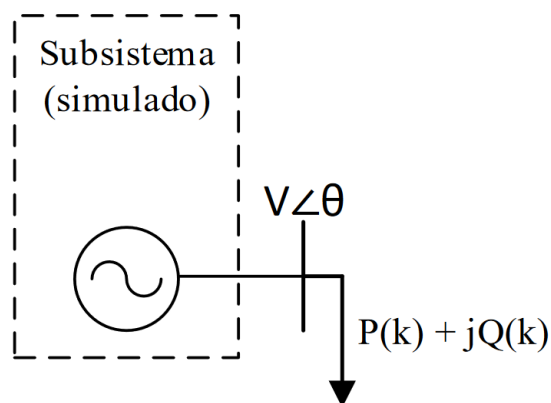


Figura 4-7 Esquema do Método das Potências Injetadas [20].

4.3 IMPLEMENTAÇÃO NO SOFTWARE ANATEM

As simulações dinâmicas híbridas desenvolvidas e apresentadas no decorrer deste trabalho utilizam o *software* ANATEM¹ do fabricante CEPEL. Apesar do programa adotado não contemplar funções de inclusão de dados externos para solução das equações algébrico-diferenciais via programação, inviabilizando, desta forma, a utilização do método direto, ele é capaz de realizar a SDH através do método indireto apresentado e detalhado no item 4.2.2.

4.3.1 ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO

O passo a passo e as potencialidades da utilização da técnica de SDH no processo de validação de modelos dinâmicos serão ilustradas através da reprodução do estudo de uma perturbação real no SIN realizada pelo próprio autor em [18]. Neste

¹ Análise de Transitórios Eletromecânico (Anatem), versão 12.3.0, ano 2022, fabricante Cepel

trabalho foi selecionada a perturbação do dia 13/09/2022, às 16h14min BRT, que afetou a Interligação Acre/Rondônia.

A escolha das PMUs está relacionada diretamente com os modelos cujo desempenho se deseja avaliar. Neste trabalho, aproveitando que a perturbação conduziu ao ilhamento do sistema Acre/Rondônia, verificou-se a oportunidade de substituir os modelos representativos do *back-to-back* (BTB) por medidas de sincrofasores de PMU associadas aos dois circuitos da LT 230 kV Coletora Porto Velho / Porto Velho. Tal estratégia permite eliminar as incertezas da modelagem do BTB, permitindo deslocar o foco da análise para a validação dos modelos para simulação dinâmica dos demais componentes na ilha.

4.3.1.1 DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA

A perturbação teve início com a incidência de curtos-circuitos monofásicos na LT 230 kV Pimenta Bueno / Vilhena C1, C2 e C3 provocados por temporais e ventos fortes. As falhas foram eliminadas pelas atuações das proteções principais e alternadas de ambos os terminais das LTs. Não houve sucesso no religamento automático das linhas, em função das reincidências dos curtos-circuitos. Simultaneamente aos desligamentos dos circuitos da LT 230 kV Pimenta Bueno - Vilhena, que desconectaram os estados do Acre e de Rondônia do restante do SIN, ocorreu também o desligamento automático da LT 230 kV Ji-Paraná - Pimenta Bueno C3. A ilha formada foi suprida pelas usinas hidrelétricas Samuel, Santo Antônio e Rondon e pela estação conversora *back-to-back*. A frequência na ilha atingiu o valor mínimo de 58,06 Hz, com atuações dos 1º e 2º estágios previstos do Esquema Regional de Alívio de Carga – ERAC, com interrupção de 209 MW de cargas.

4.3.1.2 PREPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Na Figura 4-8 são apresentadas as grandezas mais relevantes do sistema de interesse, instantes antes do início da ocorrência, obtidas com base no sistema de supervisão do ONS. As medidas foram utilizadas como referência para preparação e ajuste do caso de fluxo de potência utilizado nos estudos.

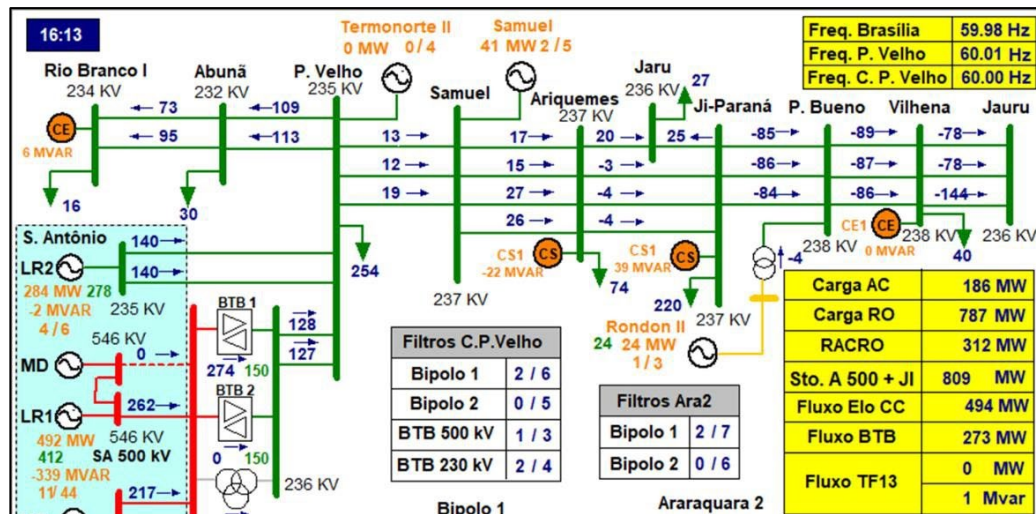


Figura 4-8 - Situação da área Acre/Rondônia no minuto anterior à ocorrência do dia 13/09/2022 [21]

Por meio do código de execução DLDN do Anatem, pode-se modelar uma parcela ou a totalidade da carga estática de uma barra CA por um controle que descreva a dinâmica das potências ativa e reativa.

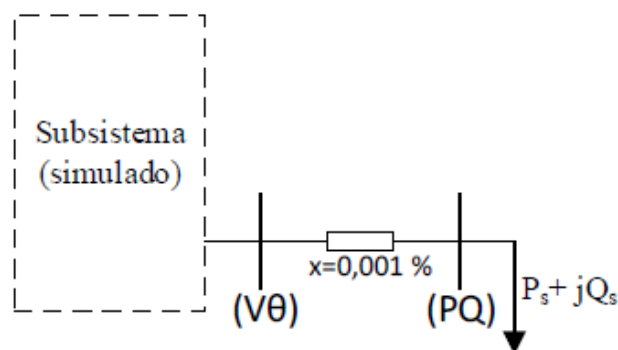


Figura 4-9 - Esquema do Método da CDC [18]

O primeiro passo para o processo de SDH pelo método indireto da CDC (Carga Dinâmica Controlada) é a preparação de um caso de fluxo de potência correspondente ao estado inicial pré-falta do sistema e definir a barra que será associada à CDC, conforme Figura 4-9. A carga dinâmica é então conectada a uma barra PQ, e suas parcelas de potência ativa (P) e reativa (Q) são inicializadas com os valores iniciais de potência registrados (P_r e Q_r).

Assim, conforme Figura 4-10, foi realizada a substituição dos modelos representativos do back-to-back (BTB) por uma carga din afim de viabilizar a simulação dinâmica híbrida por uma carga dinâmica controlada com medidas de sincrofasores de PMU.

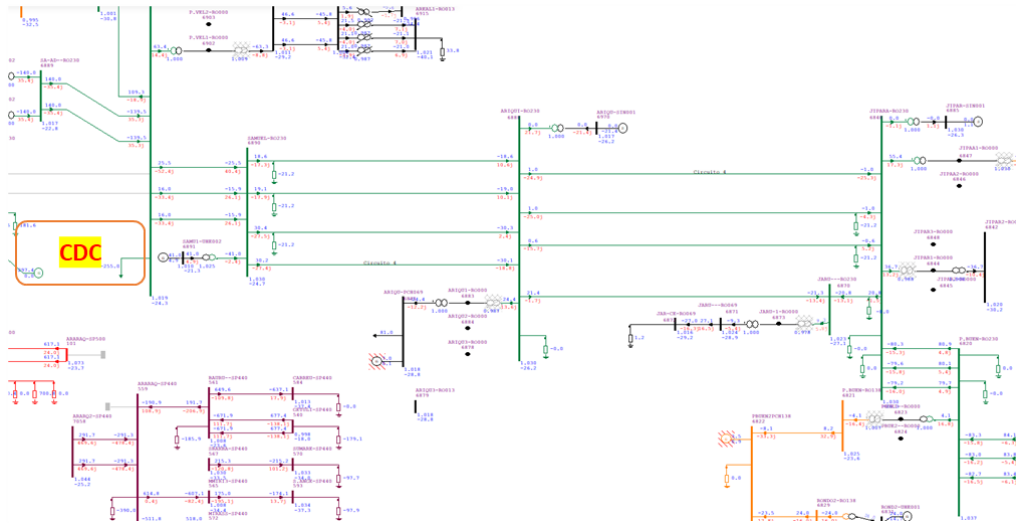


Figura 4-10 - Substituição do *back-to-back* (BTB) por uma carga

Na Figura 4-11 mostra-se que as excursões de P e Q são impostas indiretamente por um CDU. Neste, a função SINARQ faz com que as variáveis de interface “Pi” e “Qi” recebam, respectivamente, a cada passo de simulação, os valores de Pr e Qr da PMU. Por fim, o código de execução DLDN altera o valor de P e Q da carga estática presente na simulação dinâmica, respectivamente, pelas variáveis de interface Pi e Qi.

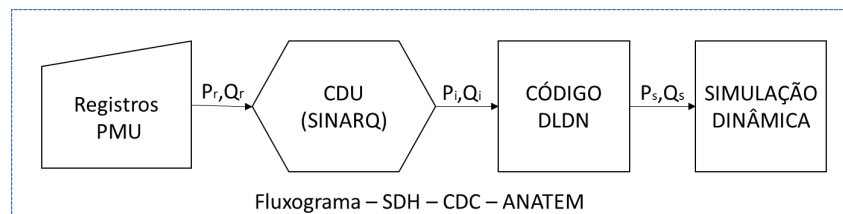


Figura 4-11 - Fluxograma da SDH pelo método da CDC

Na Figura 4-12 é apresentado o CDU que foi desenvolvido e utilizado nas simulações dinâmicas híbridas pelo método da CDC.

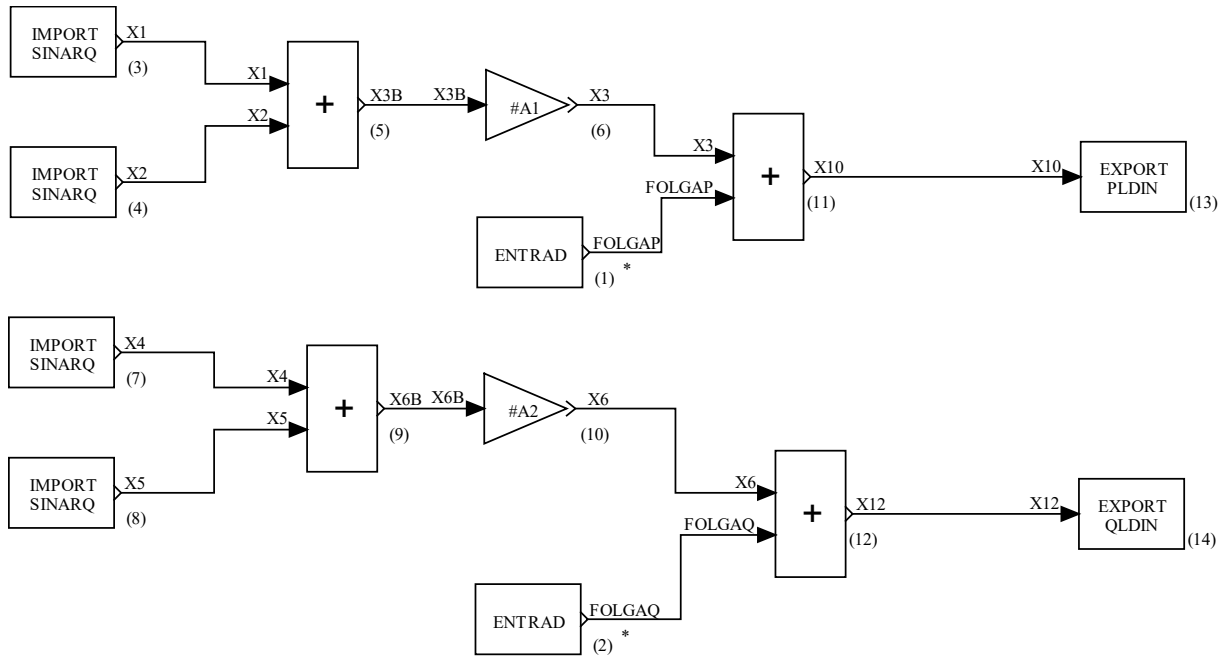


Figura 4-12 - Diagrama de Blocos - CDU da CDC no Anatem

4.3.1.3 RESULTADOS DA SDH

Na Figura 4-13 e Figura 4-14 estão apresentados os gráficos da tensão e frequência na barra de 230 kV da SE Porto Velho, respectivamente, obtidos da seguinte forma: (i) em azul e verde, valores referenciais correspondentes às medidas das PMUs do campo; (ii) em vermelho, resultados SDH, considerando a base de dados oficial do ONS para simulação de transitórios eletromecânicos e a cronologia de eventos apresentada no relatório de análise da perturbação; e (iii) em preto, resultados da SDH com os ajustes finais da simulação, indicados na sequência.

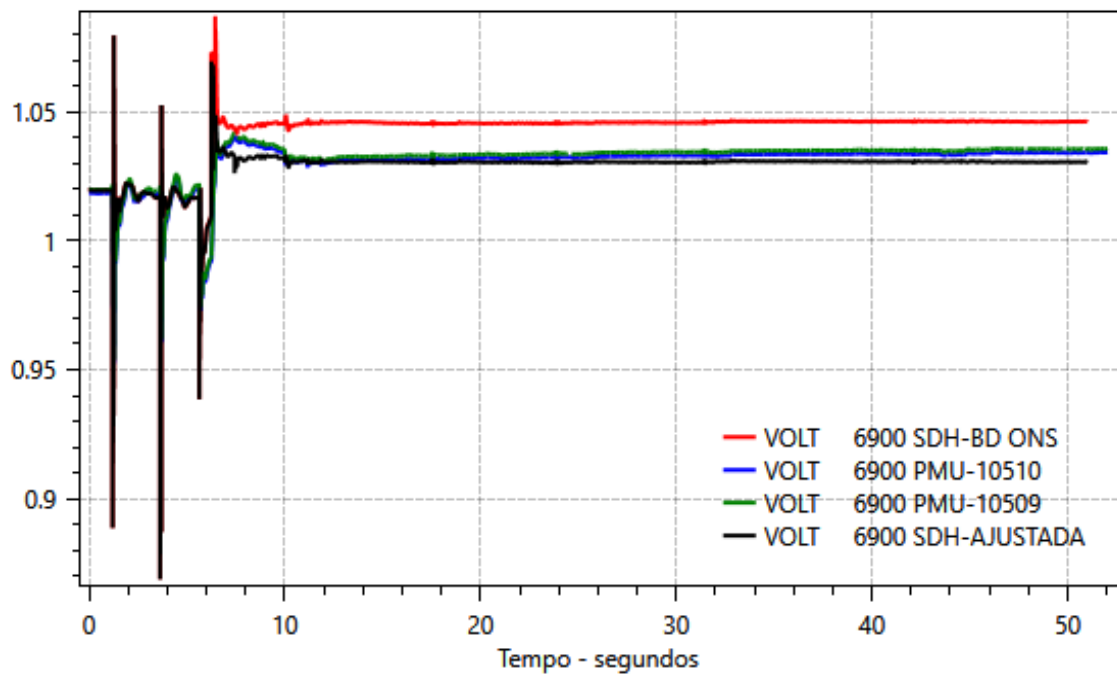


Figura 4-13 - Tensão SDH(CDC) x PMU

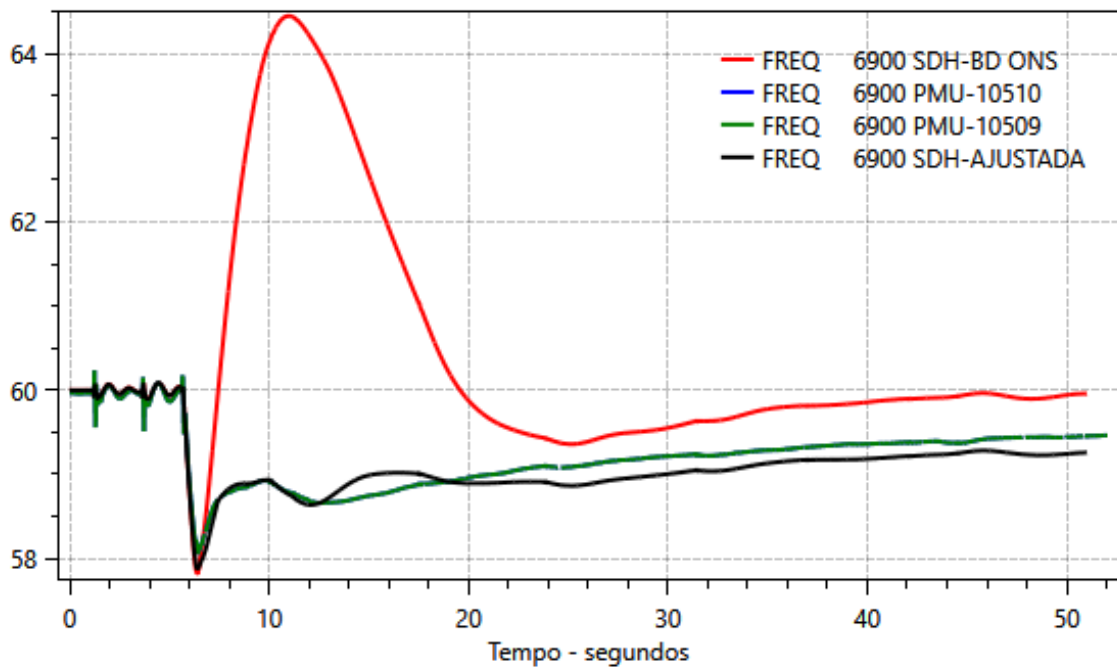


Figura 4-14 - Frequência SDH(CDC) x PMU

Os resultados das SDHs indicam aderência satisfatória com o registros de PMU no período anterior ao ilhamento do sistema Acre/Rondônia, mesmo considerando a parametrização original que consta da base de dados do ONS para simulação de transitórios eletromecânicos e a cronologia de eventos apresentada no

relatório de análise da perturbação [21]. Após o ilhamento, no entanto, são observadas discrepâncias significativas entre os resultados da SDH com parametrização original (curva vermelha) e os registros de campo (curvas azul e verde).

As causas das discrepâncias foram investigadas em [18], tendo como base a realização de inúmeras SDHs e a análise de registros adicionais de PMUs do sistema Acre/Rondônia. Com base nos registros das linhas de 230 kV de Porto Velho para Rio Branco, por exemplo, foi identificada a reconexão automática de carga na ilha durante a recuperação da frequência, o que resultou no comprometimento do processo de recuperação. Em relação à evolução da taxa de variação de frequência após o ilhamento e até a atuação do ERAC, a consideração do amortecimento da carga com a frequência nas SDH, tendo como referência o valor de 0,5 pu/pu, resultou no aumento da aderência dos resultados com os registros de campo.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos teóricos e as modelagens matemáticas disponíveis na literatura para a realização da simulação dinâmica híbrida. Foram elencados os benefícios da simulação dinâmica híbrida e suas aplicabilidades na área de estudos elétricos, com destaque para o processo de validação de modelos.

Através de um exemplo foi possível verificar as potencialidades da utilização da técnica de simulação dinâmica híbrida no processo de validação de modelos dinâmicos por meio de um estudo com dados específicos de um subsistema do Sistema Interligado Nacional-SIN.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 OBJETIVO

Este capítulo tem como objetivo comprovar a potencialidade e ganhos com a aplicação da técnica da simulação dinâmica híbrida para a validação de modelos de carga com foco no fenômeno da FIDVR. Para isso, foi utilizado um estudo de caso aplicado a uma região específica do Sistema Interligado Nacional que resulta na manifestação do fenômeno FIDVR (*Fault-Induced Delayed Voltage Recovery*).

Foi avaliado o desempenho do sistema em diferentes cenários, comparando a resposta de modelos de carga puramente estáticos, como o modelo ZIP, com a inclusão progressiva de modelos dinâmicos do tipo de motores de indução. O objetivo foi o de avaliar os benefícios que derivam do uso da SDH no processo de validação de modelos de simulação.

Para este estudo, foi selecionada a região do Acre/Rondônia, uma vez que suas características a torna suscetível ao fenômeno da lenta recuperação de tensão. Foi analisado o impacto de uma contingência específica na região, que causa uma queda de tensão significativa. Através dessa análise, utilizando a técnica da SDH, valida-se os modelos de carga ZIP (estático) e motores de indução (dinâmico) e suas capacidades de reproduzir o fenômeno da FIDVR.

5.2 PREPARAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Diante da indisponibilidade de medições reais de PMU com registros do fenômeno FIDVR de uma região do Sistema Interligado Nacional, foi necessária a geração de medidas sintéticas para a validação da metodologia proposta. Para suprir essa lacuna e viabilizar o estudo, optou-se pela criação de um cenário base simulado capaz de representar a dinâmica do sistema.

Adotou-se o caso completo de referência do ONS 3Q2024 – Dezembro – Máxima Diurna como caso de estudo original. Os parâmetros do modelo ZIP das cargas são aqueles constantes da base de dados do Anatem (2407R1). Foi definida

a contingência da LT 230 kV Abunã / Rio Branco C3 em função de ser uma das mais críticas para o desempenho da área Rio Branco, subsistema selecionado para ser avaliado. Os resultados obtidos para o caso com modelo ZIP e ZIP+MI estão apresentados na Figura 5-1 e Figura 5-2, respectivamente.

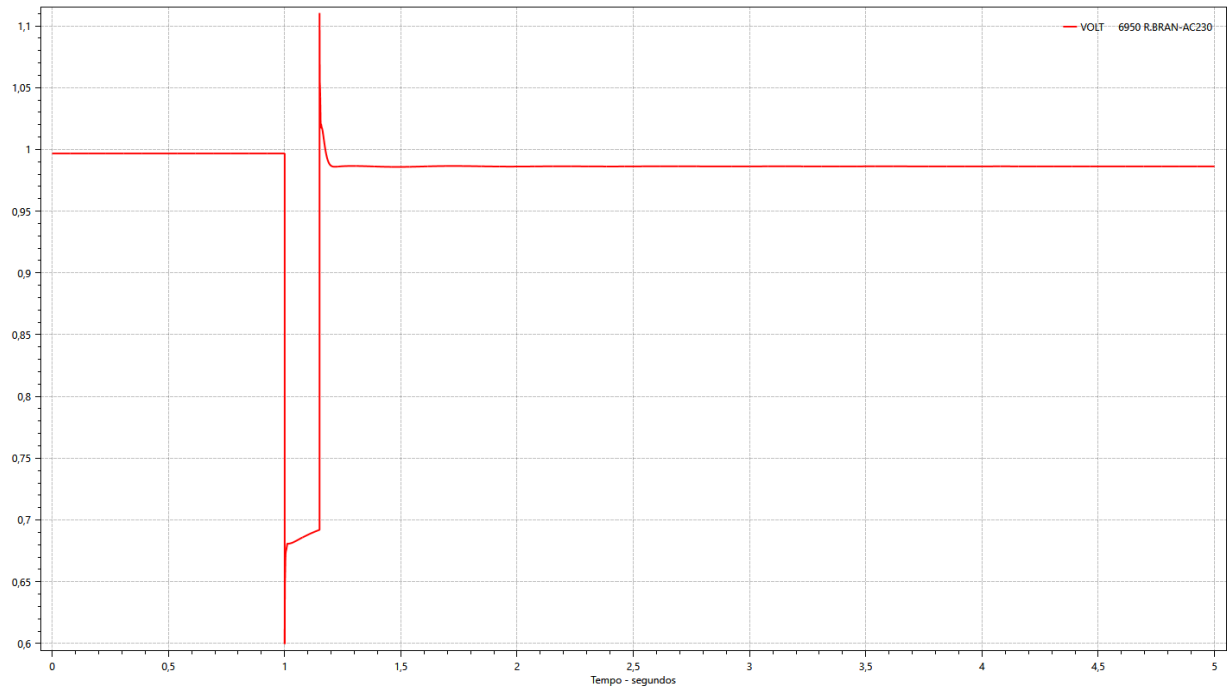


Figura 5-1 Tensão [SE Rio Branco 230 kV] - ZIP

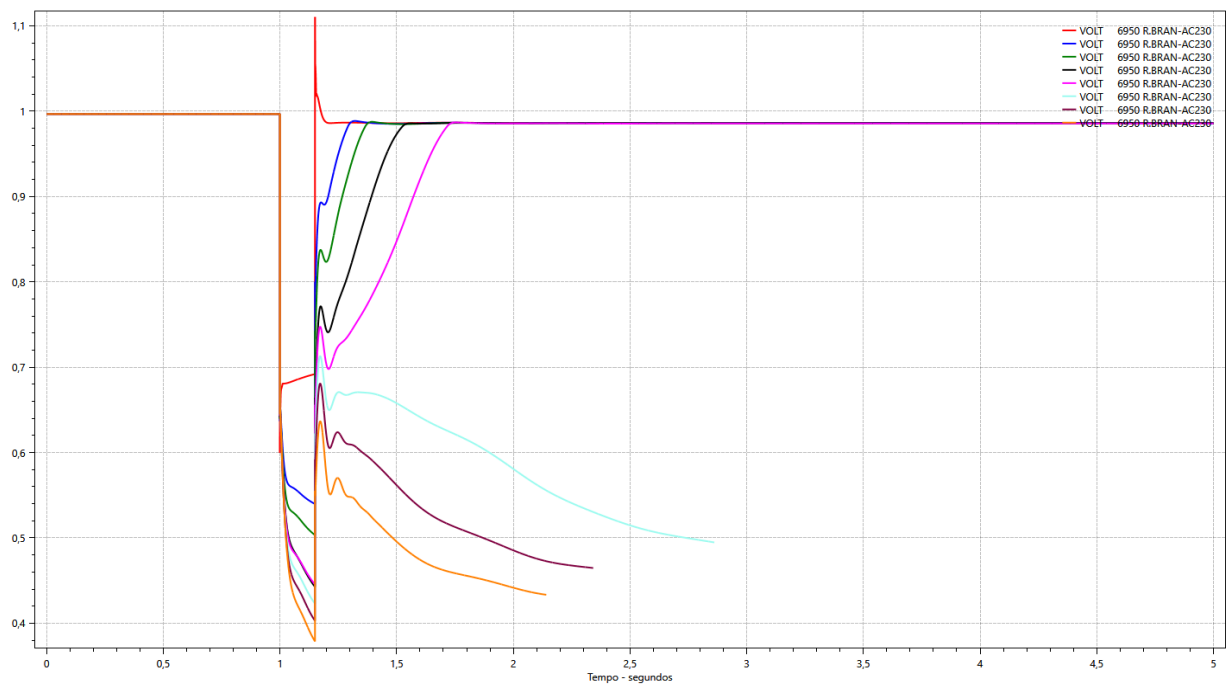


Figura 5-2 Tensões [SE Rio Branco 230 kV] - ZIP+MI

O trabalho foi dividido em duas etapas. Na etapa 1 buscou-se determinar uma parametrização para a carga apenas modelada como ZIP que resulte em uma menor discrepância entre os resultados da SDH e as medidas de referência, que por premissa, correspondem a um caso com a presença de motores de indução. Já a etapa 2 adotou uma busca de uma parametrização para modelos compostos, envolvendo modelos estáticos ZIP e de motores de indução.

5.3 ETAPA 1 – 100% MODELO ZIP

Nesta etapa foram avaliadas as aplicações do método do gerador de resposta rápida. Está é a única estratégia possível de ser aplicada no caso em questão, pois no subsistema retido não há geradores síncronos e a ferramenta ANATEM não permite que fontes de corrente ou tensão controladas sejam utilizadas em sistemas sem fontes síncronas. O objetivo foi determinar uma parametrização para o modelo ZIP que resulte em uma menor discrepância entre os resultados da SDH e as medidas de referência. Apresenta-se, a seguir, os registros produzidos conforme item 5.2 utilizado na SDH, bem como os resultados obtidos nas simulações dinâmicas híbridas.

5.3.1 Avaliação da SDH – Método do Gerador de Resposta Rápida

Para as simulações dinâmicas híbridas, empregando o método do gerador de resposta rápida, foi necessária a implementação de dois Controladores Definidos pelo Usuário (CDUs), responsáveis pela troca dos dados de tensão e frequência das curvas de referência registradas em cada simulação realizada.

Na Figura 5-4 e Figura 5-5 são apresentadas os CDUs desenvolvidos para a SDH pelo método Gerador de Resposta Rápida

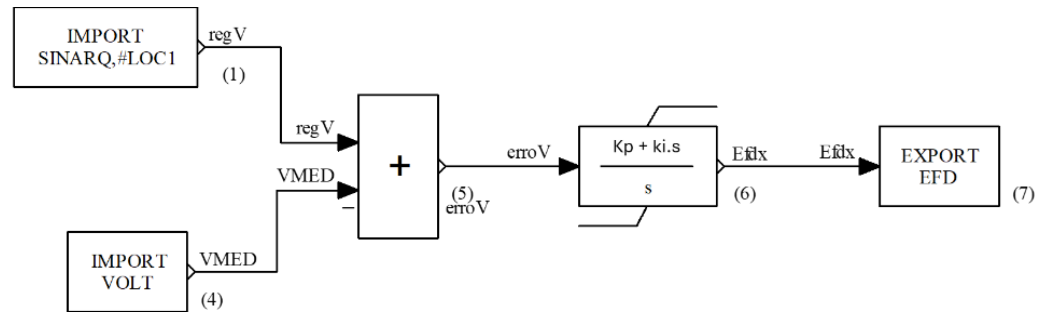


Figura 5-4 Diagrama de Blocos - CDU do Regulador de Tensão para SDH no Anatem

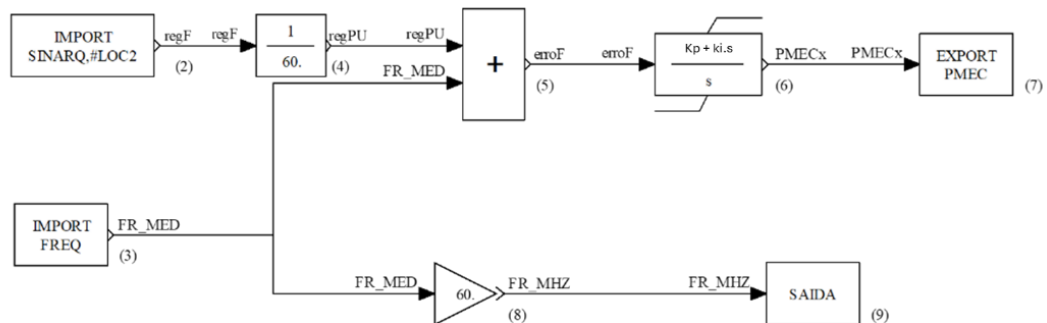


Figura 5-5 Diagrama de Blocos - CDU do Regulador de Velocidade para SDH no Anatem

As configurações e parâmetros utilizados estão disponíveis no **ANEXO A**.

Na Figura 5-6 são apresentados os gráficos de tensão na SE Rio Branco 230 kV obtidos com o caso completo com 50% de motores de indução modelados na região de Rio Branco e com o caso reduzido através da técnica da SDH; as potências ativa e reativa são apresentadas na Figura 5-7 e Figura 5-8, respectivamente. Observa-se que a tensão e as potências ativas e reativas na fronteira da SDH apresentam-se aderentes às curvas da simulação completa onde é possível verificar a validade dos resultados do caso da SDH.

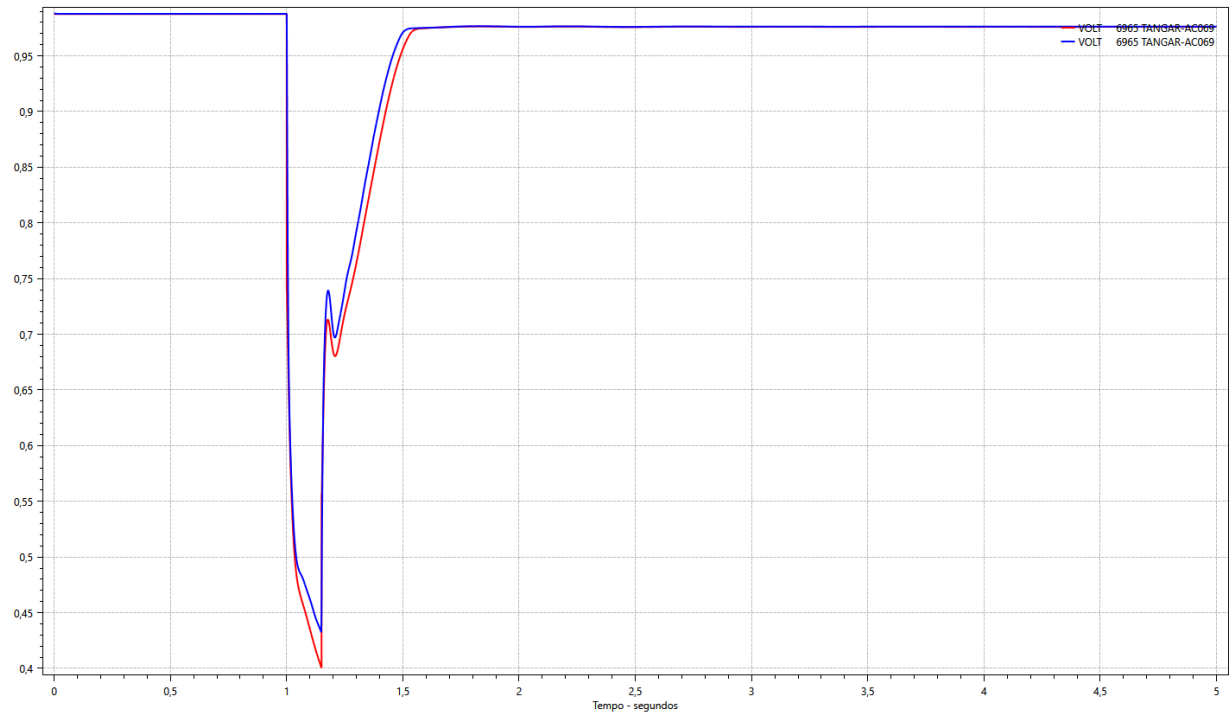


Figura 5-6 Tensão na SE Rio Branco 230 kV

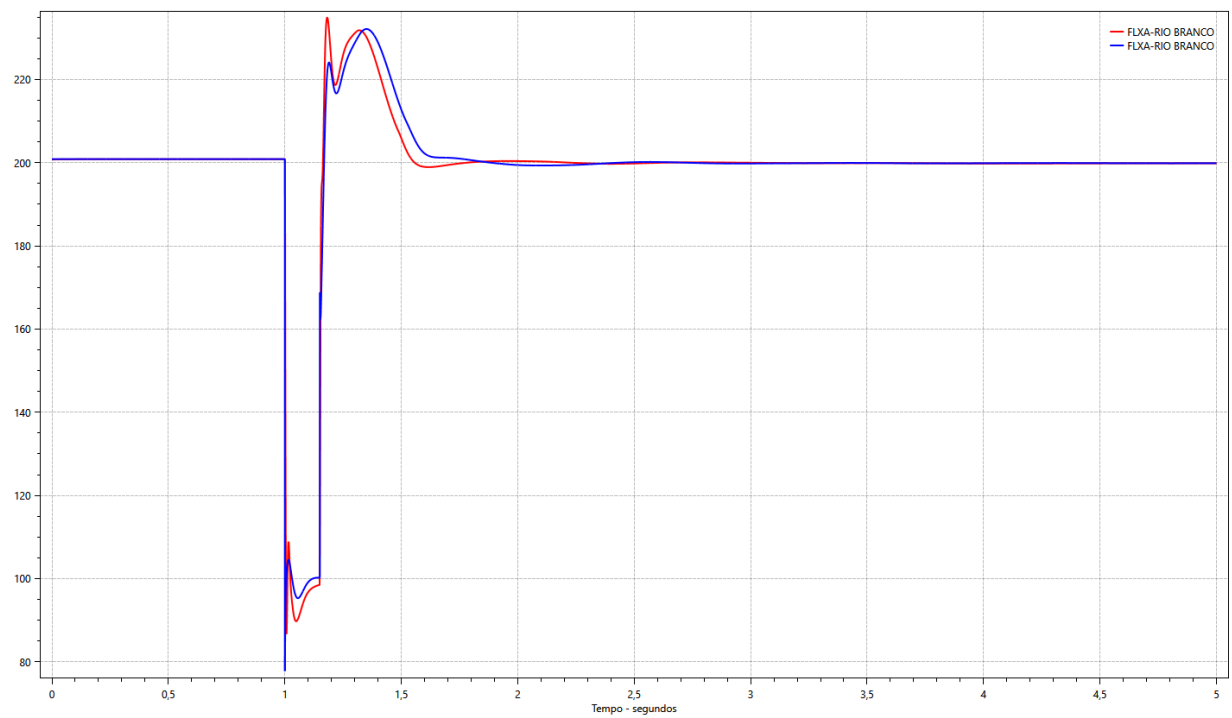


Figura 5-7 Potências Ativas na SE Rio Branco 230 kV

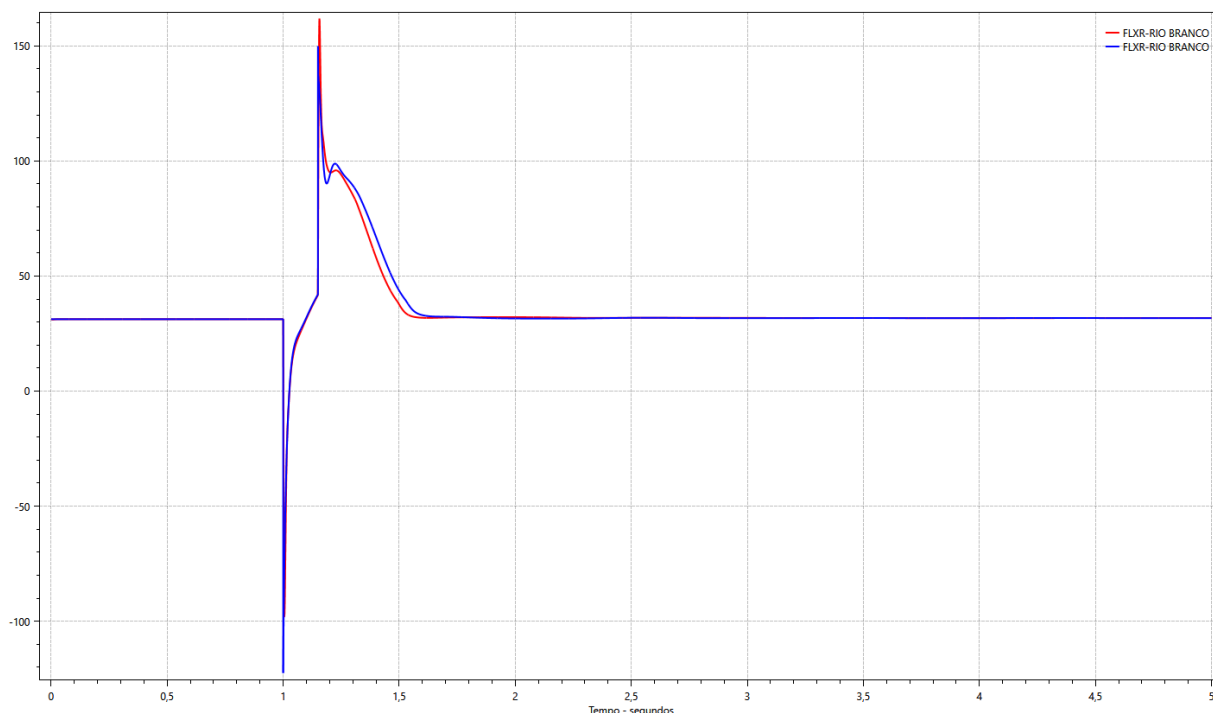


Figura 5-8 Potências Reativas na SE Rio Branco 230 kV

5.3.2 Ganho de Tempos de Processamento – SDH

Uma vez verificada a validade dos resultados da simulação dinâmica híbrida no item 5.3.2, apresenta-se, na sequência, os ganhos de tempos de processamento das simulações de transitórios eletromecânicos realizadas no Anatem versão 12.6.0.

Foram realizadas simulações conforme o item 5.2. A primeira simulação (em azul) utilizou o caso de estudo completo, com 50% da carga da região de Rio Branco modelada como motores de indução. Na segunda (em laranja) manteve-se o mesmo caso base, porém com todas as cargas representadas por modelos ZIP, conforme a parametrização da base de dados do ONS. Na terceira simulação (em verde) considera-se o caso da SDH com a rede elétrica reduzida e 50% da carga de Rio Branco modelada como motores de indução. Por fim, na quarta simulação (em vermelho) utiliza-se o caso da SDH com a rede reduzida, mas com todas as cargas modeladas como ZIP. Em todos os casos, foi realizada uma simulação de 5 segundos, com passo de integração de 10^{-3} [s]. A Figura 5-9 apresenta os tempos totais de processamento para cada cenário.

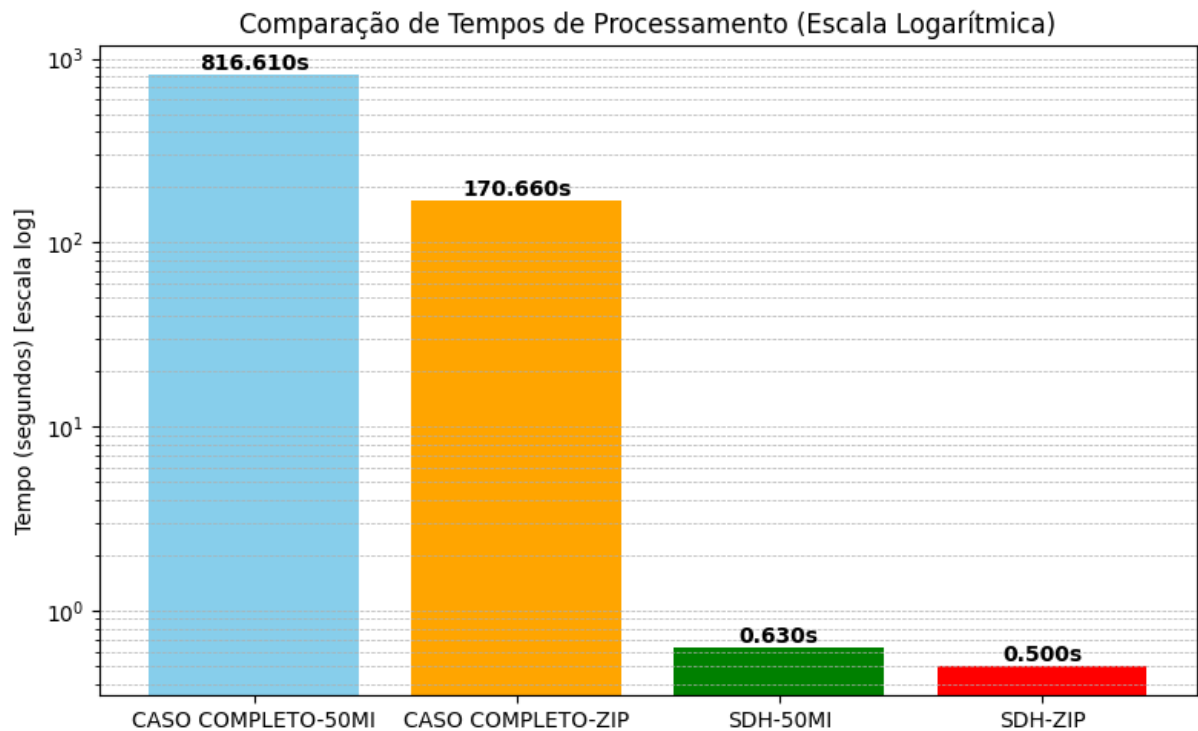


Figura 5-9 Comparação de Tempos de Processamento

Observa-se que a inclusão da modelagem de motores de indução (apenas) na região de Rio Branco aumenta o tempo total de simulação do sistema completo em quase 5 vezes (ou seja, de 170,66 [s] para 816,61 [s]), o que aponta para dificuldades de natureza prática. Por outro lado, graças à estratégia da SDH, é possível alcançar uma redução significativa no tempo de processamento. Nos casos em que foi considerada a modelagem de motores de indução na carga, foram gastos 816 segundos para o sistema completo; a abordagem da SDH reduziu esse tempo para apenas 0,63 segundos, tempo 1.300 vezes inferior que aquele gasto na simulação do sistema completo. Essa redução expressiva no tempo computacional viabiliza uma gama de novos tipos de avaliações, como a realização de simulações sucessivas com variações de parâmetros e modelos de carga ou a aplicação de métodos de otimização visando a validação e a calibração de modelos de carga.

Conforme informado anteriormente, buscou-se inicialmente na etapa 1 deste trabalho determinar uma parametrização alternativa para carga modelada apenas por modelo ZIP que resultasse em uma menor discrepância entre os resultados de simulação e as medidas de referência. Na etapa seguinte, estratégia similar será

adotada na busca de uma parametrização para modelos compostos, envolvendo modelos estáticos ZIP e de motores de indução.

5.3.3 SDH Otimização do Modelo de Carga ZIP – SDH

O ganho de tempo obtido pela técnica de simulação dinâmica híbrida permitiu a realização de mais de uma centena de simulações de transitórios eletromecânicos na ferramenta ANATEM, algo que seria impraticável com abordagens convencionais devido ao alto tempo de processamento envolvido. Nessas simulações, foram variados sistematicamente os parâmetros do modelo de carga estática (ZIP) com o objetivo de otimizá-los e obter o melhor desempenho em relação aos registros do estudo de caso com a região de Rio Branco composta por 50% da carga por motores de indução. Os parâmetros de cada variação do modelo ZIP são apresentados no **ANEXO B**.

Na Figura 5-10 apresenta-se o desempenho obtido com as diversas parametrizações aplicadas, por meio da SDH, aos modelos de carga estática, comparando-os aos registros do estudo de caso de rede completa com motores de indução (curva azul — referência). Após inspeção visual, destacaram-se as curvas em verde e vermelho, representando, respectivamente, o resultado mais aderente e o de maior discrepância em relação à referência. Adicionalmente, a curva em amarelo ilustra o desempenho da simulação utilizando os parâmetros do modelo ZIP definidos na base de dados do ONS (BD2407R1). Para essas três curvas destacadas, foram calculadas as normas dos vetores de discrepância calculados amostra a amostra, com o objetivo de quantificar as discrepâncias correspondentes a cada parametrização do modelo e gerar indicadores conforme [23], [24].

5.3.4 Indicadores para Domínio do Tempo

O indicador numérico referente ao domínio do tempo tem como propósito mensurar as discrepâncias vistas na observação das curvas geradas a partir dos dados do sistema e dos resultados de simulação. Essa quantificação viabiliza uma avaliação precisa da qualidade e desempenho dos modelos. É crucial que se

assegure que o intervalo de observação contenha um volume amostral adequado, garantindo o registro fiel das discrepâncias inerentes ao processo dinâmico nas diversas constantes de tempo envolvidas.

Em linha com as metodologias apresentadas nos trabalhos [23], [24], a discrepância temporal entre os dois sinais (o simulado e o registro efetivo) é quantificada. Essa contabilização é realizada por meio do erro relativo para uma dada medição, conforme demonstrado na seguinte relação:

$$e_R[t_n] = \frac{y^{sim}[t_n] - y^{ref}[t_n]}{y^{ref}[t_n]}, \forall t_n \in [0, N] \quad (5.1)$$

onde, $e_R[t_n]$ representa o erro relativo no instante de tempo da amostra n ; $y^{sim}[t_n]$ é o valor da medida y obtida da resposta do modelo naquele mesmo instante $[t_n]$; $y^{ref}[t_n]$ é o valor da medida y registrado pelo sistema no instante $[t_n]$; e N é a contagem total de amostras.

A escolha pelo erro relativo é fundamental, pois permite a comparação efetiva de medições que possuem diferentes ordens de grandeza dentro do mesmo processo em análise.

Assim, com o propósito de quantificar as variações existentes entre os dois sinais — contidos no vetor de erro relativo calculado em um determinado período — emprega-se a norma euclidiana de sinais. Ela é aplicada a cada um dos pontos de medição para, finalmente, estabelecer o indicador de discrepâncias no domínio do tempo, denominado $IDT_p^1(y)$, conforme detalhado a seguir:

$$IDT_p^1(y) = \sqrt{\sum_{n=1}^N |e_R[t_n]|^2} \quad (5.2)$$

5.3.5 Resultados - ETAPA 1

A Figura 5-10 apresenta-se o desempenho obtido com as diversas parametrizações aplicadas, por meio da SDH, aos modelos de carga estática (ZIP),

comparando-os aos registros do estudo de caso de rede completa com motores de indução (curva azul — referência). Após análise visual, destacaram-se as curvas em verde e vermelho, representando, respectivamente, o resultado mais aderente e o de maior discrepância em relação à referência. Adicionalmente, a curva em amarelo ilustra o desempenho da simulação utilizando os parâmetros do modelo ZIP definidos na base de dados do ONS (BD2407R1).

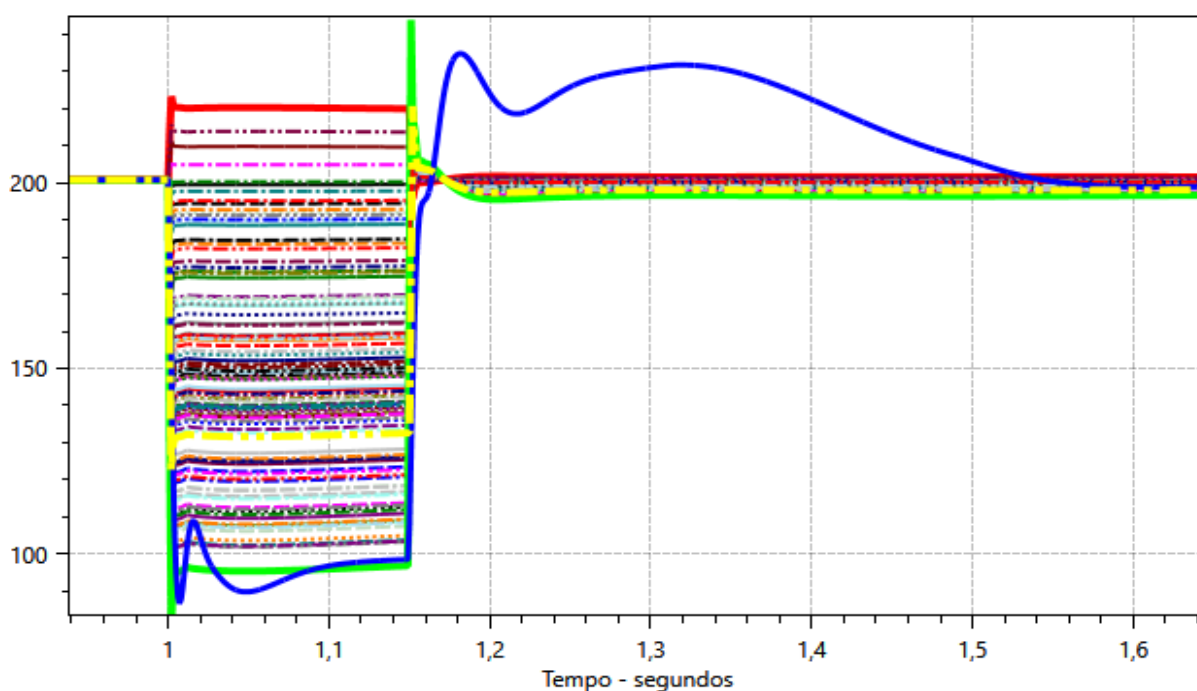


Figura 5-10 Carga Ativa [SE Rio Branco]

Para as três curvas destacadas (verde, amarelo e azul), foram calculadas as normas euclidianas de sinais dos vetores de discrepância amostra a amostra - $IDT_p^1(y)$, conforme item 5.3.4 com o objetivo de quantificar as discrepâncias correspondentes a cada parametrização do modelo. Os indicadores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise de Discrepâncias – IDT ETAPA 1

<i>Intervalo (s)</i>	<i>Z constante (Verde)</i>	<i>BD ONS (Amarela)</i>	<i>P constante (Vermelha)</i>
1 – 1,15	0,78	4,66	15,83
1,15 – 2,15	2,55	2,27	2,01
0 – 5 (Completo)	2,87	5,21	16,00

Com base nas curvas do gráfico da Figura 5-10 e nos indicadores apresentados na Tabela 4, observa-se que apesar das melhoras nos resultados obtidos com o refinamento da parametrização do modelo ZIP, a modelagem totalmente estática não permite reproduzir satisfatoriamente a resposta dinâmica do sistema elétrico no período pós-falta, considerando uma maior participação de motores de indução na carga.

5.4 ETAPA 2 – MODELO COMPOSTO – ZIP + MI

Dando seguimento à etapa 1, a etapa 2 deste trabalho também visa determinar uma parametrização de modelo de carga que minimize a discrepância entre os resultados da SDH e as medidas de referência. No entanto, esta fase avança na complexidade ao empregar modelos compostos, que integram a abordagem estática (modelo ZIP) com a representação dinâmica de motores de indução.

5.4.1 Modelo de Carga Composto

São consideradas as mesmas 104 variações de parametrização dos modelos ZIP utilizadas nas simulações da etapa 1, apresentadas de forma detalhada no **ANEXO B**. Entretanto, nesta etapa, as simulações incluem a presença de motores de indução do tipo ar-condicionado, representando parcelas de 30%, 40% e 50% do total de carga modelada, conforme o esquema ilustrativo apresentado a seguir.

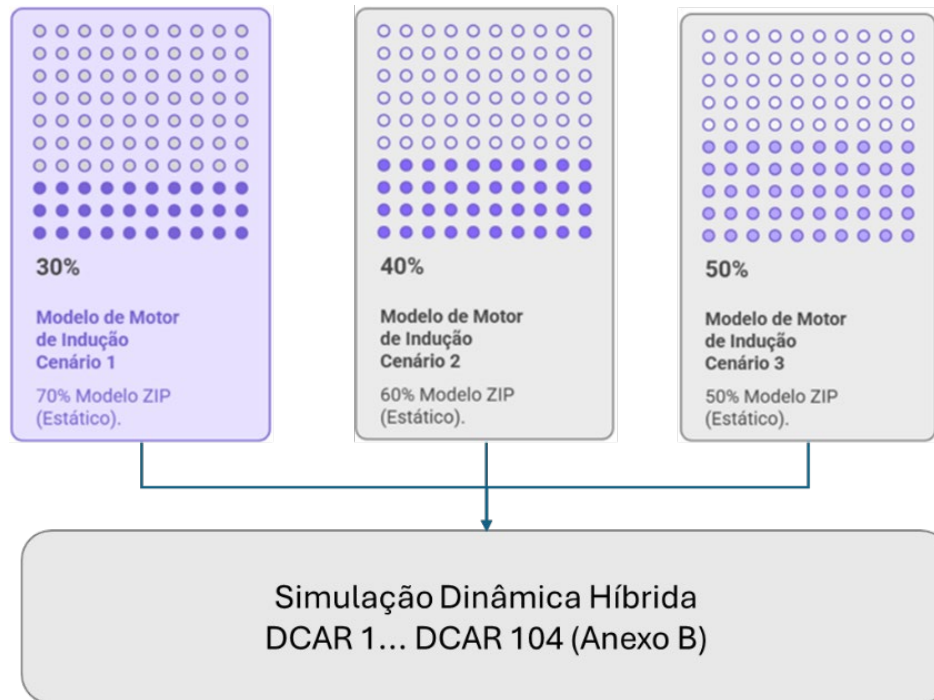


Figura 5-11 Esquema dos Cenários da Etapa 2 - Modelo Composto

Ao todo, foram conduzidas 312 simulações dinâmicas híbridas, permitindo uma análise comparativa abrangente dos efeitos da participação dos motores de indução na resposta dinâmica do sistema.

5.4.2 Modelo Motor de Indução – Anarede e Anatem

Os modelos de carga de motores de indução viabilizam a representação dinâmica de um dos tipos de cargas mais relevantes nos sistemas elétricos de potência. De fato, motores de indução em determinadas áreas e em certos períodos podem responder por até 60% da carga total. Conforme o item 5.2, a região de Rio Branco selecionada para o estudo de caso possui o perfil compatível de alta inserção de carga de motores de indução do tipo ar-condicionado e assim é sujeita a manifestação do fenômeno da FIDVR [5].

A revisão conceitual dos modelos de carga foi apresentada no item 2.3, com ênfase no modelo de motor de indução, foco deste trabalho. Esta seção avança para as simulações dinâmicas híbridas, detalhando os modelos e parâmetros específicos utilizados nos programas de simulação Anarede e Anatem.

Na Figura 5-12 está apresentado o circuito equivalente do motor de indução, baseado no conjunto de equações que descrevem o seu comportamento utilizado no programa Anarede. Já a Figura 5-13 apresenta os modelos de motores de indução de gaiola simples sem efeito transitório de rotor (tipo 1) e com efeito transitório de rotor (tipo 2) utilizados no programa Anatem.

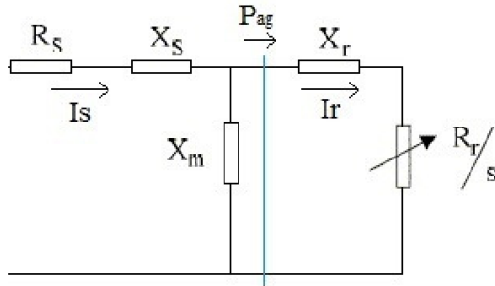


Figura 5-12 – Modelo Anarede - Motor de Indução [25]

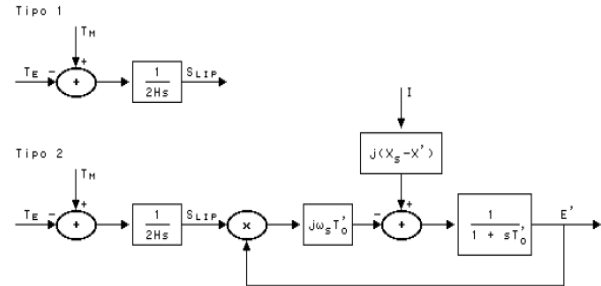


Figura 5-13 Modelo Anatem – Motor de Indução [26]

onde:

MODELO ANAREDE:

R_s - Resistência do Estator;

X_s - Reatância do Estator

X_m - Reatância de Magnetização;

R_r - Resistência do Rotor;

X_r - Reatância do Rotor

f_p - Fator de Potência.

$$s = (\omega_s - \omega_m)/\omega_s \quad (5.3)$$

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{P} (\text{rad/s}) \text{ ou } n_s \frac{120f}{P} (\text{rpm}) \quad (5.4)$$

$$P_m = V_t \cdot I_m \cdot \cos \varphi \quad (5.5)$$

$$Q_m = V_t \cdot I_m \cdot \sin \varphi \quad (5.6)$$

$$\varphi = \angle V_t - \angle I_m \quad (5.7)$$

$$\eta = 1 - \left[\frac{R_s \cdot I_m^2 + R_r \cdot I_r^2}{V_t \cdot I_m \cdot \cos \varphi} \right] \quad (5.8)$$

$$P_r(s) = R_r \cdot I_r^2 / s \quad (5.9)$$

$$P_{mec}(s) = P_r(s) - R_r \cdot I_r^2 / s = (1-s) \cdot P_r(s) \quad (5.10)$$

$$T_{mec}(s) = \frac{P_{mec}(s)}{\omega_m} = \frac{P_{mec}(s)}{[(1-s) \cdot \omega_s]} = \frac{P_r(s)}{\omega_s} \quad (5.11)$$

MODELO ANATEM:

Te - torque elétrico, em pu, na base da máquina

Tm - torque mecânico, em pu, na base da máquina.

 ω_s - velocidade síncrona, em rad/seg.

FAT - constante da curva de torque de carga, em pu

SLIP - escorregamento do rotor (adimensional).

Xm - reatância transitória de magnetização, em pu .

Rr - resistência transitória do enrolamento do rotor, em pu .

Xss - reatância própria do enrolamento de estator, em pu .

X' - reatância transitória do enrolamento de estator, em pu .

E' - fasor tensão através da reatância transitória X', em pu .

I - fasor corrente de estator, em pu .

To' - constante de tempo do rotor a circuito aberto, em seg.

Xr - reatância transitória do enrolamento do rotor, em pu .

$$V_t = E' + (R_s - jX') \cdot I_m \quad (5.12)$$

$$\frac{dE'}{dt} = \left(\frac{1}{T_o'} \right) \cdot [E' - jI_m \cdot (X_{ss} - X')] + j\omega_s \cdot s \cdot E' \quad (5.13)$$

$$\frac{ds}{dt} = \left(\frac{1}{2H} \right) \cdot (T_m - T_e) \quad (5.14)$$

$$T_m = K_1 \cdot (1 - s)^\alpha ; T_e = R_e \{E', I_m\} \quad (5.15)$$

$$X' = X_s + \left[\frac{X_r \cdot X_m}{X_r + X_m} \right] ; X_{ss} = X_s + X_m \quad (5.16)$$

$$T_o' = X_r + \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_r} ; \omega_m = (1 - s) \cdot \omega_s \quad (5.17)$$

$$H = \frac{E_c}{S_b} = \frac{J_s^2}{2 \cdot S_b} \text{ kW s / kVA} \quad (5.18)$$

$$H_2 = \left(\frac{S_{b1}}{S_{b2}} \right) \cdot H_1 \quad (5.19)$$

5.4.3 Parâmetros do Motor de Indução – Anarede e Anatem

Para os parâmetros dos modelos de motor de indução utilizados nas simulações desta etapa, foram adotados os valores típicos de ar-condicionado, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Pârametros Típicos – Ar Condicionado : [22]

Rs (%)	Xs (%)	Rr (%)	Xr (%)	Xm (%)	Pm (pu)	Qm (pu)	S (%)	Fc (%)	a	H (s)	Td0' (s)
5,3	7,6	4,8	6,2	240	1,1549	0,5492	6,388	100	0	0,28 a 0,34	0,1301
					1,0224	0,5118	5,574	90			
					0,8952	0,4811	4,8165	80			
					0,772	0,4504	4,1065	70			
					0,6541	0,4369	3,4365	60			

5.4.4 Resultados - ETAPA 2

Neste item são apresentados os desempenhos obtidos com os modelos de cargas compostos por carga do tipo motor de indução e por carga do tipo estática ZIP. Foram avaliadas três composições distintas de 30%, 40% e 50 % de MI com os parâmetros indicados no item 5.4.3. Para cada um dos três grupos de variação da parcela do modelo de carga referente ao MI, foram também avaliados os desempenhos com variações dos parâmetros da parcela ZIP dos modelos de carga conforme **ANEXO B**, por meio da simulação dinâmica híbrida.

Os resultados são apresentados abaixo e comparando-os aos registros do estudo de caso de rede completa com motores de indução (curva Amarela — referência) que possui 50% da carga composta por motor de indução conforme parâmetros do item 5.4.3 e modelo ZIP parametrizado conforme **ANEXO B** — configuração 104.

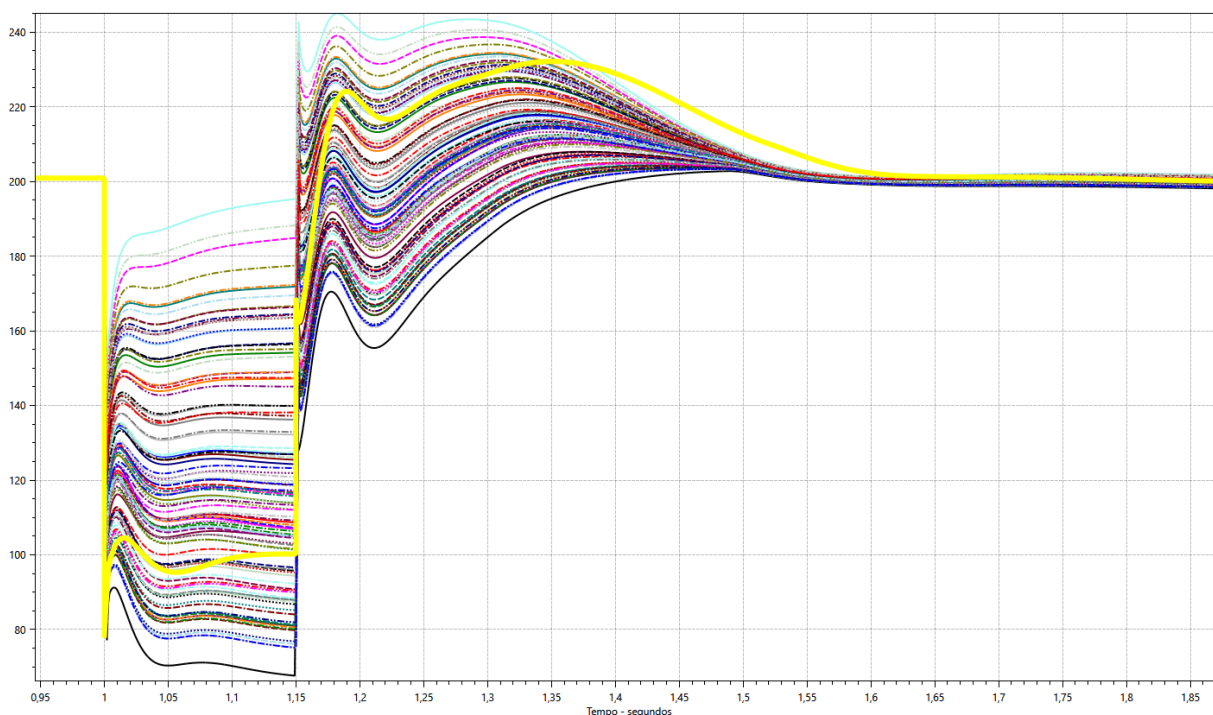


Figura 5-14 FLXA – 30%MI

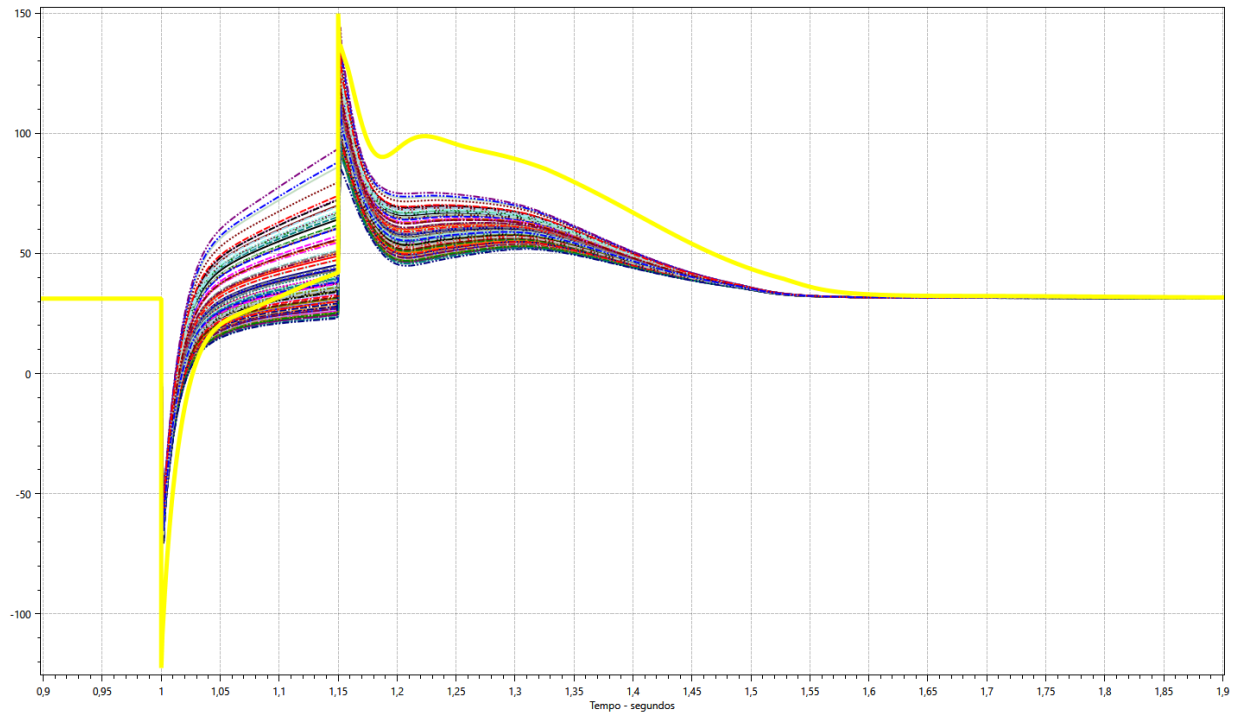


Figura 5-15 FLXR – 30%MI

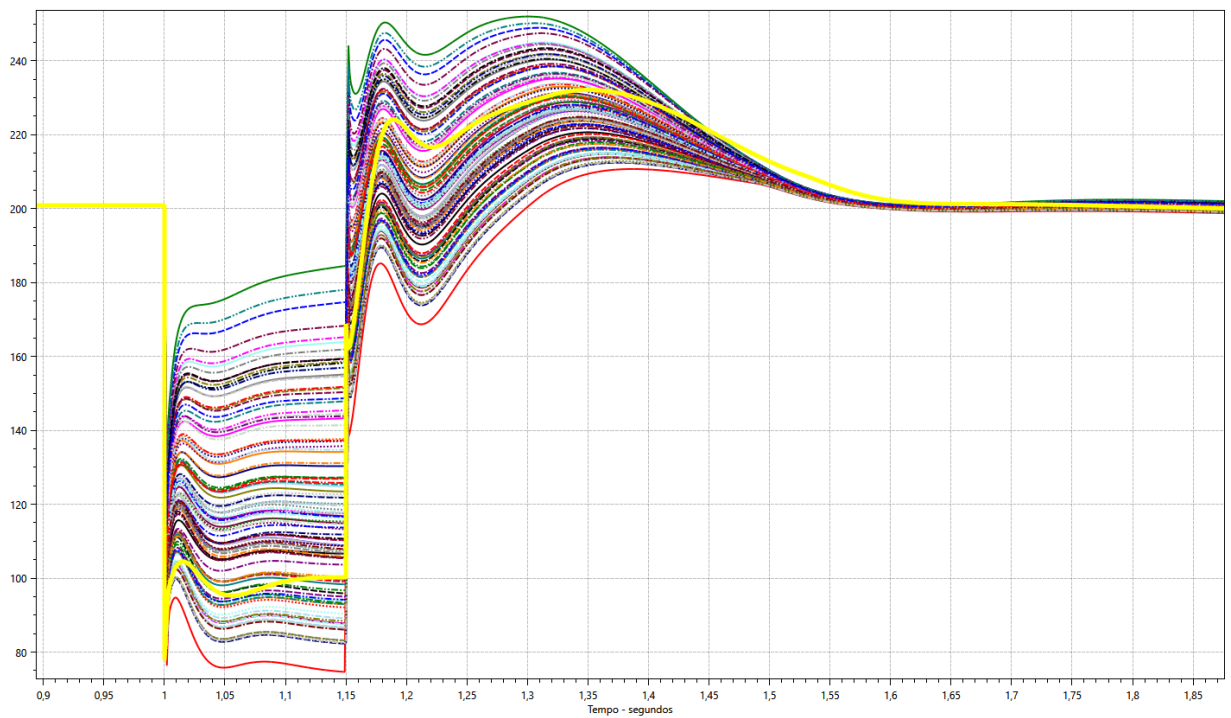


Figura 5-16 FLXA – 40%MI

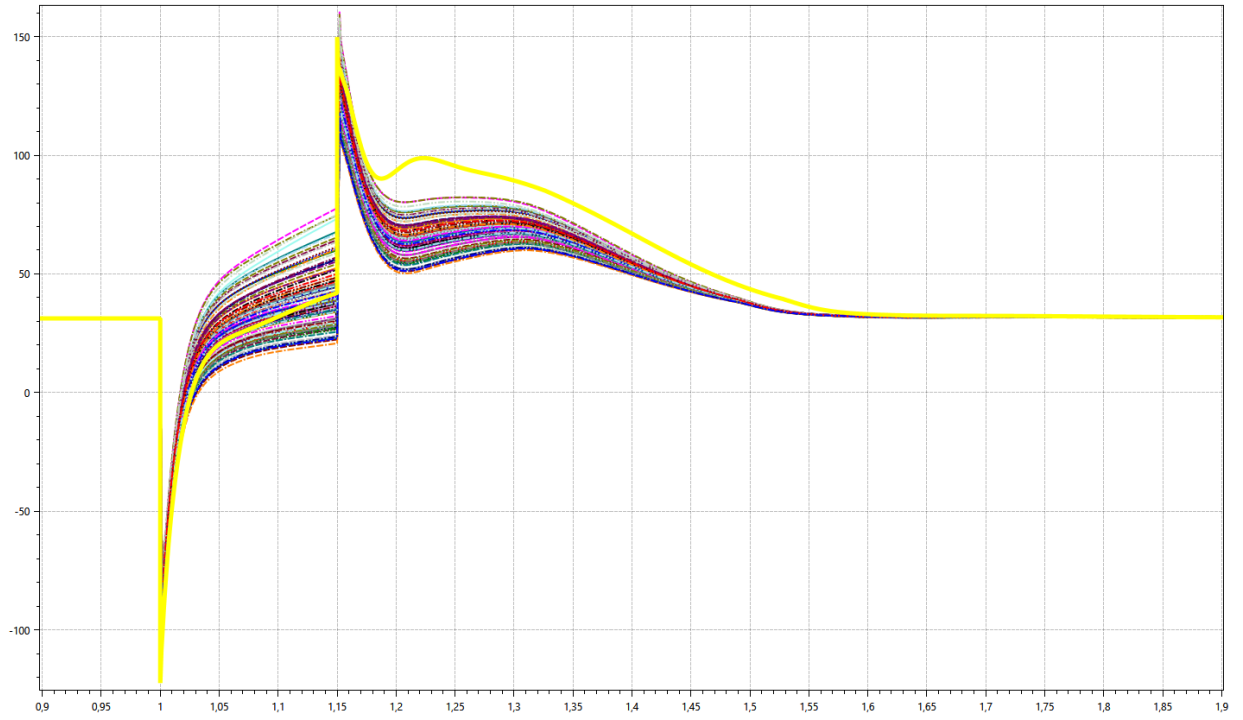


Figura 5-17 FLXR – 40%MI

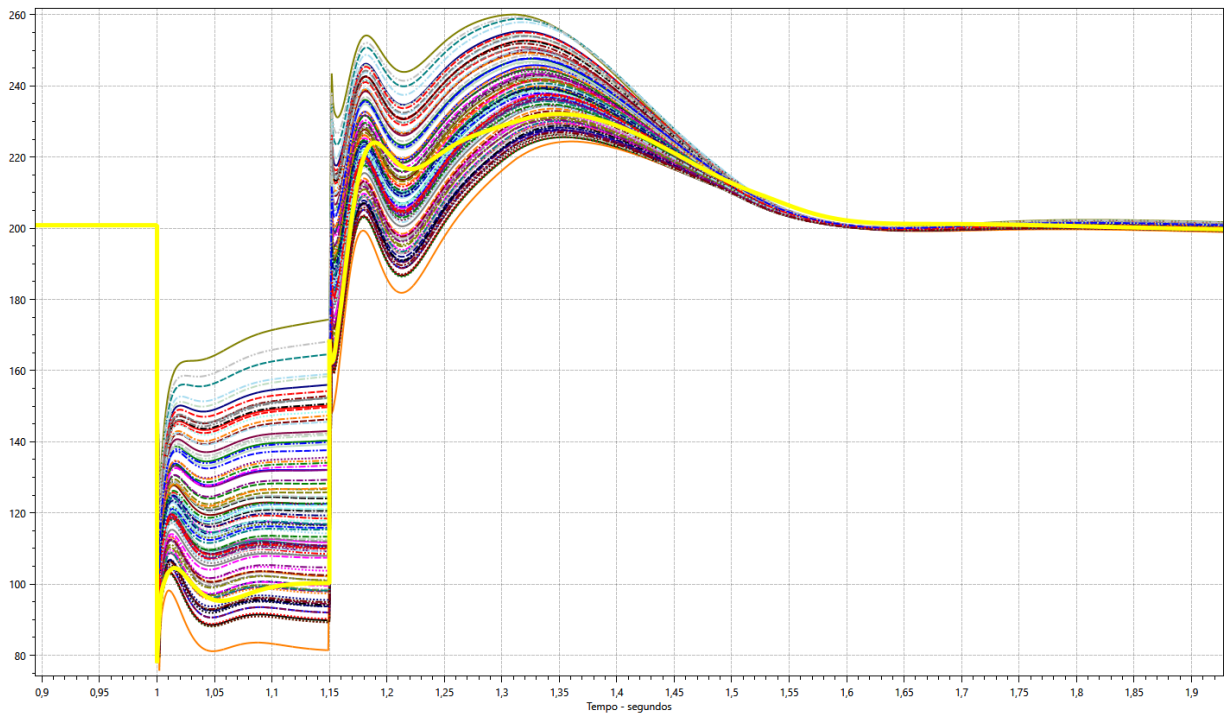


Figura 5-18 FLXA – 50%MI

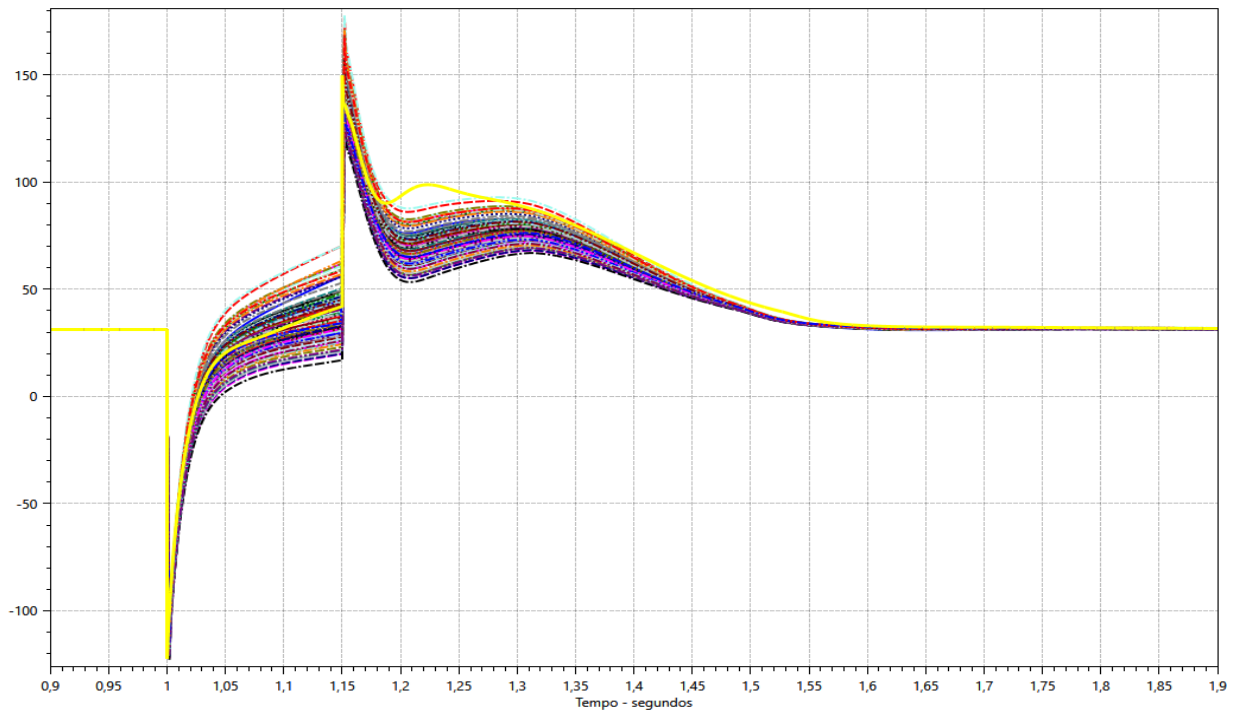


Figura 5-19 FLXR – 50%MI

Conforme esperado, a inspeção visual confirma que a parametrização SDH apresenta maior aderência quando utiliza o mesmo percentual de motores de indução (MI) da curva de referência – 50% da carga.

Entretanto, observa-se que ajustar os parâmetros do modelo ZIP também gera ganhos significativos nos desempenhos dos modelos de carga compostos (ZIP+MI). Isso fica evidente nos gráficos de 30% e 40% de MI, onde o ajuste fino desses parâmetros resultou em melhoras substanciais na aderência das curvas em relação aos registros de referência (curva amarela).

Após a análise visual dos resultados, a fim de determinar matematicamente a melhor parametrização dos modelos de carga composto, foram calculadas as normas euclidianas de sinais dos vetores de discrepância amostra a amostra - $IDT_p^1(y)$, conforme item 5.3.4 com o objetivo de quantificar as discrepâncias correspondentes a cada parametrização do modelo. Os indicadores são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Análise de Discrepâncias – IDT ETAPA 2

Parametrização	IDT					
	FLXA 30	FLXA 40	FLXA 50	FLXR 30	FLXR 40	FLXR 50
STB_SDH_1	5,9082	5,2983	4,8133	42,324	23,357	5,2366
STB_SDH_2	8,6952	7,6983	6,8017	59,698	37,382	16,253
STB_SDH_3	2,7809	2,4048	2,2984	25,966	12,411	4,078
STB_SDH_4	4,8047	4,3561	4,0516	36,381	17,62	3,4764
STB_SDH_5	2,5088	1,6717	1,1488	17,39	6,4637	10,851
STB_SDH_6	3,6453	3,2529	3,0497	31,412	18,274	5,0863
STB_SDH_7	7,4307	6,6668	6,0149	50,364	24,817	3,3848
STB_SDH_8	3,5788	2,4787	1,4849	13,494	6,2068	10,196
STB_SDH_9	4,3718	3,9191	3,6256	34,587	19,388	4,5653
STB_SDH_10	3,7663	3,4047	3,2239	31,589	15,9	2,9343
STB_SDH_11	2,9991	2,6155	2,47	28,4	17,549	6,322
STB_SDH_12	2,3675	1,9356	1,8345	24,258	13,652	3,1811
STB_SDH_13	3,421	2,3033	1,3253	12,671	10,619	26,197
STB_SDH_14	2,4134	1,6153	1,1421	18,576	8,8836	4,6831
STB_SDH_15	10,116	8,8861	7,7574	69,362	45,987	24,281
STB_SDH_16	3,9827	3,5468	3,291	32,001	17,006	3,2411
STB_SDH_17	2,5876	1,6989	1,1304	15,733	7,127	20,96
STB_SDH_18	2,4469	2,0224	1,9388	22,505	7,4685	11,894
STB_SDH_19	3,0533	2,027	1,2244	13,599	11,44	29,508
STB_SDH_20	8,1004	7,1784	6,3567	56,238	36,5	17,649
STB_SDH_21	2,9726	1,9743	1,166	14,832	6,3212	15,741
STB_SDH_22	3,8145	3,4436	3,2529	31,654	15,677	3,2588
STB_SDH_23	6,95	6,2213	5,607	47,946	25,794	5,0789
STB_SDH_24	3,9948	2,7925	1,6776	11,77	10,061	23,249
STB_SDH_25	2,3108	1,852	1,7784	20,815	5,8999	17,372
STB_SDH_26	4,0721	2,8663	1,7441	11,766	9,2058	21,015
STB_SDH_27	3,6292	2,4703	1,4301	12,141	11,826	28,12
STB_SDH_28	2,4592	1,6608	1,2261	17,066	6,1786	18,204
STB_SDH_29	7,4621	6,6479	5,9379	52,087	31,961	12,635
STB_SDH_30	2,2612	1,7553	1,6884	18,687	8,1126	27,705
STB_SDH_31	2,9831	1,9781	1,163	14,615	6,5701	16,936
STB_SDH_32	2,4671	1,911	1,6894	22,855	12,605	2,9718
STB_SDH_33	2,8091	2,4059	2,2857	24,616	9,1191	9,6496
STB_SDH_34	2,3135	1,7299	1,5208	21,128	9,3209	5,8866
STB_SDH_35	2,9417	2,6256	2,5664	25,433	7,4492	14,652
STB_SDH_36	3,2331	2,1816	1,2702	14,182	6,2448	13,767
STB_SDH_37	2,6576	2,2945	2,2115	25,718	12,632	3,5443
STB_SDH_38	5,1416	4,6847	4,3695	36,922	14,026	10,141
STB_SDH_39	3,1928	2,8522	2,7459	26,826	9,0483	11,753
STB_SDH_40	3,9417	2,7833	1,7143	12,507	6,5399	12,904
STB_SDH_41	3,1416	2,7854	2,6526	28,768	15,706	3,2088
STB_SDH_42	3,3793	3,0086	2,865	27,206	8,9527	12,336

Parametrização	IDT					
	FLXA 30	FLXA 40	FLXA 50	FLXR 30	FLXR 40	FLXR 50
STB_SDH_43	5,1349	4,6045	4,2138	38,147	21,075	4,6549
STB_SDH_44	7,7602	6,9118	6,1683	53,483	31,513	10,597
STB_SDH_45	4,9246	4,4354	4,0943	36,374	17,552	3,5732
STB_SDH_46	3,4948	3,0784	2,8735	29,082	14,42	3,4758
STB_SDH_47	2,3903	1,9103	1,7869	21,997	7,9646	10,168
STB_SDH_48	6,954	6,2787	5,72	47,007	20,269	6,8805
STB_SDH_49	2,7039	2,2628	2,1309	23,131	7,4254	12,697
STB_SDH_50	3,917	3,5894	3,4384	31,016	10,876	11,391
STB_SDH_51	2,5287	2,039	1,8723	23,469	11,494	3,7515
STB_SDH_52	8,7591	7,8258	7,0038	58,109	27,802	3,7054
STB_SDH_53	2,9122	2,526	2,3945	26,812	13,778	3,0263
STB_SDH_54	9,3379	8,2159	7,1866	65,01	45,663	27,465
STB_SDH_55	4,4271	3,9827	3,6975	34,388	17,753	2,9353
STB_SDH_56	2,9794	1,9708	1,1715	14,254	8,2379	22,445
STB_SDH_57	7,8711	7,0661	6,3728	52,613	24,323	4,6201
STB_SDH_58	8,443	7,4773	6,6105	58,419	37,708	18,018
STB_SDH_59	2,7616	2,3437	2,2163	24,299	9,2149	9,0957
STB_SDH_60	2,6405	2,1193	1,9186	22,621	9,0352	7,9862
STB_SDH_61	3,1395	2,8271	2,7501	26,571	8,0773	14,007
STB_SDH_62	2,5051	1,7785	1,4287	17,724	6,4171	20,562
STB_SDH_63	3,1488	2,8508	2,789	26,235	6,9183	17,002
STB_SDH_64	2,3176	1,8647	1,7759	22,064	8,0058	10,038
STB_SDH_65	3,8382	3,5112	3,3749	29,496	7,9529	16,881
STB_SDH_66	2,9516	2,5822	2,4583	27,447	14,647	2,9033
STB_SDH_67	2,7721	1,8224	1,1035	15,54	6,0605	13,873
STB_SDH_68	8,0971	7,1919	6,3876	56	34,697	14,374
STB_SDH_69	3,5245	2,3715	1,3599	12,056	13,943	32,651
STB_SDH_70	3,3884	2,295	1,3335	13,212	7,7598	19,393
STB_SDH_71	6,844	6,1571	5,5827	47,36	23,947	3,3475
STB_SDH_72	2,2443	1,7519	1,6632	20,375	5,9489	16,613
STB_SDH_73	6,5184	5,788	5,1713	46,492	30,234	14,314
STB_SDH_74	2,482	1,6646	1,1473	18,733	9,94	3,1736
STB_SDH_75	2,3199	1,7887	1,613	22,811	12,897	3,154
STB_SDH_76	6,0903	5,4359	4,9017	43,82	26,534	9,6311
STB_SDH_77	3,3202	3,0328	2,9647	27,142	6,9954	17,553
STB_SDH_78	3,2657	2,2197	1,3057	14,433	6,4043	8,5761
STB_SDH_79	2,8348	1,8778	1,1408	15,59	6,0786	14,059
STB_SDH_80	3,0273	2,5773	2,3851	26,063	12,737	3,6964
STB_SDH_81	3,6228	2,505	1,4921	13,073	6,578	14,313
STB_SDH_82	5,1691	4,6801	4,328	38,054	18,18	3,8188
STB_SDH_83	2,8783	1,9148	1,139	16,105	7,4143	6,0861
STB_SDH_84	2,6775	1,7725	1,1395	16,162	6,0599	15,225
STB_SDH_85	7,784	6,9678	6,2677	51,938	24,731	3,8795

Parametrização	IDT					
	FLXA 30	FLXA 40	FLXA 50	FLXR 30	FLXR 40	FLXR 50
STB_SDH_86	6,1073	5,5287	5,0769	42,121	17,543	7,8715
STB_SDH_87	2,9783	2,6933	2,6538	25,922	7,4056	15,259
STB_SDH_88	2,3027	1,747	1,6111	19,045	6,3931	22,202
STB_SDH_89	2,591	1,7627	1,2765	16,52	6,922	21,205
STB_SDH_90	10,526	9,2755	8,1374	70,959	41,386	14,36
STB_SDH_91	3,4667	2,3448	1,3551	12,663	10,414	25,681
STB_SDH_92	2,2988	1,8374	1,7443	21,974	8,1735	9,4553
STB_SDH_93	5,7487	5,168	4,7097	42,087	24,055	6,5266
STB_SDH_94	7,7592	6,8868	6,1172	53,937	34,202	15,257
STB_SDH_95	4,9265	4,4456	4,1037	37,62	20,504	4,1337
STB_SDH_96	5,9937	5,4209	4,9695	42,49	20,506	3,4177
STB_SDH_97	4,0479	2,8323	1,703	11,591	10,806	24,71
STB_SDH_98	2,4765	2,0173	1,8837	23,684	11,618	3,6591
STB_SDH_99	3,8665	3,4537	3,2212	32,097	17,988	4,1677
STB_SDH_100	6,6919	5,9426	5,3019	48,083	32,418	17,08
STB_SDH_101	4,8357	3,5928	2,4202	11,563	6,5849	4,8631
STB_SDH_102	2,3502	1,9447	1,8769	23,517	10,448	5,7501
STB_SDH_103	11,311	9,9759	8,7752	74,711	36,665	4,5908
STB_SDH_104	2,4935	1,8143	1,4569	21,866	14,233	6,0957

Os indicadores calculados da Tabela 6 foram classificados conforme os tons de cores vermelhas (FLXA-parcela ativa da carga) e azuis (FLXR – parcela reativa da carga) em relação aos seus graus de discrepância respectivos.

As Figura 5-20 e Figura 5-21 apresentam os mapas de dispersão das IDTs para as parcelas de carga ativa e reativa, respectivamente, conforme as simulações do item 5.4.2. Os pontos representam a IDT para diferentes composições de Motores de Indução (MI): azul para 30%, laranja para 40% e verde para 50% da carga modelada como MI. As linearizações correspondentes a essas três variações também estão indicadas nos gráficos.

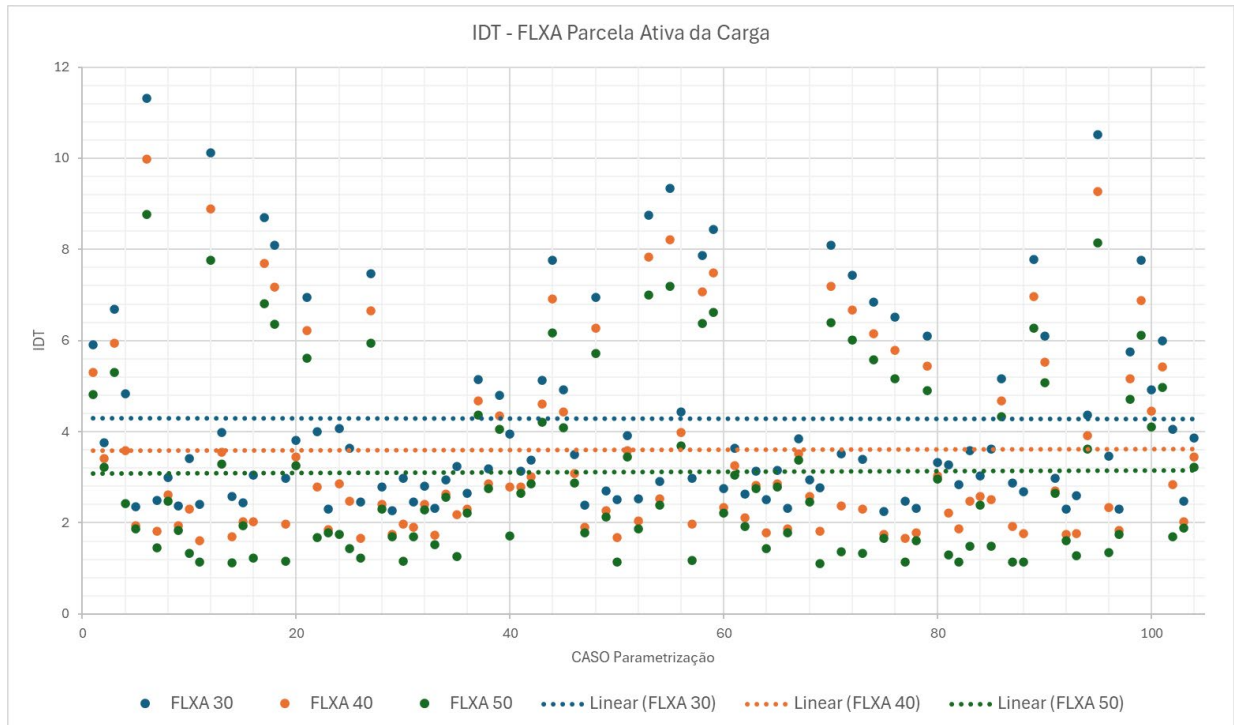


Figura 5-20 Mapa de Dispersão das IDTs - FLXA

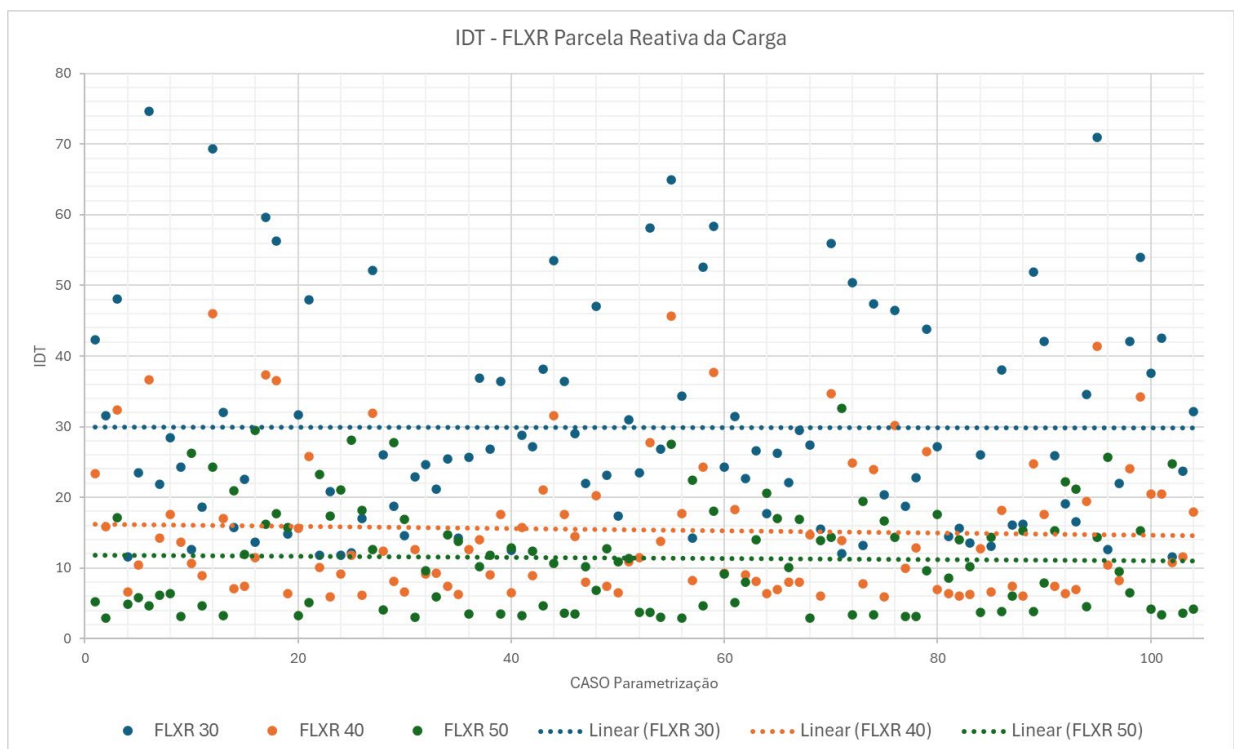


Figura 5-21 Mapa de Dispersão das IDTs - FLXR

Com base na análise das curvas (Figura 5-14 a Figura 5-19) e dos indicadores quantitativos da Tabela 6, verifica-se que o modelo composto de carga – diferentemente do modelo estático – demonstrou, nas três variações avaliadas, a

capacidade de reproduzir o fenômeno de atraso na recuperação da tensão pós-falta (FIDVR). Essa distinção é fundamental, pois valida a representação dinâmica da carga, essencial para estudos de estabilidade.

Conforme a hipótese inicial, os gráficos das Figura 5-20 e Figura 5-21 confirmam que as simulações que utilizaram 50% da carga modelada como Motores de Indução (MI), que é a composição de carga dinâmica do registro de referência, apresentaram os melhores desempenhos em termos de aderência. Este resultado reforça a importância de uma alocação precisa da parcela de MI para a fidelidade da simulação.

Adicionalmente, observou-se uma melhora significativa nos resultados gerais obtidos através do refinamento e da otimização das parametrizações da parcela estática ZIP do modelo de carga composto. O ajuste fino dessa parcela contribuiu diretamente para a redução dos erros de desvio e para um modelo de carga mais robusto e preditivo.

6 CONCLUSÃO

A segurança e a confiabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são intrinsecamente dependentes das simulações dinâmicas, que servem de base para o planejamento (expansão da rede, estudos de estabilidade) e para a operação em tempo real. Nesse contexto, a representação acurada dos seus componentes é vital, sendo a modelagem da carga um desafio crescente dado sua complexidade e evolução tecnológica.

Este trabalho reforça que a limitação imposta pelos modelos de carga estáticos inviabilizam a análise de fenômenos críticos de instabilidade dinâmica de tensão, como o Atraso na Recuperação da Tensão Pós-Falta (*Fault-Induced Delayed Voltage Recovery – FIDVR*).

O foco central desta dissertação foi a avaliação da eficácia da técnica de Simulação Dinâmica Híbrida (SDH) como ferramenta robusta para a parametrização e validação de modelos dinâmicos de carga.

Os resultados do estudo evidenciaram a importância da abordagem híbrida e forneceram duas conclusões principais:

- O modelo composto de carga, adequadamente parametrizado (incluindo a parcela dinâmica de Motores de Indução), é capaz de reproduzir o fenômeno FIDVR em todas as variações analisadas, enquanto a modelagem puramente estática, adotada no SIN, é limitada em refletir este fenômeno crítico.
- Adicionalmente, a calibração das parametrizações da parcela estática ZIP, viabilizada pela simulação dinâmica híbrida, revelou-se altamente relevante. Através da identificação dos menores IDTs (Indicador de Discrepâncias no Domínio do Tempo), foi possível alcançar a parametrização ótima do modelo de carga aplicado especificamente à área Rio Branco, região selecionada para o estudo de caso deste trabalho. Essa otimização é essencial, demonstrando que a calibração precisa dos parâmetros dos modelos de carga contribui diretamente para que os estudos elétricos gerem resultados mais fidedignos e aderentes aos desempenhos e fenômenos reais.

Em última análise, este trabalho valida uma metodologia que resulta na otimização dos modelos de carga e destaca a importância de transição para modelos dinâmicos/compostos em estudos de estabilidade eletromecânica. Os resultados do estudo de caso comprovam que o método permite simulações mais robustas, preditivas e seguras, reforçando a importância do aprimoramento da modelagem para a segurança operacional do Sistema Interligado Nacional.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados desta dissertação demonstraram a eficácia da Simulação Dinâmica Híbrida (SDH) como ferramenta robusta para a parametrização e validação de modelos dinâmicos de carga. A viabilidade do extenso número de simulações sucessivas com variação de parâmetros e modelos foi garantida pela significativa redução no tempo de processamento proporcionada pela SDH (detalhada no Item 5.3.2). Com base nas conclusões e na metodologia desenvolvida, diversas frentes de pesquisa se abrem para investigações futuras:

6.1.1 Otimização e Automação do Processo de Parametrização

- Implementação de Algoritmos de Otimização: Sugere-se a avaliação e aplicação de técnicas de otimização (como algoritmos genéticos ou métodos baseados em *machine learning*) para automatizar a busca pelos ajustes ideais dos parâmetros dos modelos de carga;
- Melhoria do Desempenho Computacional: Otimizar a rotina de busca de parâmetros observando iterativamente os resultados e os IDTs (Indicador de Discrepâncias no Domínio do Tempo) a cada simulação. A automatização deste processo tem potencial para reduzir o tempo de processamento total, tornando a calibração de modelos dinâmicos uma tarefa mais eficiente e aplicável em larga escala.

6.1.2 Validação com Dados do Sistema Real

- Uso de Registros de PMUs: O presente trabalho utilizou curvas de referência geradas por simulação com o caso de estudo completo (conforme Item 5.2). Como próxima etapa de validação, é interessante substituir os registros

sintéticos por registros reais de PMUs (*Phasor Measurement Units*), obtidos durante ocorrências de curtos-circuitos em áreas do SIN já conhecidas por sua suscetibilidade a fenômenos de instabilidade (como o FIDVR). Isso permitirá uma validação mais rigorosa da capacidade preditiva dos modelos em condições operacionais reais.

6.1.3 Expansão do Escopo de Modelagem

- Extensão a Outros Fenômenos: Explorar a aplicação da SDH e dos modelos compostos refinados na análise de outros fenômenos de estabilidade eletromecânica e transitória do sistema, além do FIDVR.
- Modelagem de Novas Tecnologias: Integrar ao modelo de carga o impacto de novas tecnologias de consumo e geração distribuída, como inversores e veículos elétricos, avaliando sua influência na dinâmica do sistema pós-falta.

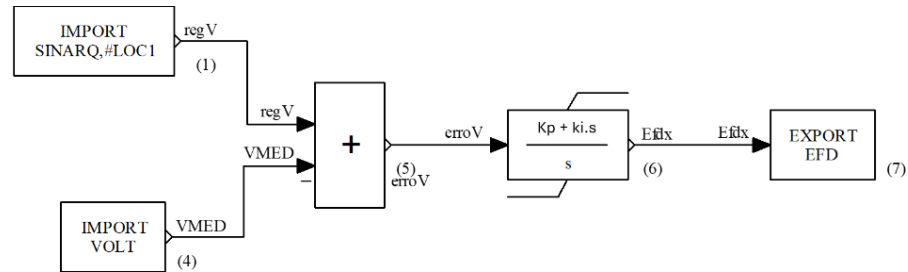
7 REFERÊNCIAS

- [1] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo, e D. Zhao, “Load Modeling—A Review”, *IEEE Trans. Smart Grid*, v. 9, n. 6, p. 5986–5999, nov. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2700436.
- [2] “Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks - Technical Brochures”. 2014. [Online]. Disponível em: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/566-modelling-and-aggregation-of-loads-in-flexible-power-networks.html>
- [3] D. N. Kosterev, C. W. Taylor, e W. A. Mittelstadt, “Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 3, p. 967–979, ago. 1999, doi: 10.1109/59.780909.
- [4] “Modelling of Power System Components at Severe Disturbances - Session Materials”. 1986. [Online]. Disponível em: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/38-18-1986-modelling-of-power-system-components-at-severe-disturbances.html>
- [5] R. M. Aoun, “AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS (REDS) NO DESEMPENHO DINÂMICO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA”, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, Itajubá, 2022.
- [6] “IEEE Guide for Load Modeling and Simulations for Power Systems”, IEEE, maio 2022. doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9905546.
- [7] “ESTUDOS ESPECIALIZADOS COM VISTAS A APERFEIÇOAR A MODELAGEM DE CARGA E DA MMGD UTILIZADA EM ESTUDOS ELÉTRICOS, CONSIDERANDO AS CARACTERÍSTICAS ATUAIS DO SIN”, INESC, nov. 2023.
- [8] Working Group C4.605, “Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks”. CIGRÉ, 2014.
- [9] NERC, “Technical Reference Document - Dynamic Load Modeling”. Acesso em: 18 de dezembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.nerc.com/comm/PC/LoadModelingTaskForceDL/Dynamic%20Load%20Modeling%20Tech%20Ref%202016-11-14%20-%20FINAL.PDF>
- [10] R. J. Bravo e D. P. Chassin, “Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR) model validation”, em *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, maio 2016, p. 1–4. doi: 10.1109/TDC.2016.7520045.
- [11] N. Abed e A. Salazar, “Simulations and evaluation of FIDVR using PMU data”, em *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, jul. 2014, p. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2014.6939939.
- [12] S. Adhikari, J. Schoene, N. Gurung, e A. Mogilevsky, “Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR): Modeling and Guidelines”, em *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, ago. 2019, p. 1–5. doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973440.
- [13] R. J. Bravo, R. Yinger, e P. Arons, “Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR) indicators”, em *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*, abr. 2014, p. 1–5. doi: 10.1109/TDC.2014.6863324.
- [14] Vin. P. SHAH, “UM ESTUDO DE CASO DO FENÔMENO DA LENTA RECUPERAÇÃO DA TENSÃO NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL”, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.
- [15] M. Glavic *et al.*, “See It Fast to Keep Calm: Real-Time Voltage Control Under Stressed Conditions”, *IEEE Power and Energy Mag.*, v. 10, n. 4, p. 43–55, jul. 2012, doi: 10.1109/MPE.2012.2196332.

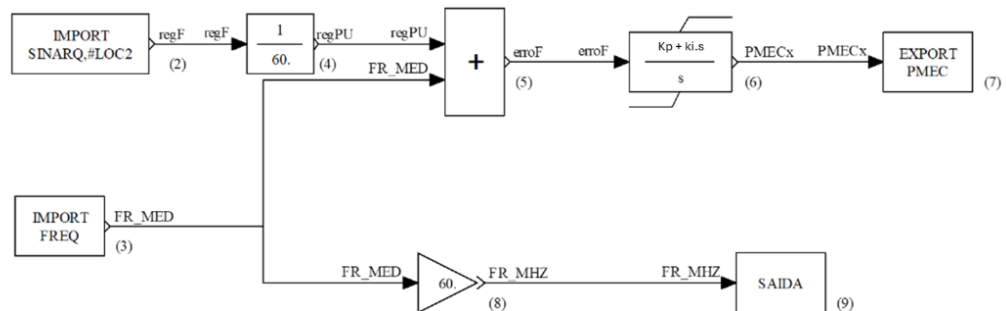
- [16] Z. Huang, R. T. Guttromson, e J. F. Hauer, "Large-scale hybrid dynamic simulation employing field measurements", em *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004., jun. 2004, p. 1570-1576 Vol.2. doi: 10.1109/PES.2004.1373135.
- [17] F. Trevisan, "VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELOS DE UNIDADES GERADORAS USANDO DADOS DE MEDIÇÃO SINCRONIZADA DE FASORES", UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- [18] A. Snaider, A. F. C. Aquino, e M. V. P. Teixeira, "APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DINÂMICA HÍBRIDA NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO DE MODELOS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL", apresentado em XIX ERIAC DÉCIMO NONO ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE, Foz do Iguaçu, maio 2023.
- [19] J. E. G. Castro, "VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZANDO MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA", UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC, Florianópolis, 2015.
- [20] P. H. Galassi, "ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA DE GERADORES SÍNCRONOS EMPREGANDO SIMULAÇÃO HÍBRIDA", UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE, Foz do Iguaçu, 2016.
- [21] ONS, "ANÁLISE DAS PERTURBAÇÕES DOS DIAS 13/09/2022 ÀS 16H14MIN, 03/10/2022 ÀS 15H27MIN E 07/10/2022 ÀS 13H26MIN ENVOLVENDO AS LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 230 KV DA INTERLIGAÇÃO ACRE/RONDÔNIA", RAP-ONS 0007/2022, nov. 2022.
- [22] Divisão de Estudos da Operação Elétrica, "Representação do Comportamento Dinâmico das Cargas Utilizando Modelos de Motores de Indução nos Programas Microdin/Transdir e Anarede/Anatem", CHESF, Nota Técnica 02/98, maio 1998.
- [23] A. Macagnan, "ESTRATEGIAS DE VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZANDO SINCROFASORES", UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC, Florianópolis, 2019.
- [24] Paulo André Sehn da Silva, "INVESTIGAÇÃO DE METODOLOGIAS DE VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZANDO SINCROFASORES", UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2014. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/132463>
- [25] Departamento de Sistemas Eletroenergéticos, "Análise de Redes - Anarede Manual do Usuário". CEPEL, novembro de 2024.
- [26] Departamento de Redes Elétricas, "Análise de Transitórios Eletromecânicos Manual do Usuário". CEPEL, agosto de 2020.

7.1 ANEXO A

Parâmetros CDU:



```
(ncdu) ( nome cdu )
0101 APLICA_VT
(
DEFPAR #LOC1          1
(
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 ) ( p2 ) ( p3 ) ( p4 ) (vmin) (vmax)
001 IMPORT SINARQ      regV  #LOC1                                %Vt
004 IMPORT VOLT        VMED
005 SOMA               regV  erroV
                   -VMED  erroV
006 PROINT             erroV Efdx   500.   2.   1.
007 EXPORT EFD         Efdx
(
FIMCDU
```



```
(ncdu) ( nome cdu )
0102 APLICA_FREQ
(
DEFPAR #LOC2          2
(DEFPAR #LOC3          3
(
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 ) ( p2 ) ( p3 ) ( p4 ) (vmin) (vmax)
( 001 IMPORT SINARQ      regA  #LOC2                                %angl
002 IMPORT SINARQ      regF  #LOC2                                %angl
003 IMPORT FREQ        FR_MED
004 FRACAO             regF  regPU   1.0   0.   60.   0.
004 GANHO              regF  regPU   60.
005 SOMA               -FR_MED erroF
                   regPU  erroF
006 PROINT             erroF PMECx  550.   50.   1.0
007 EXPORT PMEC        PMECx
008 GANHO              FR_MED FR_MHZ  60
009 SAIDA              FR_MHZ
(
( 008 SAIDA            PMECx
(
(EFVAL (stip) (vdef) ( d1 ) ( d2 )
(DEFVAL PMECx 0.0
FIMCDU
```

7.2 ANEXO B

PARAMETRIZAÇÕES DOS MODELOS ZIPs

$$\begin{aligned} \text{Carga ativa} &= \begin{cases} \left[(100 - A - B) + A \left(\frac{V}{V_0} \right) + B \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \frac{P}{100} & \text{se } V \geq V_{\min} \\ \left[(100 - A - B) \left(\frac{V}{V_{\min}} \right)^2 + A \left(\frac{V}{V_0} \right) \left(\frac{V}{V_{\min}} \right) + B \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \frac{P}{100} & \text{se } V < V_{\min} \end{cases} \\ \text{Carga reativa} &= \begin{cases} \left[(100 - C - D) + C \left(\frac{V}{V_0} \right) + D \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \frac{Q}{100} & \text{se } V \geq V_{\min} \\ \left[(100 - C - D) \left(\frac{V}{V_{\min}} \right)^2 + C \left(\frac{V}{V_0} \right) \left(\frac{V}{V_{\min}} \right) + D \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \frac{Q}{100} & \text{se } V < V_{\min} \end{cases} \end{aligned}$$

Tabela 7 – Variações de Parâmetros MODELO ZIP

ARQUIVO	PARÂMETROS			
	A	B	C	D
MODELO ZIP 1	17	25	36	35
MODELO ZIP 2	71	5	16	51
MODELO ZIP 3	81	5	24	72
MODELO ZIP 4	98	1	14	74
MODELO ZIP 5	33	67	15	14
MODELO ZIP 6	46	46	27	62
MODELO ZIP 7	1	7	46	45
MODELO ZIP 8	18	39	82	14
MODELO ZIP 9	58	42	26	15
MODELO ZIP 10	61	26	4	43
MODELO ZIP 11	0	84	12	2
MODELO ZIP 12	21	3	84	11
MODELO ZIP 13	21	7	3	73
MODELO ZIP 14	16	73	29	33
MODELO ZIP 15	63	10	63	19
MODELO ZIP 16	15	19	23	33
MODELO ZIP 17	8	88	58	0
MODELO ZIP 18	71	22	19	19
MODELO ZIP 19	9	88	32	24
MODELO ZIP 20	14	81	27	2
MODELO ZIP 21	41	50	57	1
MODELO ZIP 22	32	4	8	61
MODELO ZIP 23	67	17	59	28
MODELO ZIP 24	72	24	1	1
MODELO ZIP 25	29	65	19	36
MODELO ZIP 26	31	47	15	74
MODELO ZIP 27	29	43	64	8
MODELO ZIP 28	55	34	6	65
MODELO ZIP 29	53	25	18	19

ARQUIVO	PARÂMETROS			
	A	B	C	D
MODELO ZIP 30	3	84	86	5
MODELO ZIP 31	88	4	46	39
MODELO ZIP 32	27	24	22	10
MODELO ZIP 33	36	34	21	24
MODELO ZIP 34	47	13	29	31
MODELO ZIP 35	4	90	88	12
MODELO ZIP 36	82	3	71	28
MODELO ZIP 37	7	52	22	21
MODELO ZIP 38	15	32	27	46
MODELO ZIP 39	26	6	55	22
MODELO ZIP 40	10	37	12	42
MODELO ZIP 41	14	46	89	7
MODELO ZIP 42	57	30	82	0
MODELO ZIP 43	27	11	0	18
MODELO ZIP 44	14	55	47	12
MODELO ZIP 45	36	54	20	48
MODELO ZIP 46	56	14	13	22
MODELO ZIP 47	39	40	29	54
MODELO ZIP 48	25	0	4	13
MODELO ZIP 49	59	21	73	24
MODELO ZIP 50	19	0	10	84
MODELO ZIP 51	29	28	8	55
MODELO ZIP 52	21	70	44	3
MODELO ZIP 53	28	4	22	4
MODELO ZIP 54	25	2	21	59
MODELO ZIP 55	27	45	46	22
MODELO ZIP 56	65	10	44	49
MODELO ZIP 57	0	66	42	32
MODELO ZIP 58	50	25	46	1
MODELO ZIP 59	2	73	24	13
MODELO ZIP 60	47	27	16	11
MODELO ZIP 61	80	15	43	25
MODELO ZIP 62	26	35	7	11
MODELO ZIP 63	73	11	52	40
MODELO ZIP 64	49	50	18	44
MODELO ZIP 65	30	1	67	22
MODELO ZIP 66	22	75	5	1
MODELO ZIP 67	25	9	42	4
MODELO ZIP 68	34	66	13	36
MODELO ZIP 69	37	5	51	6
MODELO ZIP 70	82	16	29	16
MODELO ZIP 71	3	30	54	46
MODELO ZIP 72	23	61	31	67
MODELO ZIP 73	70	22	15	76

ARQUIVO	PARÂMETROS			
	A	B	C	D
MODELO ZIP 74	15	25	63	30
MODELO ZIP 75	49	24	15	8
MODELO ZIP 76	13	78	24	61
MODELO ZIP 77	10	75	72	9
MODELO ZIP 78	2	88	42	47
MODELO ZIP 79	2	59	33	47
MODELO ZIP 80	9	84	26	45
MODELO ZIP 81	37	17	52	12
MODELO ZIP 82	6	78	10	74
MODELO ZIP 83	21	66	62	10
MODELO ZIP 84	8	18	31	4
MODELO ZIP 85	18	23	28	5
MODELO ZIP 86	70	13	35	5
MODELO ZIP 87	57	34	24	4
MODELO ZIP 88	5	74	30	10
MODELO ZIP 89	37	23	75	21
MODELO ZIP 90	6	1	25	26
MODELO ZIP 91	10	82	18	14
MODELO ZIP 92	82	14	15	45
MODELO ZIP 93	44	8	36	40
MODELO ZIP 94	20	10	61	32
MODELO ZIP 95	53	8	82	9
MODELO ZIP 96	40	9	1	39
MODELO ZIP 97	15	84	39	8
MODELO ZIP 98	60	26	16	62
MODELO ZIP 99	46	21	58	35
MODELO ZIP 100	22	16	24	71
MODELO ZIP 101	0	100	0	100
MODELO ZIP 102	100	0	100	0
MODELO ZIP 103	0	0	0	0
MODELO ZIP 104	0	70	0	100