

JÉBUS ANÍCIO DE OLIVEIRA NETO

**MÉTODOS SEGUROS PARA TRANSFERÊNCIA
RÁPIDA DE BARRAS DE MOTORES**

São Paulo
2023

JÉBUS ANÍCIO DE OLIVEIRA NETO

**MÉTODOS SEGUROS PARA TRANSFERÊNCIA
RÁPIDA DE BARRAS DE MOTORES**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Ciências.

São Paulo
2023

JÉBUS ANÍCIO DE OLIVEIRA NETO

**MÉTODOS SEGUROS PARA TRANSFERÊNCIA
RÁPIDA DE BARRAS DE MOTORES**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Giovanni Manassero Junior

Co-orientador:
Carlos Antonio França Sartori

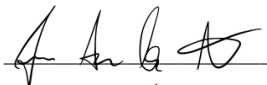
São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

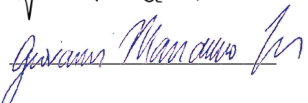
Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 25 de outubro de 2023

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catologação-na-publicação

Anício de Oliveira Neto, Jésus

Métodos Seguros para Transferência Rápida de Barras de Motores /
J. Anício de Oliveira Neto -- versão corr. -- São Paulo, 2023.
143 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Processamento de sinais 2.Transitórios Eletromagnéticos
3.Transferência rápida de Barras 4.Usinas nucleares 5.Confiabilidade
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Jesinho e Dulce, e à minha querida irmã, Samira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por guiar e abençoado minha jornada ao longo desse período de estudo e trabalho. Expresso minha profunda gratidão aos meus amados pais, Jesinho e Dulce, e à minha querida irmã, Samira, pela dedicação, carinho e incansável apoio que me proporcionaram para que eu pudesse concluir esta etapa. Vocês são verdadeiramente únicos e não há como medir a minha admiração por vocês. Sou grato por nascer em uma família tão especial e inspiradora.

Não poderia deixar de agradecer ao ex-encarregado da Divisão de Engenharia Elétrica e amigo, Sr. Luiz Sergio, por ter me apresentado ao tema deste trabalho e por confiar em meu potencial para desenvolvê-lo. Foi uma verdadeira honra tê-lo como mentor tanto na vida pessoal quanto na profissional.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Carlos Sartori, sou imensamente grato por ter me proporcionado a oportunidade de ingressar na pesquisa na USP. Seu incentivo constante foram cruciais para minha confiança como pesquisador.

Expresso meu agradecimento ao orientador desta pesquisa, Prof. Dr. Giovanni Manassero Junior, pelos inúmeros dias de colaboração neste trabalho. Agradeço por sua confiança e encorajamento constantes. Sua paixão pela engenharia elétrica é admirável e impulsiona quem te acompanha. Sem dúvida, é um exemplo de engenheiro e educador a ser seguido.

Embora possa parecer incomum, também expresso o meu agradecimento a meu pai por um dia ter-me apresentado às notas musicais. Essa experiência despertou o meu interesse pelos sinais e as suas frequências (antes mesmo de conhecer os 60Hz e a FFT), além de me trazer conforto nos momentos mais desafiadores deste período de doutorado.

Agradeço a minha namorada, Isabela, por seu constante incentivo, comidas saborosas durante as noites de produção deste trabalho e por compreender que os finais de semana são curtos para alguém apaixonado por ela e pela pesquisa.

Sou grato aos meus amigos de profissão e pessoais pelo suporte emocional e técnico durante essa jornada: Hebert Perreira, Cesar Xavier, Reinaldo Maeda, Thiago Nascimento, Sad Borsoi, Daniel Santos (Rato), Nicolas Fakhoury, Caio Geraldo, Thiago Rampim, Pedro Melo, Thiago Hamawaki, Gabriel Dória (Aluno de IC) e Lucas Gusman (O soberano).

Por fim, gostaria de estender os meus agradecimentos aos meus professores da querida UFV, que me moldaram e dedicaram o seu tempo ao ensino. Sem dúvida, vocês transformam a sociedade, e sou o exemplo vivo disso! Muito obrigado!

Desejo deixar claro o quanto sou grato a cada uma das pessoas e para me eximir da responsabilidade da ordem destes agradecimentos, ele foi feito utilizando um código randômico, com pequenos vieses particulares, cronológicos e hierárquicos, exceto para o primeiro parágrafo.

*“A vida de um indivíduo só faz sentido
se ajuda a tornar a vida das demais
criaturas mais nobre e mais bela”*

Albert Einstein

RESUMO

A Transferência Rápida de Barras (TRB) consiste na comutação rápida de fontes de energia em barramento de motores sem interrupção do fornecimento. Essa transferência é especialmente aplicável em usinas nucleares e químicas, onde é necessário garantir a continuidade e a disponibilidade do fornecimento de energia para manter seus sistemas de segurança em pleno funcionamento. Ao contrário dos sistemas de energia ininterrupta, a TRB utiliza fontes infinitas, proporcionando alta disponibilidade para manter os sistemas de segurança nuclear sem restrições de alimentação elétrica. O método de TRB convencional envia o comando de fechamento para o disjuntor da fonte reserva quando ocorre um defeito na fonte principal. Para que o comando seja enviado, é necessário que critérios sejam atendidos. Entre o momento do envio do comando e o efetivo fechamento do disjuntor, o estado do sistema é alterado. Consequentemente, não é possível garantir o atendimento dos mesmos critérios no momento em que ocorre o efetivo fechamento do disjuntor. Portanto, o sistema está sujeito a transitórios elevados que dependem do escorregamento angular do sistema. A NEMA/ANSI C50.41 - *Polyphase Induction Motors for Power Generating Stations* definiu o critério da taxa V/f como forma de proteger motores de torques transitórios excessivos decorrentes da TRB. Entretanto, esse critério tem sido objeto de críticas por parte de diversos pesquisadores. Por isso, em 2014, a NEMA decidiu remover esse critério da norma. Ainda assim, apesar dessa mudança, continua sendo amplamente aplicado na indústria. Motivado pelas lacunas em diversos aspectos do método convencional de TRB, esta pesquisa apresenta duas propostas para algoritmos preditivos aplicados à TRB: a Transferência Rápida de Barras com Predição (TRBP), considerando os critérios convencionais de TRB; e um Novo Critério de Transferência Rápida de Barras com Predição (NTRB), que utiliza técnicas de semelhança de sinais. Ambos os algoritmos predizem os sinais de tensão na barra por um tempo equivalente ao tempo de fechamento do disjuntor para, assim, garantir que os critérios sejam atendidos. Para avaliar a eficácia dos métodos, foram realizadas simulações de vários casos de TRB utilizando os métodos TRBP e NTRB em um sistema elétrico industrial simplificado. Esses casos foram comparados com o método convencional e apresentaram resultados promissores, com uma redução média das correntes transitórias em aproximadamente três vezes e um aumento de até 60% na probabilidade de sucesso da transferência. Por fim, a eficiência dos métodos foi validada através da simulação do sistema elétrico da usina nuclear APR1400. Essa validação comprovou o desempenho superior dos métodos propostos, os quais cumprem de maneira eficaz o seu objetivo primordial de assegurar a continuidade e a segurança das instalações industriais de alto risco.

Palavras-Chave – Transferência Automática de Barras, Transferência Rápida de Barra de Motores, Processamento de Sinais, Transitórios Eletromagnéticos.

ABSTRACT

Fast Bus Transfer (FBT) consists of a motor bus's fast switching power sources without interrupting the power supply. This transfer is particularly applicable in nuclear and chemical plants, where it is necessary to ensure the continuity and availability of power supply to keep their safety systems fully operational. Unlike uninterruptible power systems, FBT utilizes infinite energy sources, providing high power availability to maintain nuclear safety systems without energy restrictions. The conventional FBT method sends the closing command to the backup source breaker when a fault occurs in the primary source. For the command to be sent, specific criteria must be satisfied. However, the system's state is altered between the moment of sending the command and the actual closing of the breaker. As a result, it is impossible to guarantee that the same criteria are satisfied during the breaker closing. Therefore, the system is subject to high transients that depend on the angular slip of the system. The NEMA/ANSI C50.41 - *Polyphase Induction Motors for Power Generating Stations* defined the V/f rate criterion to protect motors from excessive transient torques during FBT. However, this criterion has been criticized by several researchers. In 2014, NEMA decided to remove this criterion from the standard, but despite this change, it continues to be widely applied in the industry. Motivated by the gaps in various aspects of the conventional FBT method, this work presents two proposals for predictive algorithms applied to FBT: Fast Bus Transfer with Prediction (FBTP), considering the conventional FBT criteria; and a New Fast Bus Transfer Criterion with Prediction (NFBT), which uses signal similarity techniques. Both algorithms predict the voltage signals in the bus for a time equivalent to the breaker closing time to ensure that the criteria are met. To assess the effectiveness of the methods, simulations were conducted for several cases FBT using the FBTP and NFBT methods in a simplified industrial electrical system. These cases were compared to the conventional method and showed promising results, with an average reduction of transient currents by approximately three times and an increase of up to 60% in the probability of successful transfer. Finally, the efficiency of the methods was validated through simulation of the electrical system of the APR1400 nuclear power plant. This validation confirmed the superior performance of the proposed methods, which effectively fulfill their primary objective of ensuring the continuity and safety of high-risk industrial installations.

Keywords – Automatic Bus Transfer, Fast Motor Bus Transfer, Signal Processing, Electromagnetic Transients.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico de uma usina nuclear.	18
2.1	Categorias de transferência automática de barras separadas por zonas de atuação.	26
2.2	Diagrama do modo sequencial de TRB.	28
2.3	Diagrama vetorial da taxa V/f apresentado pela ANSI C50.41.	30
4.1	Diagrama simplificado das metodologias propostas.	41
5.1	Arquitetura dos sistemas elétricos simulados.	49
5.2	Diagrama de Blocos do IED simulado.	51
5.3	Exemplo de uma TRB efetuada.	54
5.4	Relação entre a taxa V/f e o torque transitório - TRBS.	55
5.5	Relação entre o módulo da diferença de fase e o torque transitório - TRBS.	56
5.6	Relação entre a taxa V/f e a corrente de pico - TRBS.	57
5.7	Relação entre o módulo da diferença de fase e a corrente de pico - TRBS.	58
5.8	Relação entre a taxa V/f e a módulo da diferença de fase - TRBS.	59
5.9	Relação entre a corrente e o toque transitório - TRBS.	60
5.10	Exemplo de uma TRBC efetuada.	65
5.11	Exemplo de uma TRBC não efetuada.	67
5.12	Relação entre a taxa V/f e o torque transitório - TRBC.	68
5.13	Relação entre o módulo da diferença de fase e o torque transitório - TRBC.	69
5.14	Relação entre a taxa V/f e a corrente de pico - TRBC.	70
5.15	Relação entre o módulo da diferença de fase e a corrente de pico - TRBC.	71
5.16	Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - TRBC.	72
5.17	Relação entre a taxa V/f e a diferença de fase - TRBC.	73
5.18	Exemplo de uma TRBP efetuada.	78

5.19	Exemplo de uma TRBP não efetuada.	79
5.20	Relação entre a taxa V/f e o torque transitório - TRBP.	81
5.21	Relação entre o módulo da diferença de fase e o torque transitório - TRBP.	82
5.22	Relação entre a taxa V/f e a corrente de pico - TRBP.	83
5.23	Relação entre o módulo da diferença de fase e a corrente de pico - TRBP.	84
5.24	Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - TRBP.	85
5.25	Cálculo de diferença de fase entre sinais com frequência em decaimento.	88
5.26	Comparação entre RMSE, taxa V/f e diferença de fase.	89
5.27	Relação entre o RMSE e a taxa V/f - novo critério.	90
5.28	Relação entre RMSE e o torque transitório - novo critério.	91
5.29	Relação entre RMSE e a corrente de pico - novo critério.	92
5.30	Relação entre RMSE e a diferença de fase - novo critério.	93
5.31	Relação entre RMSE e a diferença de fase - definição do novo critério.	94
5.32	Relação entre RMSE e a corrente de pico - definição do novo critério.	95
5.33	Relação entre RMSE e a corrente de pico - definição do novo critério.	96
5.34	Exemplo de uma NTRB efetuada.	98
5.35	Exemplo de uma NTRB não efetuada.	100
5.36	Relação entre o RMSE e o torque transitório - NTRB.	102
5.37	Relação entre a taxa V/f e o torque transitório - NTRB.	103
5.38	Relação entre o módulo da diferença de fase e o torque transitório - NTRB.	104
5.39	Relação entre o RMSE e a corrente de pico - NTRB.	105
5.40	Relação entre a taxa V/f e a corrente de pico - NTRB.	106
5.41	Relação entre o módulo da diferença de fase e a corrente de pico - NTRB.	107
5.42	Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - NTRB.	108
7.1	Diagrama unifilar simplificado do sistema 4,16 kV Classe 1E - Trem A da APR1400.117	
7.2	Exemplo do decaimento do barramento de motores para o sistema elétrico da APR1400.	122

A.1	Relação entre a taxa V/f e os torques transitórios - Análise da TRBC.	130
A.2	Relação entre a diferença de fase e os torques transitórios - Análise da TRBC. . .	130
A.3	Relação entre a taxa V/f e as correntes de picos - Análise da TRBC.	131
A.4	Relação entre a diferença de fase e as correntes de pico - Análise da TRBC. . . .	132
A.5	Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - Análise da TRBC.	133
A.6	Relação entre a taxa V/f e a diferença de fase - Análise da TRBC.	133
A.7	Relação entre a taxa V/f e os torques transitórios - Validação da TRBP.	134
A.8	Relação entre a diferença de fase e os torques transitórios - Validação da TRBP.	135
A.9	Relação entre a taxa V/f e as correntes de pico - Validação da TRBP.	135
A.10	Relação entre a diferença de fase e as correntes de pico - Validação da TRBP. . .	136
A.11	Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - Validação da TRBP.	137
A.12	Relação entre o RMSE e os torques transitórios - Validação do NTRB.	138
A.13	Relação entre o RMSE e as correntes de pico - Validação do NTRB.	138
A.14	Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - Validação do NTRB.	139

LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros para a sincronização entre diferentes fontes de energia de acordo com IEEE Std 1547.	34
5.1	Características de inércia dos sistemas simulados.	49
5.2	Características do motor.	50
5.3	Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - TRBS.	61
5.4	Condições iniciais para um exemplo de uma TRBC efetuada.	64
5.5	Condições iniciais do exemplo de uma TRBC não efetuada.	66
5.6	Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - TRBC.	74
5.7	Erros de predição da taxa V/f e diferença de fase do modelo AR.	80
5.8	Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - TRBP.	86
5.9	Erros de predição do RMSE do modelo AR.	101
5.10	Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - NTRB.	109
6.1	Comparação dos resultados de corrente de pico por inércia do sistema.	111
6.2	Comparação dos resultados de torque de pico a pico por inércia do sistema.	112
6.3	Comparação dos resultados de tempo de atuação por inércia do sistema.	113
6.4	Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - número de casos efetuados.	114
6.5	Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - sucesso de transferência.	115
7.1	Potências das Cargas 1E conectadas sistema 4,16 kV Classe 1E - Trem A da APR1400	118
7.2	Resumos dos resultados de simulação APR1400 - TRBC.	119
7.3	Resumos dos resultados de simulação APR1400 - TRBP.	120
7.4	Resumos dos resultados de simulação APR1400 - NTRB com ajuste $th_{RMSE} = 0,25$ pu.121	
7.5	Resumos dos resultados de simulação APR1400 - NTRB com ajuste $th_{RMSE} = 0,3$ pu.123	

7.6 Resumos dos resultados de simulação APR1400 - NTRB com ajuste $th_{RMSE} = 0,4$ pu.124

SUMÁRIO

1	Introdução	18
1.1	Aspectos para implementação da transferência rápida de barras em usinas nucleares	19
1.2	Processo de transferência rápida de barras e seus desafios	20
1.3	Objetivos	23
1.4	Organização do trabalho	23
2	Transferência automática de barra	25
2.1	Categorias de transferência automática de barra	25
2.1.1	Modo sequencial de transferência rápida de barras	27
2.1.2	Modo simultâneo de transferência rápida de barras	29
2.2	Critérios de transferência rápida de barras aplicados nos processos industriais . .	29
2.2.1	Critério da taxa V/f	30
2.2.2	Taxa V/f e os motores de indução.	30
3	Aspectos normativos e estado da arte	32
3.1	Recomendação sobre a análise de eficiência da transferência rápida de barras . .	32
3.2	Critérios básicos normativos	33
3.3	Limites de corrente e torque no processo de transferência rápida de barras . . .	36
3.4	Processamento de sinais e a transferência rápida de barras	38
4	Métodos propostos	40
4.1	Transferência rápida de barras com predição	40
4.1.1	Predição auto-regressiva	41
4.1.2	Predição passos à frente	42
4.1.3	Cálculo das grandezas elétricas	44

4.1.4	Verificação dos critérios	44
4.2	Novo critério de transferência rápida de barras com predição	45
4.2.1	Raiz do erro quadrático médio	45
4.2.2	Predição auto-regressiva	46
4.2.3	Cálculo das grandezas elétricas	46
4.2.4	Verificação dos critérios	47
5	Resultados	48
5.1	Descrição do sistema elétrico simulado	48
5.1.1	Modelagem das cargas e motores	50
5.1.2	Modelagem do disjuntor	50
5.1.3	Modelagem do dispositivo eletrônico inteligente	50
5.1.3.1	Amostragem do sinal	51
5.1.3.2	Grandezas elétricas calculadas	51
5.1.3.3	Verificação dos critérios	51
5.1.4	Variáveis monitoradas	51
5.2	Transitórios eletromagnéticos na comutação rápida de fontes de energia	52
5.2.1	Grandezas elétricas calculadas	52
5.2.2	Verificação dos critérios	52
5.2.3	Casos simulados	53
5.2.4	Resultados de simulação	53
5.2.4.1	Exemplo de aplicação	53
5.2.4.2	Resultados dos casos simulados	55
5.2.4.3	Resumo dos resultados por inércia do sistema	60
5.2.5	Considerações sobre a transferência rápida de barra não supervisionada	61
5.3	Resultados do método de transferência rápida de barras convencional	62
5.3.1	Grandezas elétricas calculadas	62

5.3.2	Verificação dos critérios	62
5.3.3	Casos simulados	63
5.3.4	Resultados de simulação	63
5.3.4.1	Exemplo de transferência efetuada	64
5.3.4.2	Exemplo de transferência não efetuada	66
5.3.4.3	Resultados dos casos efetuados	68
5.3.4.4	Resumo dos resultados por inércia do sistema	73
5.3.5	Considerações sobre a transferência rápida de barras convencional	74
5.4	Resultados do método de transferência rápida de barras com predição	75
5.4.1	Grandezas elétricas calculadas	75
5.4.1.1	Cálculo dos coeficientes auto-regressivos	75
5.4.1.2	Cálculos passos à frente do modelo auto-regressivo	76
5.4.2	Verificação dos critérios	76
5.4.3	Resultados de simulação da transferência rápida de barras com predição	77
5.4.3.1	Exemplo de transferência efetuada	77
5.4.3.2	Exemplo de transferência não efetuada	79
5.4.3.3	Erros de predição do modelo	80
5.4.3.4	Resultados dos casos efetuados	81
5.4.3.5	Resumo dos resultados por inércia do sistema	85
5.5	Resultados do método do novo critério de transferência rápida de barras com predição	86
5.5.1	Definição dos limites do novo critério	87
5.5.1.1	Cálculo de fase em sinais com decaimento de frequência	87
5.5.1.2	Relação entre o novo critério e os transitórios eletromagnéticos	88
5.5.1.3	Definição dos limites do novo critério	93
5.5.2	Grandezas elétricas calculadas	97
5.5.3	Verificação dos critérios	97

5.5.4	Resultados de simulação	97
5.5.4.1	Exemplo de transferência efetuada	97
5.5.4.2	Exemplo de transferência não efetuada	100
5.5.4.3	Erros de predição do modelo	101
5.5.4.4	Resultados dos casos efetuados	101
5.5.4.5	Resumo dos resultados por inércia do sistema	108
6	Análise comparativa	110
6.1	Comparação quanto às correntes de pico	110
6.2	Comparação quanto ao torque de pico a pico	111
6.3	Comparação quanto ao tempo de atuação	112
6.4	Comparação quanto ao número de casos efetuados	113
6.5	Comparação quanto ao sucesso de transferência	114
7	Validação dos métodos	116
7.1	Descrição do sistema elétrico simulado da usina nuclear APR1400	116
7.2	Casos de validação	119
7.3	Validação do método de transferência rápida de barras convencional	119
7.4	Validação do método de transferência rápida de barras com predição	120
7.5	Validação do método do novo critério de transferência rápida de barras com predição	120
7.6	Considerações sobre a validação dos métodos	124
8	Considerações finais	126
Anexo A – Resultados dos casos de validação dos métodos		129
A.1	Validação do método de transferência rápida de barras convencional	129
A.1.1	Análise das correntes e torques transitórios	129

A.2 Resultados dos casos de validação do método transferência rápida de barras com
predição 134

A.2.1 Análise das correntes e torques transitórios 134

A.3 Resultados dos casos de validação do método novo critério de transferência rápida
de barras com predição 137

A.3.1 Análise das correntes e torques transitórios 137

Referências **140**

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel fundamental nos diversos setores industriais. As indústrias químicas e usinas nucleares dependem da confiabilidade da energia para evitar perdas econômicas e, principalmente, prevenir cenários catastróficos de liberação de materiais tóxicos e explosivos [1, 2, 3]. Como exemplo, o desastre nuclear ocorrido na central nuclear de Fukushima é o maior evento histórico no qual a indisponibilidade de energia ocasionou a liberação significativa de material radioativo para o meio ambiente [3].

As usinas nucleares, indústrias químicas e outras indústrias críticas, geralmente, dispõem de fontes principais e reservas de energia. No caso específico de usinas nucleares, a fonte principal é proveniente de sua geração interna e a fonte reserva advém de uma conexão com o sistema elétrico externo [4, 5, 6]. A Figura 1.1 apresenta uma simplificação do sistema elétrico de uma usina nuclear.

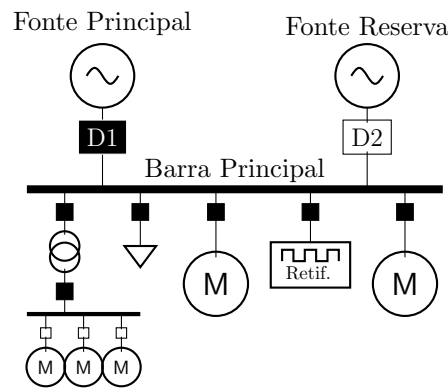


Figura 1.1: Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico de uma usina nuclear.

Fonte: próprio autor.

O sistema de Transferência Automática de Barras (TAB) é altamente recomendado para manter a segurança de uma planta nuclear, bem como a continuidade nos processos [6, 7]. Sem esse sistema, fontes alternadas de uma planta não garantem, por si só, o fornecimento seguro de energia.

Após um evento de desligamento da fonte principal, o sistema de TAB atua para comutar a alimentação da barra principal para a fonte reserva (saudável). Essa transferência garante alimentação ininterrupta no fornecimento de energia para as cargas críticas à segurança. Além

disso, a TAB supervisiona todo o processo para reduzir as correntes e os torques transitórios durante a transferência, visto que esses transitórios podem danificar diversos equipamentos essenciais à segurança da planta¹.

O termo TAB pode ser encontrado na literatura de diversas formas. Para as indústrias nucleares, a TAB é comumente encontrada como: *Automatic Transfer* [8], *Bus Transfer* [8, 9], *Automatic Bus Transfer* [5, 7]. Já com um aspecto de aplicação geral é encontrado como *Motor Bus Transfer* [10, 11, 12].

Os métodos de TAB são basicamente divididos em faixas de tempo de atuação[11]. Dentre os diversos métodos, destaca-se a Transferência Rápida de Barras (TRB - do inglês: *Fast Bus Transfer*, *High-Speed Bus Transfer* e *Fast Motor Bus Transfer*), o foco deste trabalho. A TRB tem sua atuação rápida em um intervalo de até 10 ciclos da frequência do sistema, após a falha da fonte principal, garantindo assim a continuidade dos processos críticos.

1.1 Aspectos para implementação da transferência rápida de barras em usinas nucleares

Após o acidente de *station blackout* da usina de Fukushima, as entidades de energia nuclear reafirmaram que as instalações elétricas de uma usina nuclear cumprem uma função de extrema importância para mitigar acidentes nucleares[8]. No relatório de análise de segurança dessas usinas, é necessário examinar vários modos de falha, sendo a maioria relacionada a problemas no fornecimento de energia, conforme mencionado em [13]. Como exemplo, uma falha na fonte principal de energia obriga a atuação do sistema de TRB, na tentativa de transferir a fonte principal para a fonte reserva e evitar o desligamento do reator nuclear por falha de alimentação elétrica. Caso o reator seja desligado, o processo de religamento pode demorar em torno de 20 horas [9]. Por outro lado, se o processo de TRB ocorrer, esse evento pode levar cerca de 50-167 ms (ou 3-10 ciclos da frequência do sistema elétrico), sem complicações para a segurança nuclear.

Em consequência do acidente mencionado, o *RG 1.155 - Station Blackout* [8] prevê diversas exigências para a operação de uma usina nuclear. Dentre essas exigências, a TRB é incluída na análise como um meio de aprimoramento da disponibilidade da fonte externa de energia (fonte reserva). Além disso, a análise probabilística de segurança requer que a fonte externa de

¹Cabe ressaltar que a fonte reserva, neste caso, é proveniente de uma barra infinita de energia (concessionária de energia), impossibilitando um sincronismo regular em que: ângulo, amplitude e frequência podem ser regulados.

energia tenha uma baixa taxa anual de perda de energia² para ser considerada confiável. Esse requisito, se não atendidos, dificulta a obtenção da licença de operação da usina, concedida pelo órgão regulador de energia nuclear.

Apesar do processo de TRB ser altamente recomendado para manter o reator em operação, essa transferência deve ser realizada de maneira segura visando evitar transitórios eletromagnéticos severos que venham a danificar e reduzir a vida útil dos motores e equipamentos das instalações. Durante a rápida reconexão do novo suprimento de energia, supervisionado pela TRB, os motores de indução estão sujeitos a altas oscilações de correntes e torções do eixo. A amplitude desses transitórios depende de diversos fatores, como: a magnitude da tensão residual do motor; o ângulo de fase entre a tensão residual do motor e a tensão da fonte reserva; e a diferença de frequência entre as fontes, dentre outros fatores [9]. As correntes de reenergização do motor e o torque no eixo são duas considerações importantes para especificar os critérios da TRB. A previsão desses parâmetros torna-se difícil ao lidar com múltiplas cargas de motor, com diferentes características elétricas e mecânicas. Se a reconexão for feita em um instante desfavorável, a torção do eixo pode exceder o valor permitido e levar à deformação permanente ou, até mesmo, à quebra do eixo.

Conforme citado em [9], durante os anos de 2005 - 2014, 30 casos de eventos de desligamento de reatores causados por falhas elétricas foram relatados pelo Instituto de Segurança Nuclear da Coreia. Entre eles, em 20 casos a TRB foi solicitada, sendo que em 12 casos a TRB falhou, em um caso houve uma TRB bem-sucedida e nos outros 7 não foram encontrados registros.

Diante dos aspectos apresentados, nota-se a importância da implementação de um sistema de TRB, bem como a necessidade atual de seu aprimoramento, diante das dificuldades de realizar a transferência de maneira eficaz e segura, sem danificar os equipamentos das instalações.

1.2 Processo de transferência rápida de barras e seus desafios

A TRB deve ser adotada utilizando precauções para evitar danos mecânicos e curtos-circuitos durante o processo de transferência para a fonte reserva (saudável). É importante reafirmar que a função de um sistema TRB não se limita apenas a manter a continuidade do processo, mas também a transferir fontes de energia sem causar danos e prevenir a degradação da vida útil dos motores e equipamentos do sistema.

Os danos mecânicos que podem ocorrer no processo de TRB estão principalmente relaci-

²taxa anual de perda de energia é o número de falhas na rede elétrica por ano

onados ao torque transitório excessivo desenvolvido no motor. Neste sentido, a NEMA MG 1-2006 [14] (*Motors and Generators*) e a ANSI C50.41-2000 [15] (*American National Standard for Polyphase Induction Motors for Power Generating Stations*) recomendam um critério, conhecido como Taxa V/f, para realização segura da transferência. No entanto, tal critério ignora a corrente de *inrush* quando a transferência de barramento ocorre fora de fase, o que pode resultar em correntes e torques transitórios entre 2 e 20 vezes maiores que o nominal [15]. Ainda neste contexto, a norma [15] recomenda que um estudo seja realizado para o sistema específico, de modo a determinar as magnitudes aceitáveis para esses transitórios. Essa mesma referência também reconhece que esses estudos são complexos e exigem informações detalhadas sobre os motores, os equipamentos conectados e a fonte de energia.

Em função da aplicação contínua do critério da taxa V/f, o relatório [16] emitiu um alerta para as usinas nucleares, recomendando uma reavaliação do processo de TRB, devido à constatação de falhas em motores relacionados à segurança nuclear durante a transferência rápida. Esse fato evidencia que o critério comumente adotado não é seguro. Em outras palavras, uma aplicação inadequada desse critério pode produzir uma grande circulação de correntes indevidas e danificar barras, transformadores e cargas. Em 2014, a NEMA retirou o critério de V/f, assumindo que esse não era suficientemente seguro. Apesar disso, diversos dispositivos comerciais ainda utilizam esse critério para a TAB [9, 11, 12].

Pesquisas adicionais mostraram que limitar a taxa V/f não garante que os torques do eixo do motor estejam nos limites aceitáveis [9, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 20, 21]. Apesar disso, ainda não há um critério de aceitação para uma TRB segura.

Além do critério da taxa V/f, os dispositivos eletrônicos inteligentes (do inglês: *Intelligent Electronic Devices* - IEDs), que realizam a TRB, checam a diferença angular entre as fontes para enviar o comando ao disjuntor de transferência. No entanto, isso não garante que a diferença de fase entre as fontes permaneça nessa faixa, visto que o disjuntor pode levar de 3 a 8 ciclos para realizar o fechamento após o recebimento do comando. Além do mais, durante todo esse processo a tensão no barramento de motores sofre um decaimento de frequência e amplitude. O guia de proteção de motores do IEEE Std C37.96-2000 [22] (*Guide for AC Motor Protection*) recomenda que o ângulo de reconexão do motor na barra de energia não ultrapasse 90°. Já o IEEE Std 1547 [23] (*Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*) recomenda que a diferença de fase para realizar um sincronismo entre duas fontes não ultrapasse 20° para sincronismos regulares.

O artigo [10] apresenta uma comparação do critério V/f com o torque máximo do motor após a transferência. Nesta análise, nota-se que não há uma relação entre tal critério e o torque,

o que confirma a retirada do critério V/f pela NEMA.

O relatório da *IEEE Power System Relay Committee* [11] afirma que deve ser desenvolvido um dispositivo ultra rápido de verificação de sincronismo com precisão e rapidez adequada para detectar a diferença de fase entre a barra desconectada e a fonte reserva. No entanto, não é apresentado nenhum detalhe a respeito de tal dispositivo.

Atualmente, diversos dispositivos de transferência de barras utilizam ajustes estimados para casos genéricos de baixa, média e alta inércia do grupo de motores ligados ao sistema. Esses ajustes não se adaptam perfeitamente a todos os casos, como visto em [16], que apresenta o relato de falhas da TRB em usinas nucleares.

Além disso, a implementação dos métodos de TRB encontra barreiras para determinar a diferença de fase entre dois sinais em questão: um deles com frequência estável (tensão da fonte reserva) e outro com frequência em decaimento (tensão em decaimento da barra principal no momento em que não há fontes conectadas a barra). Neste caso, destacam-se dois pontos importantes no processamento de sinais:

- A comparação de fases entre dois sinais de frequências diferentes não provê sentido físico/matemático para o sincronismo de fontes. Essa comparação deve ser realizada entre dois sinais de mesma frequência com a finalidade de verificar a semelhança entre eles [24];
- A Transformada Discreta de Fourier (DFT), comumente utilizadas em dispositivos de TRB, têm resolução limitada pela frequência de amostragem do sistema, logo, não fornecem resolução suficiente para o cálculo de fase em sinais em decaimento [18, 19].

Podemos sumarizar os principais pontos de atenção apresentados no estado da arte até o momento. Deste modo, temos que:

- Não há normas nem orientações na literatura que contemplem critérios seguros para realizar a TRB. Pesquisadores afirmam que devem ser desenvolvidos métodos inteligentes e efetivos para realizar a TRB de maneira segura;
- As usinas relatam mau funcionamento do sistema de TRB resultando em falhas nos motores relacionados à segurança nuclear;
- Os métodos atualmente utilizados na indústria não consideram o tempo de fechamento do disjuntor e conseqüentemente não garantem o atendimento dos critérios apropriados para evitar danos no processo.

Deste modo, nota-se que ainda há muito a contribuir com a TRB, principalmente no que diz respeito à elaboração de regras de transferência mais consistentes e métodos mais flexíveis que se adaptem a qualquer sistema, sem a necessidade de estudos e teste dispendiosos.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver métodos seguros de TRB que possam ser aplicados em diversas situações industriais, independentemente das características específicas do sistema elétrico. Com esse intuito, são propostos os seguintes objetivos principais:

- Propor um algoritmo preditivo para TRB que considere os critérios convencionais, bem como o tempo de fechamento do disjuntor;
- Propor um algoritmo preditivo para TRB que aplique um novo critério e considere o tempo de fechamento do disjuntor.

Como complemento aos propósitos principais deste trabalho, são propostos os seguintes objetivos secundários:

- Analisar os transitórios eletromagnéticos em transferência rápida de fontes não supervisionadas;
- Verificar os pontos críticos dos sistemas de TRB convencionais;
- Propor limites e critérios para realização da TRB;
- Desenvolver novas técnicas de processamento de sinais para aprimorar as lacunas do estado da arte no assunto de TRB;
- Colocar em evidência o tema de TRB para que outros pesquisadores possam, também, contribuir com seu desenvolvimento.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está apresentado em capítulos, cujos conteúdos são os seguintes:

1. *Introdução*: apresenta a introdução ao tema com alguns aspectos relevantes da literatura e os objetivos do trabalho;

2. *A Transferência automática de barras*: apresenta as categorias de TAB, dentre elas a TRB, foco deste trabalho. E, além disso, discute os critérios de transferência rápida aplicados nos processos industriais;
3. *Aspectos normativos e estado da arte*: aborda os principais aspectos normativos da TRB relacionando-os com o estado da arte e seus desafios. Além disso, abordam-se os temas da análise documental recomendados pelas normas e discute-se a efetividade e construção dos critérios convencionais de TRB;
4. *Metodologias*: propõem duas metodologias seguras para TRB: a Transferência Rápida de Barras com Predição (TRBP) e um Novo Critério de Transferência Rápida de Barras com Predição (NTRB);
5. *Resultados*: apresenta os resultados dos métodos apresentados no Capítulo 4 quando submetidos a casos de simulações em sistemas elétricos com características de inércia diferentes. Ainda, apresenta uma análise do método de Transferência Rápida de Barras Convencional (TRBC) e dos transitórios eletromagnéticos devido à comutação de fontes em barra de motores. Tais análises são utilizadas na construção do conhecimento e ajustes dos métodos propostos;
6. *Análise comparativa*: apresenta uma análise comparativa entre os métodos de TRBC, TRBP e NTRB quando submetidos aos mesmos casos de simulação;
7. *Validação dos métodos*: apresenta a validação dos métodos propostos por meio de simulações um modelo de um sistema elétrico de usina nuclear;
8. *Considerações finais*: apresenta as conclusões sobre o trabalho;
9. *Anexo A*: apresenta uma análise complementar aos resultados dos casos de validação;
10. *Referências*: apresenta a bibliografia que foi a base para realização deste trabalho.

2 TRANSFERÊNCIA AUTOMÁTICA DE BARRA

A TAB é normalmente implementada em um IED que monitora a tensão da fonte reserva e da barra principal de motores. Ao detectar uma falha na fonte principal, esse dispositivo processa os sinais de tensão para determinar o momento ideal para a abertura do disjuntor D1 e o fechamento do disjuntor D2 (apresentado na Figura 1.1). Quando a fonte principal é desconectada do barramento principal, os motores continuam girando devido à sua inércia e passam a alimentar o barramento principal, atuando como geradores de indução por um curto intervalo de tempo. Antes que a tensão na barra seja extinta e os motores desacelerem completamente, a TAB é realizada, evitando interrupção no fornecimento de energia para os sistemas essenciais. Entretanto, caso o disjuntor D2 seja fechado em um momento inadequado, podem ocorrer danos aos equipamentos, principalmente aos motores da instalação.

Nesta seção, são abordados os aspectos mais importantes da TAB, como as categorias de transferência, os critérios da taxa V/f e aspectos normativos, dentre outros assuntos. O ponto principal desta seção concentra-se na TRB em modo sequencial, que é o tema central deste trabalho.

2.1 Categorias de transferência automática de barra

Existem diferentes categorias de TAB e, embora a implementação de cada categoria de TAB possa variar de acordo com o fabricante, o conceito básico e seus requisitos foram definidos pelo grupo de trabalho *IEEE J9 Working Group of the Power System Relay Committee* [11]. As categorias e seus requisitos estão representados de forma gráfica na Figura 2.1.

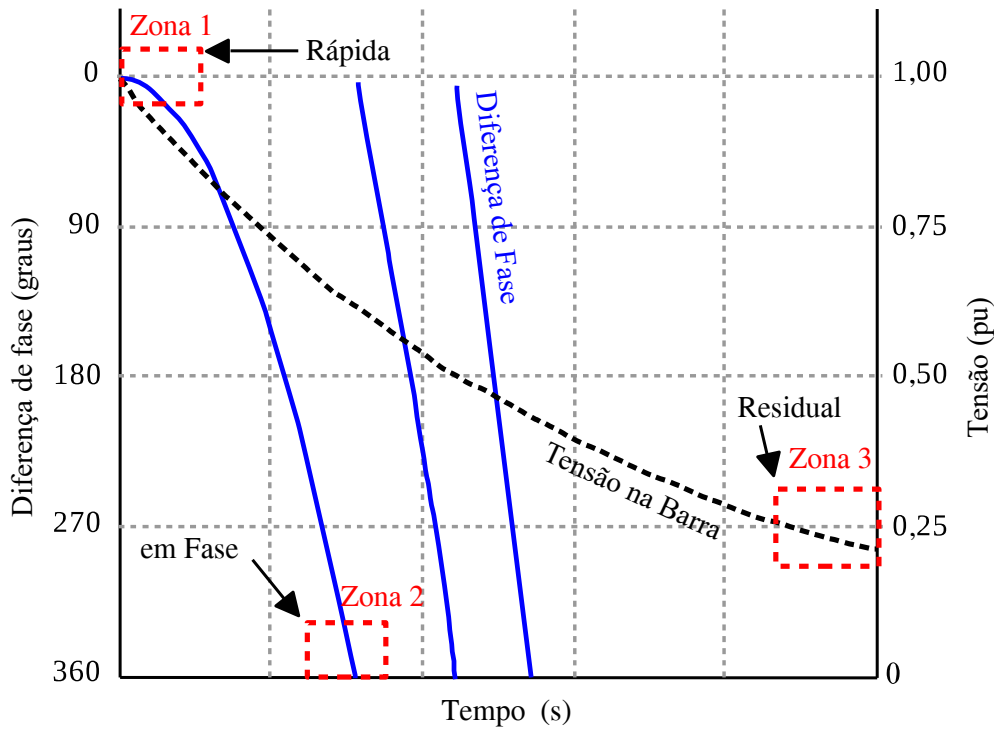


Figura 2.1: Categorias de transferência automática de barras separadas por zonas de atuação.

Fonte: próprio autor.

A Figura 2.1 apresenta três categorias de TAB divididas por faixas de tempo de atuação¹, ângulo de fase e amplitude de tensão na barra de motores. Essas categorias são:

- Zona 1 - Transferência Rápida: ocorre quando o ângulo de fase entre a fonte e a barra, juntamente com o nível de tensão, se movem para os limites predeterminados, em um tempo menor que 10 ciclos da frequência fundamental do sistema (no caso de 60Hz, 167 ms). Ainda, essa zona pode ser caracterizada pelo modo de abertura do disjuntor da fonte principal e fechamento do disjuntor da fonte reserva, podendo ser do tipo sequencial ou simultâneo (descritos na Seção 2.1.1 e Seção 2.1.2);
- Zona 2 - Transferência em Fase: ocorre em um tempo maior que 10 ciclos (ou seja, após a saída da Zona 1), quando ocorre a primeira coincidência de fases entre a barra de motores e a fonte de reserva. O fechamento do disjuntor da nova fonte é supervisionado por meio do ângulo de fase entre a fonte e a barra, nível de tensão e frequência do barramento de motores;
- Zona 3 - Transferência por Tensão Residual: ocorre caso a tensão residual do barramento caia abaixo de um limite predeterminado, geralmente 0,25 pu. No entanto, as transferências do barramento de média tensão devem ser concluídas antes que a tensão do

¹a escala de tempo da Figura 2.1 varia de acordo com inércia do sistema

barramento decaia ao ponto em que os elementos de proteção de subtensão do motor sejam sensibilizados e desliguem os motores. Portanto, as configurações desta categoria de TAB devem ser coordenadas com os relés de subtensão dos motores.

É comum implementar de todas as categorias citadas nos processos industriais que possuem TRB, visto que elas estão organizadas de maneira sequencial no tempo.

As seções a seguir descrevem os modos sequencial e simultâneo da TRB, que correspondem à Zona 1.

2.1.1 Modo sequencial de transferência rápida de barras

No modo sequencial de TRB, o fechamento do disjuntor da fonte reserva (saudável) é realizado após a abertura do disjuntor da fonte principal (em falha), ou seja, o modo requer a confirmação de abertura do disjuntor da fonte principal para comandar o fechamento do disjuntor da fonte reserva. A Figura 2.2² apresenta a implementação do modo sequencial da TRB comumente adotada nos processos industriais ilustrados na Figura 1.1

A Figura 2.2 apresenta 5 sinais ao longo do tempo da TAB no modo sequencial: 1) Comando de abertura para o disjuntor D1: a borda de subida desse sinal indica que o disjuntor D1 foi comandado a abrir; 2) Estado da bobina de abertura do disjuntor D1: a borda de subida desse sinal indica que o disjuntor foi efetivamente aberto (ANSI 52B); 3) Comando de fechamento para o disjuntor D2: a borda de subida desse sinal indica que foi comandado o fechamento do disjuntor D2; 4) Estado da bobina de fechamento do disjuntor D2: a borda de subida desse sinal indica que o disjuntor D2 foi fechado (ANSI 52A); e 5) Fontes conectadas à barra: a borda de descida desse sinal indica que não há fontes ativas de energia conectadas à barra principal.

O processo de transferência sequencial ocorre conforme as seguintes etapas:

- No instante t_a a fonte principal falha e o comando de abertura é enviado para o disjuntor D1;
- Ao receber o comando de abertura, o disjuntor D1 leva um tempo de Δt_{d1} para efetuar a abertura, que ocorre efetivamente no instante t_b . Nesse momento, a alimentação da barra de motores é interrompida;
- Um sinal de confirmação de abertura do disjuntor D1 é enviado, recebido e processado pelo dispositivo de TRB em um período de Δt_p . Após o processamento, os critérios da

²É importante ressaltar que existe uma incerteza no diagrama devido às rampas de transição nos comandos, aos arcos no desligamento das fontes e tempo de detecção do defeito.

transferência são verificados. Caso os critérios sejam atendidos, o fechamento do disjuntor D2 é comandado no instante t_c . O comando de fechamento do disjuntor D2 é realizado mediante supervisão dos critérios de TRB (apresentados na Seção 2.2);

- Ao receber o comando de fechamento, o disjuntor D2 leva um tempo de Δt_{d2} para efetuar o fechamento, que ocorre efetivamente no instante t_d . Neste momento, a fonte reserva assume a alimentação da barra de motores.

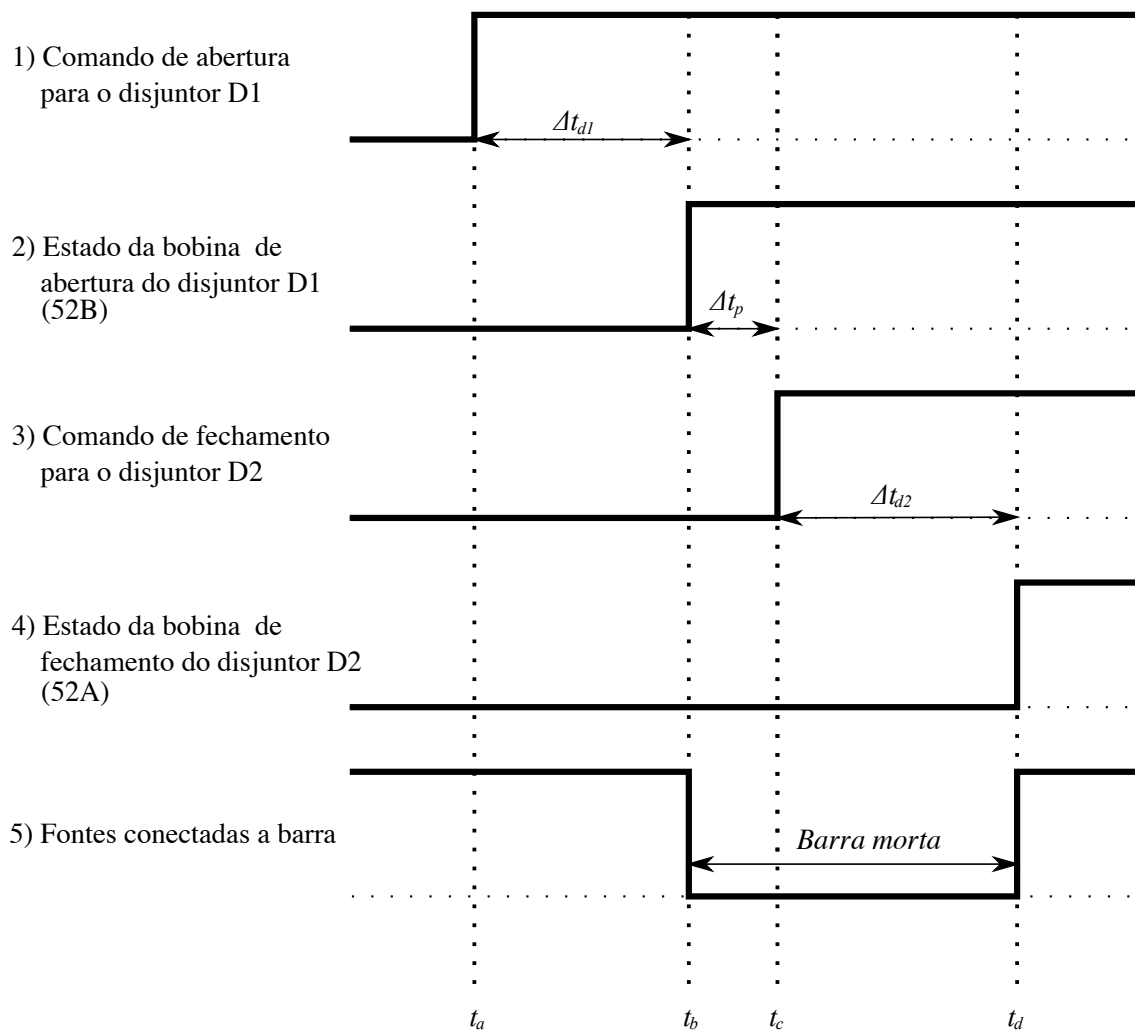


Figura 2.2: Diagrama do modo sequencial de TRB.

Fonte: próprio autor.

É importante observar que a diferença entre os instantes t_b e t_d corresponde ao tempo de “Barra morta”. Neste intervalo, a barra de motores fica desprovida de alimentação proveniente das fontes ativas (geradores ou concessionária de energia).

2.1.2 Modo simultâneo de transferência rápida de barras

No modo simultâneo de TRB, os comandos de fechamento e abertura dos disjuntores são enviados simultaneamente. Nesse modo, considera-se que o tempo de abertura do disjuntor da fonte principal é normalmente menor que o tempo de fechamento da fonte reserva. Essa consideração é crucial para evitar que ambos os disjuntores estejam fechados concomitantemente. Sendo assim, não requer a confirmação de abertura do disjuntor D1 para a transferência ser iniciada, eliminando os atrasos e reduzindo o tempo de “Barra morta”[9]. Por outro lado, esse método apresenta alto potencial para danificar transformadores ou outros equipamentos, especialmente se as fontes estiverem fora de fase ou se a abertura do disjuntor D1 falhar [12].

2.2 Critérios de transferência rápida de barras aplicados nos processos industriais

Os dispositivos de TRBC, normalmente, compartilham os mesmos critérios para a realização de transferência rápida. Em um sistema de TRB, é necessário que os critérios sejam atendidos antes que o comando de fechamento do disjuntor da fonte reserva seja enviado. Os critérios apresentados a seguir são os mesmos citados em [11, 12, 25]³:

1. Taxa V/f entre a tensão na barra do motor e a tensão da fonte reserva: menor que 1,33 pu (ver Seção 2.2.1);
2. Diferença de ângulo de fase entre a tensão na barra do motor e a tensão da fonte reserva: entre -20° e 20° ;
3. Tempo de transferência menor que 10 ciclos da frequência do sistema.

Cabe ressaltar que, mesmo que o disjuntor receba a ordem de fechamento (ou seja, todos os critérios sejam atendidos), não há garantia que os critérios continuem a ser atendidos no instante de fechamento. Isso ocorre pois o disjuntor requer um tempo para realizar seu efetivo fechamento mecânico (representado por Δt_{d2} na Figura 2.2) e, durante esse tempo, o sistema muda seu estado devido ao decaimento de tensão na barra.

³Dentre os critérios, ainda há diferentes visões sobre o módulo da tensão na barra do motor e a diferença de frequência entre a tensão na barra do motor e a tensão da fonte reserva. Normalmente são adotados como 0,5 pu e 2 – 5 Hz, respectivamente.

2.2.1 Critério da taxa V/f

A NEMA/ANSI C50.41 [15] define a taxa V/f como a diferença vetorial entre: E_M - o quociente da tensão pela frequência, medido na barra principal; e E_G - o quociente da tensão pela frequência, medido na fonte reserva. A taxa V/f é representada pelo diagrama vetorial da Figura 2.3 e pela equação 2.1.

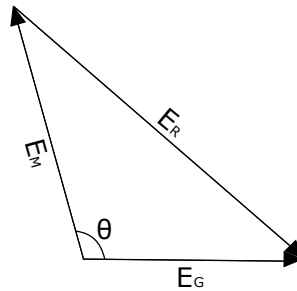


Figura 2.3: Diagrama vetorial da taxa V/f apresentado pela ANSI C50.41.

Fonte: NEMA/ANSI C50.41. [15]

$$E_R = \sqrt{E_G^2 + E_M^2 - 2 \cdot E_G \cdot E_M \cdot \cos\theta} \quad (2.1)$$

onde E_M é o módulo do quociente da tensão pela frequência na barra de motores, ambos em pu; E_G é o módulo do quociente da tensão pela frequência na fonte reserva, ambos em pu; e θ é o ângulo de fase entre as tensões na fonte reserva e na barra principal.

De acordo com esse critério, o módulo E_R (taxa V/f) deve ser inferior a 1,33 pu no momento em que ocorre a transferência de fontes (conexão da fonte reserva). Esse critério foi desenvolvido com base em estudos que consideram o pior caso de torque em motores de indução, semelhante ao gerado por um curto-circuito monofásico nos seus terminais [11].

2.2.2 Taxa V/f e os motores de indução.

A razão entre a tensão induzida (V_{ind}) e a frequência (f_M) é diretamente proporcional ao fluxo do entreferro (Φ_M) de um motor de indução [26]. Sendo assim, temos:

$$\Phi_M \propto \frac{V_{ind}}{f_M} \quad (2.2)$$

Considerando que a resistência e reatância do estator desta máquina sejam suficientemente pequenas, pode-se desprezar a queda de tensão interna do motor. Assim, pode-se considerar

que a tensão nos terminais do motor $V_M \approx V_{ind}$, ou seja:

$$\Phi_M \propto \frac{V_M}{f_M} \quad (2.3)$$

Caso a frequência da fonte de alimentação seja reduzida, e a tensão mantida constante, o fluxo magnético do motor pode saturar devido às propriedades magnéticas do ferro. Esse efeito provoca o aumento excessivo das correntes do motor por efeito da redução das reatâncias dos enrolamentos. Por outro lado, quando a frequência é aumentada e a tensão é mantida constante, ocorre uma redução do fluxo no entreferro. Essa redução provoca a queda gradual do torque máximo da máquina. Em resumo, assegurando um fluxo constante no motor, há uma tendência a evitar o surgimento de altas correntes, mantendo a capacidade de torque desenvolvidos nos motores.

Analisando as premissas do critério da taxa V/f na Figura 2.3 e na equação 2.1, nota-se que:

$$\Phi \propto \frac{V_M}{f_M} = E_M \quad (2.4)$$

Dadas as equações anteriores, pode-se considerar que o critério da taxa V/f está baseado na diferença vetorial do fluxo que será imposto à máquina ($\propto E_G$) e o fluxo atual ($\propto E_M$).

Este capítulo apresentou a TRB e sua categorias, bem como os seus modos de operação. Além disso, apresentou os critérios utilizados para realizar a TRB.

3 ASPECTOS NORMATIVOS E ESTADO DA ARTE

Esta seção aborda os principais aspectos normativos da TRB relacionando-os com o estado da arte e seus desafios. Além disso, abordam-se os temas da análise documental recomendados pelas normas e os critérios de TRB.

3.1 Recomendação sobre a análise de eficiência da transferência rápida de barras

Em função do potencial risco de acidentes em alguns tipos de indústrias é exigida uma comprovação documental para a aplicação da TRB. O Guia SSG-34 - *Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants* da *International Atomic Energy Agency* [27] exige estudos de transferência de barras que analisem os efeitos da tensão, ângulo de fase, frequência e reaceleração do motor. Esses estudos devem ser realizados antes, durante e imediatamente após a transferência automática de barras. Ainda, o IEEE Std 765 - *Preferred Power Supply (PPS) for Nuclear Power Generating Stations (NPGS)* [5] exige que a adequação do esquema de TRB seja demonstrada. Esses estudos são considerados documentação fundamental para obter a licença da instalação elétrica de uma usina nuclear.

No mesmo sentido a NEMA/ANSI C50.41 - *American National Standard for Polyphase Induction Motors for Power Generating Stations* [15] recomenda que a equipe responsável pela implementação realize estudos prévios para determinar o valor ideal da taxa V/f antes de utilizar esse sistema. Essa análise deve considerar as diferenças angulares entre a barra principal e a fonte reserva. O IEEE Std C37.96-2000 - *IEEE Guide for AC Motor Protection* [22] acompanha as mesmas recomendações citadas.

A Norma IEEE Std 741 - *Standard for Criteria for the Protection of Class 1E Power Systems and Equipment in Nuclear Power Generating Stations* [28] descreve uma metodologia de análise para prever a operação do barramento de motores antes, durante e após a TRB:

- a) Antes da TRB, é necessário estabelecer as condições de regime permanente dos motores. Ao iniciar a transferência, o disjuntor de origem é sinalizado para abrir. Depois que os contatos do disjuntor de origem começarem a se separar, um arco voltaico é formado.

Quando o arco é extinto, o barramento passa a operar como um sistema isolado;

- b) Durante a TRB, é necessário modelar o sistema no período em que a barra opera isolada de uma fonte. O tempo entre a extinção do arco no disjuntor da fonte principal e a reenergização do disjuntor da fonte reserva é comumente referido como o “tempo morto”. Durante esse tempo, o grupo de motores ainda conectados ao barramento funciona como um sistema isolado. Alguns dos motores do grupo atuam como geradores e outros como cargas. Enquanto isso, a tensão do barramento começa a decair em magnitude e fase. A previsão precisa desse decaimento é importante no projeto do esquema de transferência de barra, bem como na filosofia de proteção;
- c) Após a TRB, os efeitos dos torques e correntes são as principais preocupações. A tensão na barra principal decai, tanto em magnitude quanto em ângulo de fase. Quanto menor a inércia do motor e da carga mecânica, mais rápido é o decaimento. Após o fechamento do disjuntor da fonte reserva, ocorrem grandes transitórios que prejudicam o funcionamento do sistema e sensibilizam a atuação das suas proteções.

Além dessas, outras orientações são apresentadas. No entanto, não são fornecidos os valores específicos de torque e corrente considerados aceitáveis para a transferência ou qualquer direção mais assertiva para conduzir o estudo recomendado.

3.2 Critérios básicos normativos

A NEMA/ANSI C50.41 - *Polyphase Induction Motors for Power Generating Stations* [15], define a TRB como a transferência que:

- a) Ocorre em um período inferior a 10 ciclos da frequência do sistema;
- b) Possui diferença angular de tensão entre a barra principal e a fonte reserva que não pode exceder 90° ;
- c) Possui valor da taxa V/f (E_R , ver equação 2.1) que não ultrapasse 1,33 pu no momento da transferência.

Em relação ao item a), há um consenso na literatura em adotar 10 ciclos para atuação da TRB [7, 9, 11, 12]. Algumas referências estabelecem um limite mínimo de tempo de transferência devido ao tempo necessário para o fechamento do disjuntor [11, 12]. Entretanto, o tempo máximo de 10 ciclos é mantido.

Em relação ao item b), o guia de proteção de motores do IEEE Std C37.96 - *Guide for AC Motor Protection* [22] acompanha a recomendação em que o ângulo de fechamento do disjuntor não deve ultrapassar 90° para a TRB. Já a IEEE Std 1547 - *Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces* [23], trata sobre o sincronismo regular entre fontes em que há um controle sobre o gerador a ser sincronizado. Nesta norma, recomenda-se que os sincronismos entre fontes sejam realizados dentro dos limites indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros para a sincronização entre diferentes fontes de energia de acordo com IEEE Std 1547.

Potência da fonte de energia (kVA)	Diferença de frequência (Hz)	Diferença de tensão (%)	Diferença de fase ($^\circ$)
0-500	0,3	10	20
500-1500	0,2	5	15
>1500	0,1	3	10

Fonte: IEEE Std 1547 [23].

Da Tabela 3.1, nota-se que a Norma IEEE Std 1547 estabelece o ângulo máximo permitido para sincronismos regulares é de 20° com diferença de tensão máxima é de 10%.

O trabalho [29] realiza um estudo sobre a máxima diferença angular para o sincronismo regular de geradores de pequeno porte (esses geradores suportam transitórios maiores que os de grande porte). Ainda, o estudo ressalta que o processo de sincronismo não é apenas uma simples questão de ângulo, mas também envolve fatores como: torque, velocidade, módulo da tensão nos terminais, entre outros. Ao final da discussão, sugere-se um ângulo máximo de $\pm 60^\circ$ para geradores de pequeno porte aplicado a sincronismos regulares.

A referência [12] apresenta as práticas industriais relacionadas à aplicação da TRB. Dentre das indústrias que empregam esse método, algumas utilizam um sistema de verificação rápida, enquanto outras se limitam a um relé de sincronismo eletromecânico, sem um IED de supervisão dedicado. Essas indústrias adotam limites de diferença angular para o sincronismo, variando entre 20° a 35° .

Os estudos de casos apresentados pelo *IEEE Power System Relay Committee* [11] adotam um ângulo limite de sincronismo de 20° . Em um cenário de TRB, ao atender esse limite, é enviado o comando de fechamento para o disjuntor da fonte reserva. No primeiro caso apresentado na referência, o disparo do comando de fechamento ocorreu dentro do limite pré-determinado com ângulo de $4,3^\circ$. O disjuntor da fonte reserva levou 5,4 ciclos para efetuar seu fechamento

efetivo após o comando. Como resultado, o efetivo fechamento ocorreu com um ângulo de $-49,2^\circ$. É importante observar que, há uma diferença angular de $53,5^\circ$ entre o disparo do comando de fechamento e o efetivo fechamento do disjuntor. Portanto, mesmo com o ajuste do ângulo alvo, não há um controle preciso sobre o ângulo de fechamento do disjuntor.

Existem alguns IEDs comerciais dedicados à TRB, dentre eles destaca-se o *SIPROTEC 7VU683 - Multi-function High Speed Motor Bus Transfer* da SIEMENS, *M-4272 Digital Motor Bus Transfer System* da Beckwith Electric e o *SEL-700BT Motor Bus Transfer Relay* da Schweitzer Engineering Laboratories - SEL. Cada um desses permite ajustes diferentes entre si.

O IED SIEMENS [25], acompanha os critérios da NEMA com ângulo limite de 90° . No entanto, sugere 60° como o ângulo máximo no instante de fechamento do disjuntor, visando evitar grandes transitórios. Ao considerar o tempo de 3 ciclos para o fechamento do disjuntor, é sugerido um ângulo limite de 20° como critérios para o envio do comando do disjuntor.

Já o IED Beckwith Electric permite ajustes de $0 - 90^\circ$ como limite angular na TRB. O artigo [30], de autor afiliado a mesma empresa, apresenta em seus testes um limite de 20° para disparar o comando de fechamento.

Ambos os dispositivos mencionados utilizam um cálculo do escorregamento angular do sistema para determinar o ângulo limite. Esse cálculo leva em consideração a inércia característica do sistema e o tempo de fechamento do disjuntor. O escorregamento angular do sistema é calculado da seguinte forma:

$$\Delta\phi_{slip} = 360^\circ(S_{init} + 0,5R_sT_{bc})T_{bc} \quad (3.1)$$

onde T_{bc} é o tempo de fechamento do disjuntor, S_{init} é o decaimento de frequência inicial, R_s é taxa de decaimento de frequência devido à inércia do sistema e $\Delta\phi_{slip}$ o escorregamento angular após o tempo T_{bc} .

É importante observar que o cálculo mencionado requer o conhecimento das características de inércia do sistema, as quais podem variar durante a operação devido ao número de motores em funcionamento, alterações na carga dos motores, entre outros fatores.

O IED SEL [31, 32] não apresenta claramente o método para determinar a diferença de fase para o realizar o fechamento do disjuntor. Em suas configurações, permite um amplo ajuste do ângulo de transferência. No entanto, possui uma supervisão interna que impede que a diferença angular seja superior a 30° .

Por fim, nota-se que há uma tendência na aplicação industrial em adotar uma diferença de fase não superior a 20° como critério para a decisão de envio do comando de fechamento. No

entanto, mesmo com a utilização da equação 3.1 para o cálculo desse valor, esses ajustes não se adaptam perfeitamente a todos os casos, como visto no informativo No. 91-57: *Operational Experience on Bus Transfer* da *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) [16], que apresenta relatos de falhas da TRB em usinas nucleares.

Em relação ao item c), a NEMA retirou o critério da taxa V/f em sua versão de 2014, reconhecendo que esse não é suficientemente seguro [28]. Além disso, inúmeros artigos apresentam uma análise do critério da taxa V/f , reafirmando essa insegurança no processo de TRB [2, 9, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 20, 21].

Diante disso, nota-se que nenhuma das orientações e normas citadas estabelecem um critério definitivo para a TRB que possa ser aplicado de forma ampla em todos os sistemas. Além disso, tais normas recomendam e exigem das indústrias estudos complexos dos seus sistemas.

3.3 Limites de corrente e torque no processo de transferência rápida de barras

Os elevados transitórios de corrente e torque no processo de TRB ocorrem após o fechamento do disjuntor da fonte reserva. É essencial adotar critérios de transferência com base na magnitude desses transitórios, uma vez que essas variáveis são de fato importantes para o sucesso da transferência. A norma NEMA/ANSI C50.41 [15] discute que as transferências ou religamentos de barras fora de fase podem resultar em correntes e torques que variam de 2 a 20 vezes os valores nominais. Essa amplitude é influenciada pelas características elétricas do motor, tempo de comutação, inércia do sistema rotativo, condições de operação, constantes de torção elástica, e número de motores no barramento, entre outros fatores.

Em relação às correntes, o IEEE Std 620 - *Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines* [33] menciona que, sob condições de rotor bloqueado, a corrente nos enrolamentos dos motores de indução pode chegar de 4 a 8 vezes a corrente nominal a plena carga. Essa corrente elevada pode ser sustentada durante curtos períodos em que a elevação de temperaturas dos enrolamentos atinjam um limite que possa causar danos no isolamento e ao próprio enrolamento. Portanto, a vida útil do motor é degradada a cada ocorrência desse tipo (sobrecarga térmica).

Já o IEEE Std 242 - *Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book)* [34] apresenta uma tabela com as características típicas de motores de indução, onde é indicado que a corrente de rotor bloqueado pode ser de 6 a 10 vezes a corrente nominal, dependendo da classe do motor.

Em relação ao torque, o IEEE Std 242 - *Buff Book*, já mencionado anteriormente, também apresenta na tabela de características típicas de motores de indução o torque máximo, que varia de 1,6 a 3 vezes o torque nominal.

O artigo [35] apresenta uma análise abrangente para determinar as dimensões iniciais de um eixo de transmissão de energia sujeito a carga de fadiga, com base nos códigos da *The American Society of Mechanical Engineers*. Para realizar esse cálculo, é necessário determinar o fator de segurança (F_{seg}) do projeto do eixo. Esse fator é multiplicado pelo torque no projeto do eixo, conforme mencionado em [36, 37]. O valor do F_{seg} pode variar de 1,3 a 6, dependendo da confiança e criticidade da aplicação. Não é recomendado utilizar valores de F_{seg} inferiores a 1,5, pois isso resultaria em riscos elevados para o projeto, deixando-o frágil a torções em operação normal. Além disso, o artigo apresenta uma tabela que relaciona os valores típicos de F_{seg} com as categorias de estresse mecânico, condição do material e condições ambientais. Como exemplo geral, recomenda-se um F_{seg} de 3,5 a 5 para categorias de estresse incertas, condição do material comum e condições ambientais incertas. Nesse caso de projeto, o eixo suporta de 3,5 a 5 vezes o torque desenvolvido.

O trabalho [38] afirma que, durante a transferência, quando o motor muda de modo de operação de gerador (torque negativo) para motor (torque positivo), a reversão pode resultar em um torque transitório de pico muito elevado. Esse torque transitório pode gerar fadiga no eixo e nos acoplamentos, causando danos mecânicos nos rolamentos, acoplamentos, caixa de engrenagens e torção do eixo. Caso o valor de pico a pico do torque no eixo exceda a resistência ao escoamento do material do eixo (ou seja, a tensão mecânica máxima antes de ocorrer deformação permanente ou cisalhamento do material), pode ocorrer a formação de rachaduras ou até mesmo a quebra imediata do eixo. Além disso, o trabalho menciona que os motores são geralmente projetados para suportar as correntes e torques durante curtos-circuitos em seus terminais. Em complemento, a referência [39] afirma que o torque de uma máquina em curto-circuito pode atingir valores de 3 a 15 vezes o valor nominal.

Por fim, o artigo [31] afirma que a literatura não estabelece claramente um limite de torque para motores. Portanto, não é possível estabelecer definições claras na literatura atual sobre o limite de torque após a TRB.

3.4 Processamento de sinais e a transferência rápida de barras

Os sistemas elétricos de potência operam normalmente com frequência constante (ou com pequenas variações). No entanto, durante o processo de TRB, é necessário monitorar dois sinais de tensão: um com frequência constante (fonte reserva) e outro com frequência em decaimento (barra de motores). Em aplicações de sistemas de energia, a Transformada Discreta de Fourier (TDF) é amplamente utilizada devido à sua estrutura simples e desempenho efetivo para obter as magnitudes do sinal e seus ângulos de fase [40]. No entanto, o desempenho da TDF é degradado na presença de sinais com variações de frequência e componentes de corrente contínua, o que pode resultar em erros nas medidas de magnitude e fase do sinal. Uma abordagem intuitiva para mitigar esse problema é ajustar a taxa de amostragem a cada janela da TDF de forma a corresponder à frequência do sistema [41], embora isso não contribua para o melhor desempenho da TDF frente a componentes de corrente contínua. Além disso, a taxa de amostragem variável requer um projeto mais complexo dos IEDs de TRB e pode introduzir erros de cálculo para o sinal de frequência constante.

O relatório [11] afirma que devem ser desenvolvidos dispositivos de verificação ultra rápido de sincronismo (mencionado como *High-speed Syns Check*) com precisão e rapidez adequada para detectar a diferença de fase entre a barra e a fonte reserva. No entanto, neste mesmo relatório, não são apresentados detalhes específicos sobre o dispositivo de verificação de sincronismo de alta velocidade. Supõe-se que as preocupações desse comitê sejam a rapidez no processamento do sinal, o tempo de fechamento do disjuntor e o escorregamento angular conforme apresentado na equação 3.1.

O artigo [19] propõe um algoritmo compensador baseado na TDF. Esse algoritmo permite prever a diferença de fase entre os sinais de tensão na barra e da fonte reserva. O método utiliza uma abordagem semelhante à linearização em série de *Taylor* do sinal [42] para encontrar a defasagem predita, com formulação semelhante à equação 3.1. No entanto, conforme já mencionado, a TDF não oferece bons resultados quando aplicada a sinais com frequência variável. Além disso, o artigo considera um decaimento linear de frequência para simplificar os cálculos, porém esse decaimento pode ocorrer bruscamente durante a TRB.

O artigo [18] detalha um algoritmo de processamento digital de sinais que calcula a magnitude e o ângulo de fase de um sinal de tensão em uma ampla faixa de frequências com precisão, mesmo usando TDF. Também é apresentado um algoritmo para prever a coincidência de fase entre a tensão do barramento principal e a tensão da fonte reserva.

Este capítulo apresentou os aspectos normativos em torno da TRB como: a recomendação sobre a análise de eficiência da transferência rápida de barras, critérios básicos normativos. Além disso, apresenta orientações normativas sobre os limites de corrente e torque e as lacunas de processamento de sinais na TRB.

4 MÉTODOS PROPOSTOS

Neste capítulo, são apresentadas duas metodologias para TRB, visando contribuir para o aprimoramento do estado da arte, principalmente no quesito segurança. Ambas utilizam a predição dos sinais de tensão na barra de motores e na fonte reserva no momento do fechamento do disjuntor da fonte reserva. As medidas previstas são comparadas com critérios específicos de cada um dos métodos propostos, a fim de permitir que o disjuntor receba o comando com antecedência suficiente, minimizando correntes e torques excessivos. As metodologias propostas neste capítulo são as seguintes:

1. Transferência Rápida de Barras com Predição (TRBP): utiliza predição Auto-Regressiva (AR) para prever os sinais de tensão medidos e critérios semelhantes aos aplicados na literatura (Seção 2.2.1);
2. Novo Critério de Transferência Rápida de Barras com Predição (NTRB): também utiliza predição AR e um novo critério baseado Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

A Figura 4.1 apresenta as etapas para implementação dos métodos propostos: 1) Predição AR; 2) Cálculo das grandezas elétricas; e 3) Critérios para transferência.

De maneira geral, em ambos os métodos, são coletadas amostras monofásicas de tensão na barra ($v_b[k]$) e na fonte reserva ($v_r[k]$). Essas são utilizadas para realizar uma estimativa dos sinais passos à frente. O número de amostras previstas (n) é determinado pelo tempo de fechamento do disjuntor. A partir dos sinais previstos, são calculadas as grandezas elétricas estimadas que serão comparadas com critérios pré-definidos. Caso esses critérios sejam atendidos, o comando de fechamento é enviado para o disjuntor da fonte reserva; caso contrário, o ciclo é reiniciado para coletar novas amostras. Os detalhes de cada etapa para a implementação dos métodos são apresentados nas seções seguintes.

4.1 Transferência rápida de barras com predição

A metodologia denominada TRBP realiza a predição das tensões da barra principal (v_b) e da fonte reserva (v_r). A verificação dos critérios é realizada utilizando o sinal predito, levando em consideração o tempo de fechamento do disjuntor da fonte reserva. São utilizados os

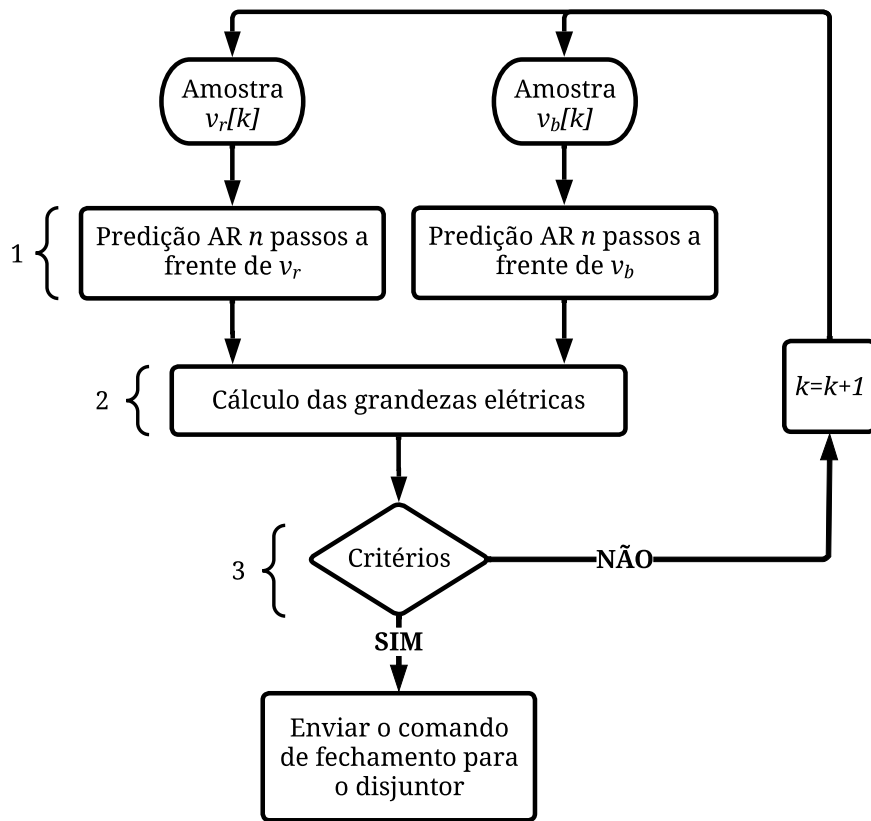


Figura 4.1: Diagrama simplificado das metodologias propostas.

Fonte: próprio autor.

mesmos critérios do método TRBC (descritos na Seção 2.2) com limites mais restritos. Dessa forma, é possível realizar o comando de fechamento do disjuntor da fonte reserva com a devida antecedência, visando atender aos critérios no efetivo fechamento do disjuntor, ao contrário do método convencional que busca atendê-los ao enviar o comando de fechamento do disjuntor. As etapas de implementação desta metodologia são descritas conforme ilustrados na Figura 4.1.

4.1.1 Predição auto-regressiva

Para prever o sinal da barra principal (v_b) e da fonte reserva (v_r) utilizou-se o modelo Auto-Regressivo (AR). Esse modelo é empregado na descrição de processos que variam no tempo, e destaca-se por sua simplicidade de implementação.

No modelo AR, a variável de saída depende linearmente das amostras anteriores e de um termo estocástico, formando assim uma função de transferência sem zeros. De forma geral,

para modelar uma série temporal y , pode-se utilizar a equação de *Yule-Walker* [43]:

$$y[k] = a_1[k]y[k-1] + \dots + a_p[k]y[k-p] + e[k] \quad (4.1)$$

onde, $y[k]$ é a k -ésima amostra da série temporal y ; $e[k]$ é a k -ésima amostra do ruído branco¹; p é o número de coeficientes AR; $a_p[k]$ é a k -ésima amostra o coeficiente p do modelo AR.

A equação 4.1 pode ser representada matricialmente por um modelo computacional discreto AR de $m+1$ equações:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y[k-m] \\ \vdots \\ y[k] \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}[k]} = \underbrace{\begin{bmatrix} y[k-m-1] & \dots & y[k-m-p] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y[k-1] & \dots & y[k-p] \end{bmatrix}}_{\mathbf{Y}[k-1]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} a_1[k] \\ \vdots \\ a_p[k] \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\phi}[k]} \quad (4.2)$$

onde $\mathbf{B}[k]$ é o vetor de saída do modelo AR com dimensão m correspondente a k -ésima amostra de $y[k]$; $\boldsymbol{\phi}[k]$ é o vetor de coeficientes AR com dimensão p ; $\mathbf{Y}[k-1]$ é a matriz de precursor de y de dimensão $(m+1) \times p$; e $m+1$ é o número de estimativas.

A equação 4.2 pode ser solucionada por diversos métodos, neste trabalho optou-se pela solução de pseudo inversão de matriz [44], em que

$$\boldsymbol{\phi}[k] = \{\mathbf{Y}[k-1]^T \times \mathbf{Y}[k-1]\}^{-1} \times \mathbf{Y}[k-1]^T \times \mathbf{B}[k] \quad (4.3)$$

4.1.2 Predição passos à frente

A equação 4.3 podem ser empregada para prever séries temporais passos à frente utilizando amostras preditas como entrada para o modelo AR. A matriz apresentada a seguir é a previsão n passos à frente dados os coeficientes $\boldsymbol{\phi}[k]$ no instante k , a série temporal y no instante k , e suas p amostras anteriores.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{y}[k+1] \\ \hat{y}[k+2] \\ \vdots \\ \hat{y}[k+n] \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{B}}[k]} = \underbrace{\begin{bmatrix} y[k] & y[k-1] & \dots & y[k-p+1] \\ \hat{y}[k+1] & y[k] & \dots & y[k-p+2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{y}[k+n-1] & \hat{y}[k+n-2] & \dots & \hat{y}[k+n-p] \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{Y}}[k]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} a_1[k] \\ a_2[k] \\ \vdots \\ a_p[k] \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\phi}[k]} \quad (4.4)$$

onde $\hat{y}[k]$ é a k -ésima amostra estimada passos à frente da série temporal y ; n é o número de

¹Para essa aplicação não foi considerado o ruído branco, visto que pretende-se realizar uma predição ideal do sinal, isso é, sem ruídos na estimativa

passos à frente²; $\hat{\mathbf{B}}[k]$ é a k -ésima amostra da matriz de predição do modelo AR; e $\hat{\mathbf{Y}}[k]$ é a k -ésima amostra da matriz de precursores dado y .

Note que a matriz $\hat{\mathbf{Y}}[k]$ é composta pelos valores amostrados y , e seus valores estimados \hat{y} . Ou seja, para calcular o valor de $\hat{y}[k+2]$ é necessário calcular o valor de $\hat{y}[k+1]$, no caso de estimativas passos à frente.

Na aplicação em questão, é possível calcular o valor ideal para n por meio da equação 4.5, pois equivale ao tempo médio que o disjuntor leva para realizar o efetivo fechamento, contado a partir do comando de fechamento.

$$n = (T_{bc} + 1/f)F_s \quad (4.5)$$

onde T_{bc} é o tempo estimado de fechamento do disjuntor, f é a frequência nominal do sistema (normalmente 60 Hz para o sistema elétrico brasileiro) e F_s é a frequência de amostragem do sistema.

Note que foi adicionado o tempo de um período de um ciclo do sinal fundamental (ou seja, $1/f$) no cálculo da previsão do sinal. Isso é necessário para compensar os atrasos introduzidos pelos janelamentos utilizados nos cálculos de valor eficaz, fase e outros parâmetros (como, por exemplo, os algoritmos de TDF com janelas de um ciclo da frequência fundamental). Em outras palavras, os valores calculados por janelamento no instante k correspondem ao estado do sistema no instante $k - \frac{F_s}{f}$. Dessa forma, obtêm-se estimativas mais precisas do estado real do sistema.

Em um processo dinâmico, a cada nova amostra do sinal $y[k]$, calcula-se a matriz de coeficientes AR, $\phi[k]$, (apresentada na equação 4.3). Dado $\phi[k]$, calcula-se a predição do sinal n passos à frente conforme a equação 4.4. Ao final da predição AR tem-se uma matriz com as amostras futuras de y , \hat{y} , dado as amostras anteriores a k .

Conforme apresentado na Figura 4.1, nesta aplicação, são obtidos dois modelos AR, um para a tensão v_b e outro para v_r . Isso significa que os valores de y assumem os valores da tensão nos seus respectivos modelos AR para estimar os valores \hat{v}_b e \hat{v}_r . De forma semelhante, são obtidas duas matrizes de coeficientes $\phi[k]$, no instante k , sendo elas $\phi_b[k]$ e $\phi_r[k]$, correspondentes a cada uma das tensões mencionadas. Em seguida, são obtidas respectivamente duas matrizes de predição $\hat{\mathbf{B}}_b[k]$ e $\hat{\mathbf{B}}_r[k]$, n passos à frente.

²Embora a variável m da equação 4.2 ser equivalente a n , essa não foi reutilizada neste contexto, pois uma equação trata de estimativas dos estados passados e outra dos estados futuros.

4.1.3 Cálculo das grandezas elétricas

Nesta etapa, são selecionadas as amostras a partir de $k + T_{bc}F_s + 1$ até $k + n$ das matrizes de predição $\hat{\mathbf{B}}_b[k]$ e $\hat{\mathbf{B}}_r[k]$, correspondendo ao último ciclo de frequência f do sinal predito.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_r[k + T_{bc}F_s + 1] \\ \hat{v}_r[k + T_{bc}F_s + 2] \\ \vdots \\ \hat{v}_r[k + n] \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{B}}_r[k]} \quad e \quad \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_b[k + T_{bc}F_s + 1] \\ \hat{v}_b[k + T_{bc}F_s + 2] \\ \vdots \\ \hat{v}_b[k + n] \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{B}}_b[k]} \quad (4.6)$$

A partir das amostras preditas das matrizes $\hat{\mathbf{B}}_b[k]$ e $\hat{\mathbf{B}}_r[k]$, são calculadas as grandezas elétricas estimadas³: diferença de fase ($\hat{\theta}_{fase}$), amplitude da tensão na barra ($\hat{\theta}_{amp}$) e taxa V/f ($\hat{\theta}_{vf}$). Além disso, é armazenado o instante amostral em que é recebido o *trip* do disjuntor da fonte principal, k_{trip} .

4.1.4 Verificação dos critérios

Nesta etapa, é realizada a verificação dos critérios que permitem o envio do comando de fechamento do disjuntor. Os critérios são semelhantes aos adotados nos sistemas de TRBC. No entanto, os critérios são aplicados às grandezas estimadas por meio do modelo AR ($\hat{\theta}_{fase}$, $\hat{\theta}_{amp}$, $\hat{\theta}_{vf}$). Desse modo, os limites de cada grandeza podem ser mais restritos visto que se procura por um ponto ótimo para realização da TRB. Para essa aplicação os critérios adotados são:

- $\hat{\theta}_{vf} < th_{vf}$ - essa condição deve ser atendida para garantir que a transferência ocorra com taxa V/f menor que o limite th_{vf} ;
- $|\hat{\theta}_{fase}| < th_{fase}$ - essa condição deve ser atendida para garantir que a transferência ocorra com diferença de fase menor que o limite th_{fase} ;
- $\hat{\theta}_{amp} > th_{amp}$ - essa condição deve ser atendida para garantir que a transferência ocorra com amplitude de tensão maior que o limite e th_{fase} ;
- $k > k_{trip} + k_{estab}$ e $k < k + 10\frac{F_s}{f}$ - essa condição deve ser atendida para limitar o tempo máximo de duração da transferência em 10 ciclos da componente fundamental, f , e adicionar k_{estab} amostras para estabilização do modelo AR após o *trip*.

³Cabe ressaltar que as variáveis calculadas ($\hat{\theta}_{fase}$, $\hat{\theta}_{amp}$ e $\hat{\theta}_{vf}$) são previsões do estado do sistema em T_{bc} a frente.

Caso esses critérios sejam atendidos, é enviado um comando de fechamento para o disjuntor a fim de realizar a TRBP. Caso contrário, uma nova amostra de v_b e v_r é recebida para se calcular uma próxima previsão para o passo de tempo $k = k + 1$, conforme apresentado na Figura 4.1.

4.2 Novo critério de transferência rápida de barras com previsão

Os sistemas mais comuns de sincronismo regular de fontes consideram quatro critérios básicos: sequência de fase, diferença de amplitude de tensão, diferença de fase entre as fontes e frequência nominal. Observa-se que o sincronismo entre fontes visa alcançar certo nível de semelhança entre os sinais de tensão das fontes. Esse fato sugere que, quanto mais próximos estiverem os sinais de tensão, menos transitórios ocorrerão no sistema. Portanto, o critério proposto neste capítulo para o NTRB busca uma métrica de semelhança entre as tensões da barra e da fonte reserva.

Assim como o TRBP, este método também realiza a previsão de v_b e v_r para verificar os critérios com antecedência, garantindo que sejam atendidos no momento do fechamento do disjuntor. Para o caso da NTRB, utilizou-se a Raiz do Erro Quadrático Médio (do inglês: *root-mean-square error* - RMSE) como o critério para avaliar a semelhança entre os sinais de tensão [45]. O RMSE foi escolhido devido à sua facilidade de implementação e sua proximidade com o algoritmo de valor eficaz presente nos IEDs comercializados. As etapas de implementação desta metodologia são descritas conforme ilustrados na Figura 4.1.

4.2.1 Raiz do erro quadrático médio

O RMSE é uma medida frequentemente usada para quantificar a diferença entre sinais estimados por um modelo e valores observados. O RMSE representa a média quadrática da diferença de duas variáveis, conforme apresentado em [46, 47]:

$$o_{rms}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k (v_r[i] - v_b[i])^2} \quad (4.7)$$

onde $v_r[i]$ é a i -ésima amostra de tensão da fonte reserva; $v_b[i]$ é a i -ésima amostra de tensão da barra; N é a janela de média do RMSE; e $o_{rms}[k]$ é a k -ésima amostra do RMSE calculado.

É possível observar que o o_{rms} é sempre um valor positivo e o quão mais próximo estiver de 0, maior será a semelhança entre os sinais $v_r[i]$ e $v_b[i]$.

Para o caso de um sinal senoidal de média zero, N é dado pela seguinte equação:

$$N = \frac{F_s}{2f} \quad (4.8)$$

onde, F_s é a frequência de amostragem e f é a frequência fundamental do sistema.

O NTRB visa encontrar o ponto mínimo do valor RMSE predito e enviar o comando com antecedência necessária para ser realizado o fechamento do disjuntor da fonte reserva no RMSE mínimo estimado. As etapas de implementação desta metodologia estão descritas conforme apresentado na Figura 4.1.

4.2.2 Predição auto-regressiva

A etapa de predição AR n passos à frente para o método do NTRB é idêntica à apresentada para o método de TRBP na Seção 4.1.1.

4.2.3 Cálculo das grandezas elétricas

Nesta etapa, por meio das matrizes de predição $\hat{\mathbf{B}}_b[k]$ e $\hat{\mathbf{B}}_r[k]$, calcula-se a estimativa do RMSE ($\hat{\sigma}_{rms}$) dada a equação 4.7 e, ao final, tem-se a matriz de RMSE:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{rms}[k+1] \\ \hat{\sigma}_{rms}[k+2] \\ \vdots \\ \hat{\sigma}_{rms}[k+n] \end{bmatrix}}_{\widehat{\mathbf{RMSE}}[k]} \quad (4.9)$$

A partir da matriz $\widehat{\mathbf{RMSE}}[k]$, calcula-se o ponto mínimo da matriz $\widehat{\mathbf{RMSE}}_{min}$, bem como a amostra correspondente ao ponto mínimo k_{min} , conforme:

$$\widehat{\mathbf{RMSE}}_{min} = \hat{\sigma}_{rms}[k_{min}] = \min(\widehat{\mathbf{RMSE}}[k]) \quad (4.10)$$

Além disso, é armazenado o instante amostral em que é recebido o comando de *trip* do disjuntor da fonte principal, k_{trip} .

4.2.4 Verificação dos critérios

A verificação dos critérios é dividida em duas etapas: critérios de ponto mínimo e critério de *time out*.

Os critérios de ponto mínimo são:

- $\widehat{RMSE}_{min} < th_{RMSE}$ - valor mínimo do RMSE predito menor que o limite RMSE pré-determinado;
- $k_{min} \leq k + T_{bc} \frac{F_s}{f}$ - ponto mínimo coincide ou é menor que o tempo de fechamento do disjuntor;
- $k > k_{trip} + k_{estab}$ e $k < k + 10 \frac{F_s}{f}$ - limita o tempo máximo de duração da transferência (10 ciclos de f) e adiciona k_{estab} amostras de atraso para inicializar a atuação do método devido ao tempo necessário para estabilização do modelo AR após o trip.

Os critérios de *time out* são:

- $k > k_{trip} + k_{estab}$ e $k < k + 10 \frac{F_s}{f}$ - tempo máximo de duração da transferência (10 ciclos de f);
- $k_{min} > k + 10 \frac{F_s}{f}$ - ponto mínimo fora da duração do tempo de transferência (10 ciclos de f);
- $\hat{o}_{rms}[k + T_{bc} \frac{F_s}{f}] < th_{RMSE}$ - valor de RMSE no fechamento do disjuntor menor que o limite RMSE pré-determinado.

O atendimento de qualquer um dos dois critérios implica o envio do comando de fechamento para o disjuntor da fonte reserva.

Neste capítulo apresentou-se duas propostas apresentadas para TRB utiliza predição Auto-Regressiva (AR) para prever os sinais de tensão n passos à frente determinado pelo tempo de fechamento do disjuntor. A TRBP utiliza critérios semelhantes aos aplicados na literatura, já NTRB utiliza um critério considerando RMSE.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentadas análises dos resultados dos métodos propostos no Capítulo 4 quando submetidos a casos de simulações em sistemas elétricos com diferentes características de inércia. O presente capítulo foi organizado progressivamente, de acordo com o desenvolvimento das metodologias, seguindo as seguintes seções:

- *Descrição do sistema elétrico simulado*: descreve os detalhes de simulação dos sistemas elétricos simulados e do IED utilizado para TRB;
- *Transitórios eletromagnéticos na comutação rápida de fontes de energia*: analisa a Transferência Rápida de Barra não Supervisionada (TRBS) no intuito de verificar os transitórios eletromagnéticos durante a TRB quando submetida a situações desafiadoras. Os resultados obtidos fornecem uma base para determinar os limites dos critérios dos métodos propostos;
- *Análise do método de transferência rápida de barras convencional*: analisa o método TRBC, apresentando os resultados para os diversos casos de simulação e uma observação dos seus pontos críticos;
- *Resultados do método de transferência rápida de barras com predição*: apresenta os ajustes e os resultados do método de TRBP (apresentado na Seção 4.1) considerando o resultado do TRBS e TRBC;
- *Resultados do método do novo critério de transferência rápida de barras com predição (NTRB)*: apresenta os ajustes e resultados do método NTRB (apresentado na Seção 4.2) considerando o resultado do TRBS e TRBC.

5.1 Descrição do sistema elétrico simulado

Para avaliar as metodologias propostas, foram modelados três sistemas elétricos com diferentes características de inércia. Esses sistemas foram submetidos a diversos cenários de simulação, variando as principais condições iniciais para análise das transferências.

Os três sistemas elétricos simulados representam um sistema industrial de 440 V com frequência nominal de 60 Hz. Esses sistemas possuem, cada um, uma carga equivalente e um motor equivalente, conforme sugerido em [11]. As simulações foram realizadas utilizando Matlab/Simulink.

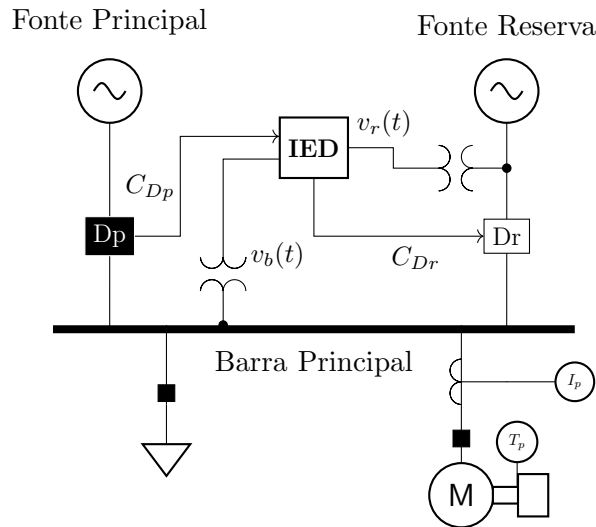


Figura 5.1: Arquitetura dos sistemas elétricos simulados.

Fonte: próprio autor.

A Figura 5.1 apresenta o diagrama unifilar com o arranjo elétrico dos sistemas elétricos simulados. Esse arranjo possui duas fontes de alimentação em corrente alternada. A “Fonte Principal” é normalmente conectada por meio do disjuntor D_p (normalmente fechado) e a “Fonte Reserva” mantém-se em prontidão para assumir as cargas do sistema através do D_r (normalmente aberto). O IED de transferência monitora a tensão da “Barra Principal”, v_b , e a tensão da “Fonte reserva”, v_r . Além disso, comanda o fechamento do disjuntor D_r por do sinal C_{Dr} e recebe o estado disjuntor D_p ¹ por meio do sinal C_{Dp} .

Os sistemas simulados diferem por sua característica de inércia com valores sugeridos pelo *J9 IEEE Working Group* [11] e [12], conforme apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características de inércia dos sistemas simulados.

Sistema	Decaimento de frequência
Baixa inércia	31 Hz/s
Média inércia	20 Hz/s
Alta inércia	8,33 Hz/s

Fonte: referências [11] e [12].

¹a abertura do disjuntor D_p é realizada por sua própria proteção interna ou por intervenção do operador

A inércia do sistema é um fator importante em sistemas de TRB, pois é ela que determina a velocidade com que a frequência da barra principal irá diminuir ao ser desconectada da fonte principal. Isso, conseqüentemente, modifica as dinâmicas de amplitude e fase do sistema.

5.1.1 Modelagem das cargas e motores

Para obter as características de inércia desse sistema, utilizou-se uma carga de 16 kW e um motor de indução equivalente com as seguintes características:

Tabela 5.2: Características do motor.

Dados	Valor
Potência no eixo	100 hp
Rotação nominal	1760 rpm
Corrente de partida I_p/I_n	7, 8
Tensão de operação	440 V
Corrente nominal de operação	97 A
Momento de inércia rotacional	10 kg.m ²

Fonte: próprio autor.

Os valores de momento de inércia foram modificados arbitrariamente para simular as inércias apresentadas na Tabela 5.1.

5.1.2 Modelagem do disjuntor

Para simular o comportamento dos disjuntores no processo de TRBS, considerou-se um tempo de fechamento de 50 ms (ou 3 ciclos), compatível com o encontrado em catálogos de fabricante apresentado em [48].

5.1.3 Modelagem do dispositivo eletrônico inteligente

A modelagem do IED difere para cada aplicação das metodologias, porém segue a arquitetura ilustrada na Figura 5.2². Essa figura apresenta o IED simulado e seus três blocos principais, amostragem do sinal, cálculos das grandezas elétricas e verificação dos critérios. Para esse estudo, utiliza-se a transferência rápida no modo sequencial, ou seja, aquela que requer um sinal de confirmação de abertura do disjuntor da fonte principal para iniciar a transferência.

²Os aspectos particulares para cada um dos métodos são apresentados ao longo deste capítulo.

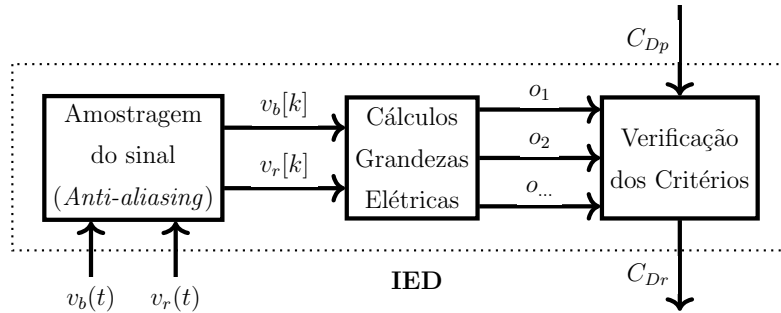


Figura 5.2: Diagrama de Blocos do IED simulado.

Fonte: próprio autor.

5.1.3.1 Amostragem do sinal

Para tal transferência, o IED monitora a tensão da fase A: $v_b(t)$ e $v_r(t)$, conforme apresentado na Figura 5.1. Esses sinais são submetidos a um filtro³ para evitar o recobrimento do sinal (filtro *anti-aliasing*) e amostrados com frequência de 1920 Hz, equivalente a 32 amostras por ciclo de 60 Hz, resultando nos respectivos sinais discretos $v_b[k]$ e $v_r[k]$.

5.1.3.2 Grandezas elétricas calculadas

Por meio dos sinais discretos $v_b[k]$ e $v_r[k]$, o IED calcula algumas grandezas elétricas que variam de acordo com cada um dos métodos, representados no diagrama da Figura 5.2 (o_1 , o_2 e ...).

5.1.3.3 Verificação dos critérios

A confirmação da abertura do disjuntor (C_{Dp}) é recebida pelo IED e as grandezas calculadas são utilizadas para balizar a decisão que permite o envio do comando de fechamento para o disjuntor da fonte reserva (C_{Dr}). Tal verificação varia conforme a aplicação de cada método.

5.1.4 Variáveis monitoradas

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos métodos, foram monitoradas as seguintes grandezas após realização da transferência:

- a) Corrente de pico (I_p): o módulo da corrente máxima desenvolvida nos terminais do motor após o fechamento do disjuntor da fonte reserva;

³Filtro *Butterworth* de ordem 3 e frequência de corte 180 Hz

- b) Torque pico a pico (T_p): a diferença entre o pico positivo e o pico negativo de torque desenvolvido no motor após o fechamento do disjuntor da fonte reserva, conforme sugerido em [38].

Essas variáveis são monitoradas somente nos casos em que a transferência tenha sido efetuada⁴, ou seja, quando a manobra de transferência for executada e o disjuntor da fonte reserva for efetivamente fechado.

5.2 Transitórios eletromagnéticos na comutação rápida de fontes de energia

Esta seção é uma abordagem inicial para compreender os transitórios eletromagnéticos na comutação de fontes de energia. Essa abordagem analisa casos de simulação submetidos à TRBS, ou seja, as transferências são realizadas arbitrariamente, sem monitorar critérios. Além disso, analisam-se as variáveis comumente monitoradas na TRBC, permitindo verificar a robustez dos critérios adotados, bem como identificar os pontos que requerem aprimoramento. A análise de resultados aqui apresentada tem como objetivo construir os ajustes e os critérios para os métodos propostos neste trabalho.

5.2.1 Grandezas elétricas calculadas

Por meio dos sinais discretos $v_b[k]$ e $v_r[k]$, representados no diagrama da Figura 5.2, o IED processa e calcula as grandezas: 1) o_{vf} , a taxa V/f entre a barra dos motores e a fonte reserva, apresentado na equação 2.1; 2) o_{fase} , a diferença de fase entre as duas tensões; e 3) o_{amp} , o módulo da tensão na barra dos motores.

5.2.2 Verificação dos critérios

No caso da TRBS, o comando de fechamento é enviado sem supervisão do IED, com o propósito de submeter os sistemas a situações de estresse e verificar os efeitos transitórios eletromagnéticos após a transferência de energia.

⁴A palavra “efetuada” foi selecionada nesse contexto, pois não se pressupõe que a transferência tenha sido bem-sucedida em todos os casos em que ocorreu a manobra de transferência. Em outras palavras, mesmo que os critérios tenham sido atendidos, isso não implica necessariamente que a transferência não tenha causado danos ao sistema. No Capítulo 6, é realizada uma análise dos casos em que a transferência foi bem-sucedida.

5.2.3 Casos simulados

Simularam-se casos para cada um dos sistemas industriais (de baixa, média e alta inércia) variando-se as seguintes condições iniciais de simulação:

- O ângulo da fonte reserva, ϕ_R , de -180° a 180° com intervalos⁵ de 10° ;
- A potência da carga conectada à barra de motores, P_c , de 75% e 100% do valor nominal;
- Tempo de envio de comando de fechamento do disjuntor ($t_{Comando}$) de 0,5 a 10 ciclos de 60 Hz, com intervalos de 0,5 ciclos, ou seja, a partir do *trip* da fonte principal, o disjuntor é fechado com intervalos de 8,33 ms (sem verificação dos critérios).

Deste modo, foram realizadas todas as combinações desses parâmetros, totalizando 4320 simulações.

5.2.4 Resultados de simulação

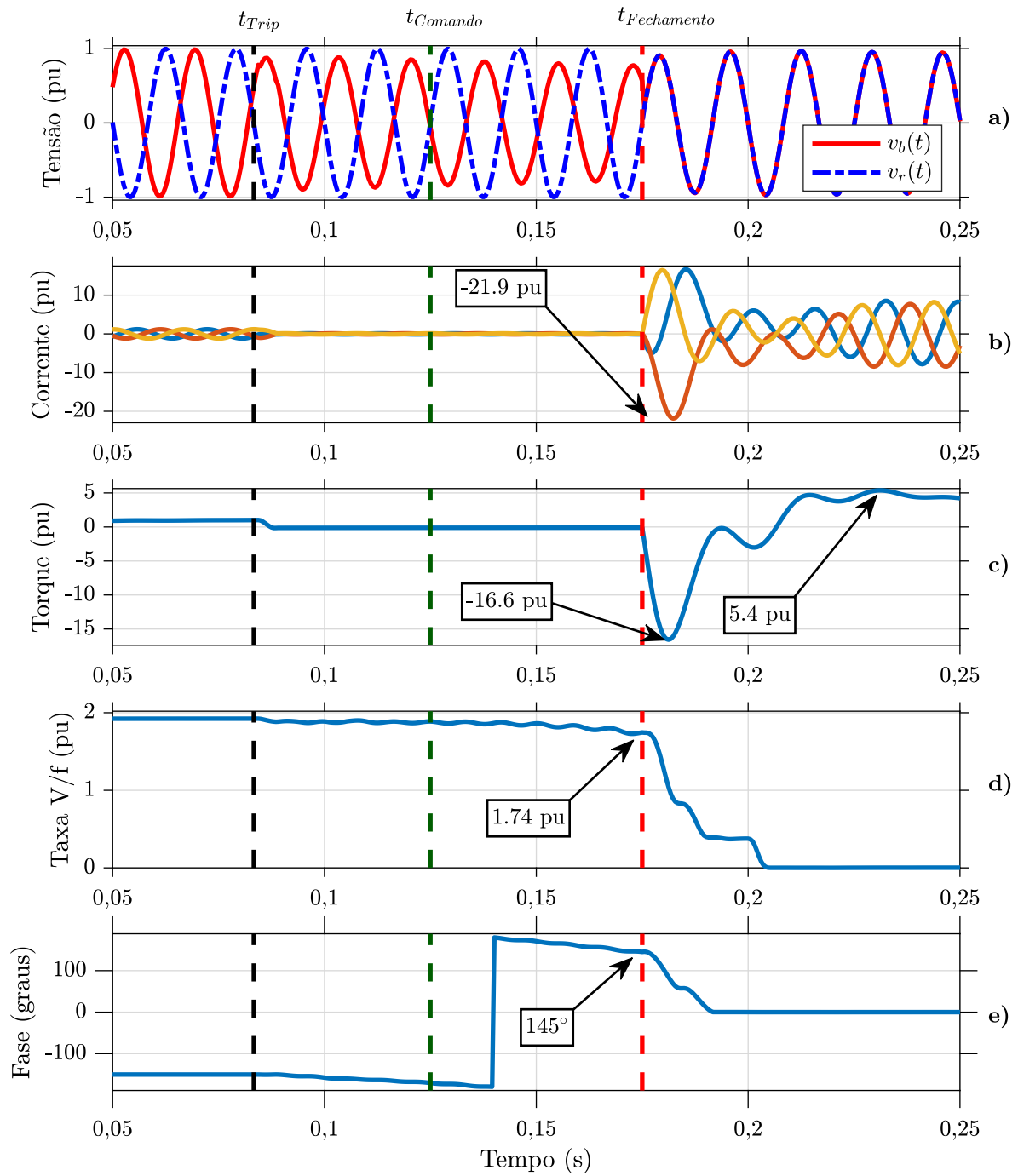
Nesta seção apresenta-se uma análise dos casos de simulação da TRBS. Para tal, verificou-se a relação entre as variáveis comumente calculadas pelos dispositivos de TRBC e as variáveis monitoradas (I_p e T_p). Além disso, um exemplo de caso de transferência é apresentado em detalhes.

5.2.4.1 Exemplo de aplicação

A seguir apresenta-se um caso exemplo de TRBS no sistema de baixa inércia. Esse caso possui as condições iniciais: $\phi_R = 150^\circ$, $P_c = 100\%$ e $t_{Comando} = 125$ ms. A Figura 5.3 apresenta os v_b , corrente no motor, torque no motor, o_{vf} e o_{fase} .

Na Figura 5.3, o *trip* da fonte principal ocorre em $t_{Trip} = 83$ ms e o comando de fechamento ocorre no instante $t_{Comando} = 125$ ms. No momento em que ocorre o fechamento do disjuntor ($t_{Fechamento}$), nota-se que $o_{vf} = 1,74$ pu (distante da faixa determinada pelos critérios da TRBC, taxa $V/f = 1,33$ pu). A diferença angular o_{fase} ultrapassa o valor máximo permitido de 90° (observado em [22]) ou de 20° (para sincronismo regular em [23]), atingindo 145° . Imediatamente após o fechamento do disjuntor, I_p atinge valor de $-21,9$ pu e o torque pico a pico desenvolvido chegando até 22 pu.

⁵Para os casos simulados, adotou-se como referência de ângulo a fonte principal.



a) tensão na barra (v_b) e na fonte reserva (v_r); b) corrente no motor; c) torque no motor; d) v/f ; e) diferença de fase entre a fonte reserva e tensão na barra (θ_{fase}).

Figura 5.3: Exemplo de uma TRB efetuada.

Fonte: próprio autor.

5.2.4.2 Resultados dos casos simulados

Nesta seção analisa-se a relação entre as variáveis calculadas e I_p e T_p dos casos simulados de TRBS. Cabe ressaltar que as medidas das variáveis monitoradas são apresentadas no instante em que ocorre o fechamento do disjuntor, visto que no instante do atendimento do critério as análises são triviais e não contribuem para o desenvolvimento do trabalho. As medidas da I_p e T_p são realizadas logo após o fechamento do disjuntor e as medidas de ângulo estão em módulo. A Figura 5.4 apresenta a relação entre T_p e o_{vf} , dentre os casos simulados.

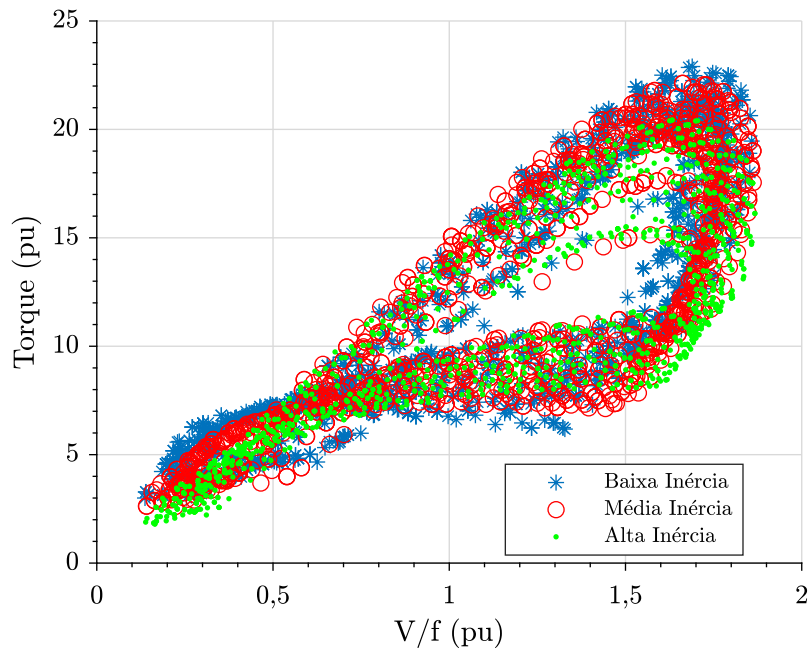


Figura 5.4: Relação entre a taxa V/f e o torque transitório - TRBS.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.4 que um T_p máximo é de 22,9 pu com $o_{vf} = 1,69$ pu. Além disso, nota-se que existe uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e T_p , na região entre 0 a 0,65 pu da taxa V/f , independente da inércia do sistema.

A Figura 5.5 apresenta a relação entre T_p e o_{fase} , dentre os casos simulados.

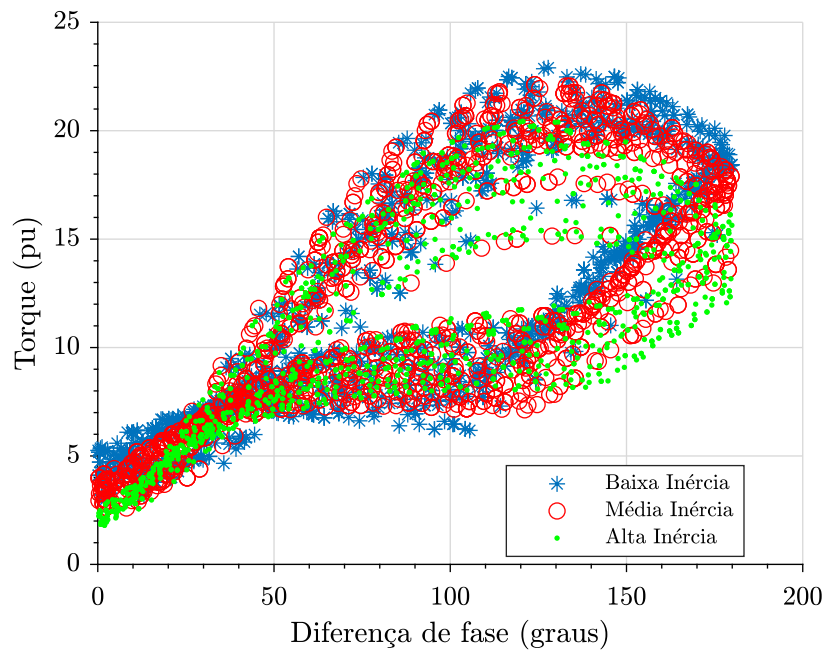


Figura 5.5: Relação entre o módulo da diferença de fase e o torque transitório - TRBS.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.5 que existe uma relação aproximadamente linear entre θ_{fase} e T_p , na região entre 0° e 50° de θ_{fase} , independente da inércia do sistema. Além disso, o valor máximo de T_p ocorre no ângulo de 128° . Esse fato se aproxima da afirmação do artigo [31] em que o pico de torque ocorre com θ_{fase} próximo de 120° .

A Figura 5.6 apresenta a relação entre I_p e θ_{vf} , dentre os casos simulados.

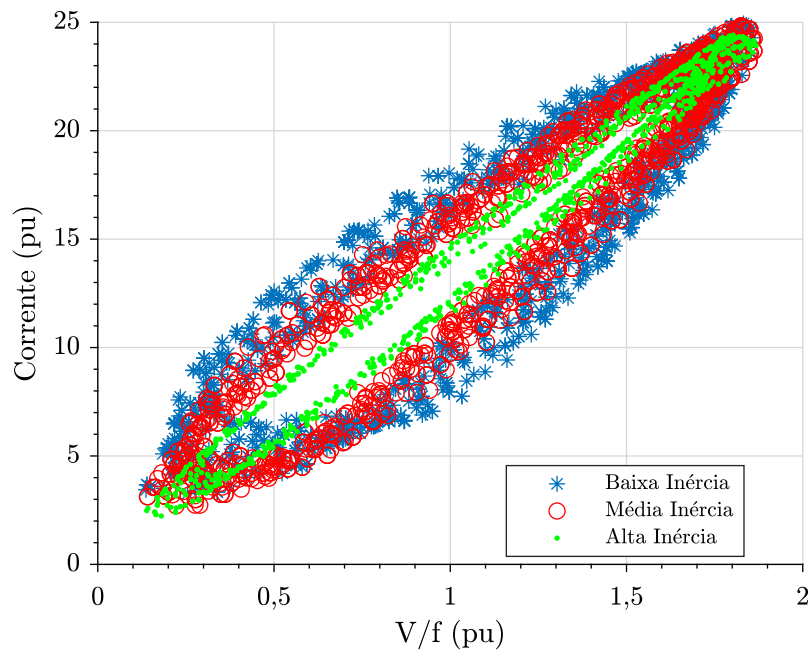


Figura 5.6: Relação entre a taxa V/f e a corrente de pico - TRBS.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.6 que I_p obtida dentre os casos simulados foi de 24,95 pu com $o_{vf} = 1,86$ pu. Nota-se, também, que existe uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e I_p , independente da inércia do sistema.

A Figura 5.7 apresenta a relação entre I_p e $o_{f_{ase}}$, dentre os casos simulados.

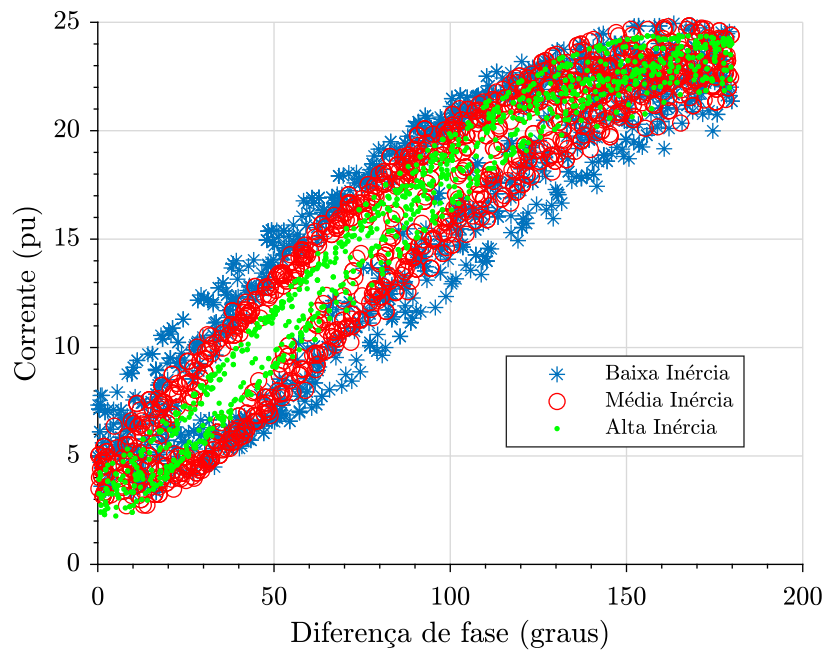


Figura 5.7: Relação entre o módulo da diferença de fase e a corrente de pico - TRBS.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.7 que existe uma relação aproximadamente linear entre θ_{fase} e I_p , independente da inércia do sistema.

A Figura 5.8 apresenta a relação entre as duas variáveis calculadas no instante do fechamento do disjuntor da fonte reserva, θ_{vf} e θ_{fase} .

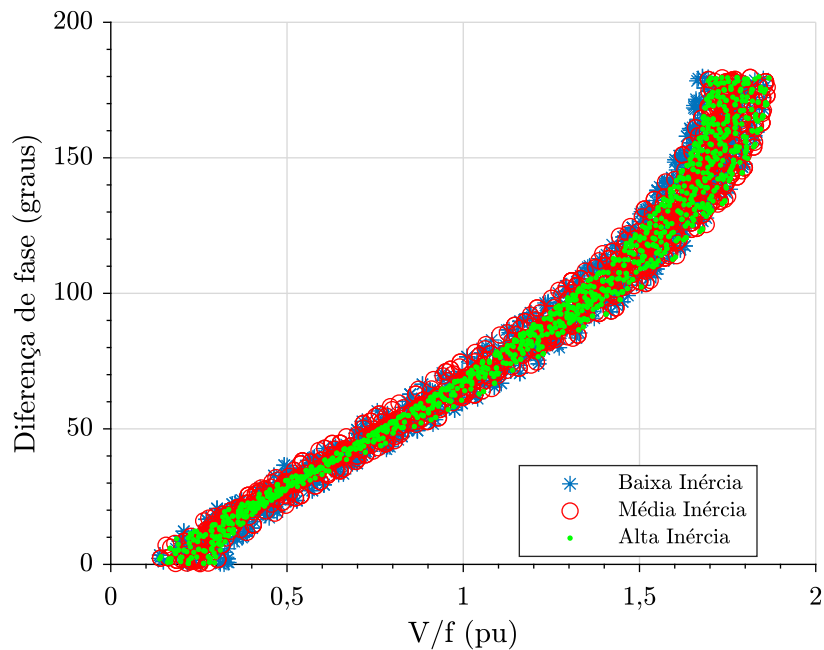


Figura 5.8: Relação entre a taxa V/f e a módulo da diferença de fase - TRBS.

Fonte: próprio autor.

Nota-se na Figura 5.8 que existe uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e o_{fase} , independente da inércia do sistema. Essa proporcionalidade entre as variáveis é claramente ilustrada na Figura 2.3 e equação 2.1. Deste modo pode-se notar, antecipadamente, que apenas a limitação de uma das variáveis monitoradas, já seria suficiente para a aplicação na TRB, visto que, por exemplo, limitar a diferença de fase garante uma limitação na taxa V/f .

A Figura 5.9 apresenta I_p e T_p desenvolvido após o fechamento do disjuntor, dentre os casos simulados.

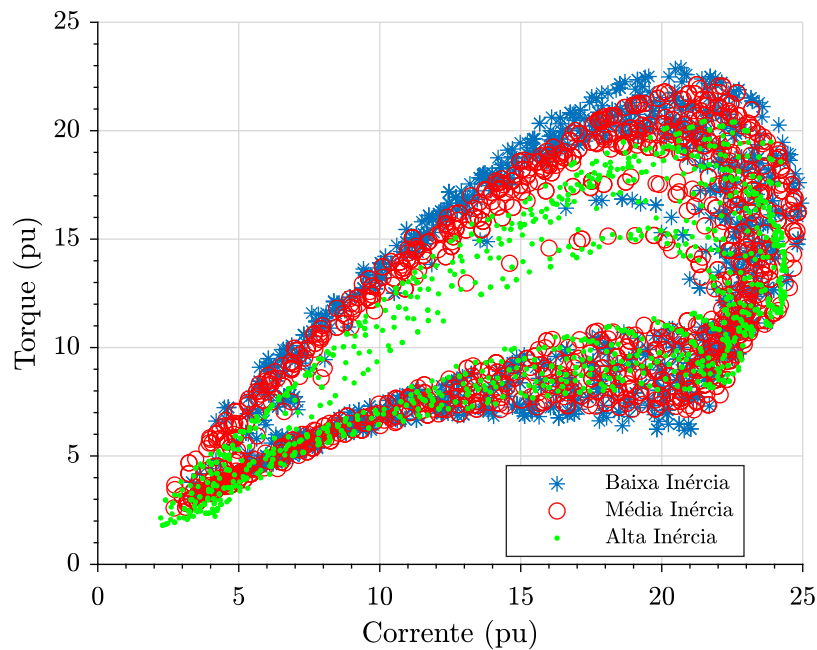


Figura 5.9: Relação entre a corrente e o toque transitório - TRBS.

Fonte: próprio autor.

Na Figura 5.9, observa-se que é possível determinar uma região em que uma limitação de I_p , limite também T_p máximo. Deste modo pode-se desenvolver um critério mais simples associado à Figura 5.8.

5.2.4.3 Resumo dos resultados por inércia do sistema

A Tabela 5.3 apresenta um resumo dos resultados dos casos efetuados separados pela inércia do sistema (baixa, média, alta inércia), dentre os 4320 casos simulados apresentados na Seção 5.2.3.

Na Tabela 5.3, nota-se que, dentre os 1440 casos simulados para cada um dos sistemas, o sistema de maior inércia obteve menores T_p (máximos, mínimos e desvio padrão). Deste modo, pode-se afirmar que quanto menor a inércia do sistema, maiores serão os T_p no processo de TRB.

Tabela 5.3: Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - TRBS.

Sistema de baixa inércia - 1440 casos simulados				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	3,26 pu	24,95 pu	15,27 pu	6,28 pu
Torque de pico a pico (T_p)	3,00 pu	22,90 pu	12,02 pu	5,60 pu
Sistema de média inércia - 1440 casos simulados				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	2,70 pu	24,83 pu	15,53 pu	6,58 pu
Torque de pico a pico (T_p)	2,54 pu	22,12 pu	11,93 pu	5,40 pu
Sistema de alta inércia - 1440 casos simulados				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	2,19 pu	24,41 pu	15,40 pu	6,84 pu
Torque de pico a pico (T_p)	1,80 pu	20,43 pu	10,84 pu	4,78 pu

Fonte: próprio autor.

5.2.5 Considerações sobre a transferência rápida de barra não supervisionada

Esta seção apreseta uma análise da TRBS. Para tal análise utilizou-se de simulações de sistema de baixa, média e alta inércia para verificar os pontos críticos dos transitórios eletromagnéticos na TRBS.

Nos resultados globais da TRBS, notou-se que o sistema de maior inércia obteve menores torques (máximos, mínimos e desvio padrão). Deste modo, pode-se afirmar que, quanto menor a inércia do sistema, maiores as chances de surgirem elevados torques e correntes no processo de TRB.

Visto os dados apresentados, sugere-se que sejam realizados estudos específicos para cada sistema em que for implementada a TRB, de modo a definir critérios mais apropriados para cada um, conforme orientado em [15]. Em seguida, pode-se destacar que os cálculos realizados para se obter o_{vf} e o_{fase} podem não ser precisos o suficiente, pois a TDF não está preparada para cálculos de fase de sinais em decaimento de frequência, bem como cálculos de frequência desses mesmos sinais. Neste sentido

Ao longo da apresentação dos resultados de TRBS, notou-se que I_p é proporcional tanto à o_{vf} quanto à o_{fase} . Por outro lado, o T_p apresenta regiões em que é proporcional à taxa V/f

($o_{vf} < 0,65pu$) bem como à diferença de fase ($0^\circ < o_{fase} < 50^\circ$), independente da inércia do sistema em ambos os casos. Além disso, existe uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e o_{fase} ; e entre I_p e T_p . Os fatos apresentados permitem afirmar que, definindo critérios para uma das variáveis calculadas (o_{vf} e o_{fase}), pode-se limitar a corrente e o torque na TRB. No entanto, essa pode não ser uma tarefa fácil, visto que as variáveis analisadas foram monitoradas no instante de fechamento do disjuntor. Já na TRBC os critérios são supervisionados sem considerar o tempo de fechamento do disjuntor.

Por fim, os métodos preditores propostos neste trabalho contribuem com o desenvolvimento de um algoritmo preditor que estime as grandezas calculadas passos à frente em um período maior ou igual ao tempo de fechamento do disjuntor, no intuito de enviar o comando de fechamento do disjuntor com antecedência necessária e evitar transitórios severos. Esses algoritmos são auto-adaptáveis a qualquer sistema, independente da inércia.

5.3 Resultados do método de transferência rápida de barras convencional

Nesta seção, analisam-se casos de simulação de sistemas industriais que dispõem de um sistema de TRB. Esta análise permite verificar o funcionamento dos dispositivos de TRBC disponíveis no mercado, bem como verificar os pontos críticos que requerem aprimoramento.

5.3.1 Grandezas elétricas calculadas

Por meio dos sinais discretos $v_b[k]$ e $v_r[k]$, esses dispositivos processam e calculam as seguintes grandezas: o_{vf} , o_{fase} e o_{amp} . Para cada uma dessas grandezas, são estabelecidas regras que permitem o envio do comando de fechamento para o disjuntor da fonte reserva.

5.3.2 Verificação dos critérios

Implementou-se o algoritmo de TRBC presente no IED modelo SIPROTEC 7VU683 do fabricante Siemens conforme apresentado em [25]. O IED utiliza os seguintes critérios para a realização de transferência rápida:

1. Taxa V/Hz entre a tensão na barra do motor e a tensão da fonte reserva menor que 1,33 pu ($o_{vf} < 1,33$ pu);

2. Diferença de ângulo de fase entre a tensão na barra do motor e a tensão da fonte reserva entre -20° e 20° ($|o_{fase}| < 20^\circ$);
3. Módulo da tensão na barra do motor superior a 0,5 pu ($o_{amp} > 0,5$ pu); e
4. Tempo de transferência máximo de 10 ciclos da frequência nominal do sistema.

Os critérios de transferência são verificados e, caso sejam satisfeitos, um sinal de fechamento (C_{Dr}) é enviado para o disjuntor da fonte reserva Dr (apresentados na Figura 5.1 e Figura 5.2). Cabe ressaltar que esses critérios são verificados anteriormente ao fechamento do disjuntor, isto é, sem qualquer tipo de predição (na Figura 2.2, ocorrem antes de t_B). Mesmo que o disjuntor receba a ordem de fechamento (ou seja, todos os critérios sejam atendidos), isso não garante que no instante de fechamento os critérios continuem sendo atendidos.

5.3.3 Casos simulados

Simularam-se casos para cada um dos sistemas industriais (de baixa, média e alta inércia) variando-se as seguintes condições iniciais de simulação:

- O ângulo da fonte reserva ϕ_R de -180° a 180° com intervalos de 2° ⁶;
- A potência da carga conectada à barra de motores P_c de 75% e 100% do valor nominal;
- Ângulo de abertura do disjuntor da fonte principal ϕ_d de 0° , 45° e 90° .

Deste modo, foram realizadas todas as combinações desses parâmetros, totalizando 3240 simulações.

5.3.4 Resultados de simulação

Esta seção apresenta uma análise dos casos de simulação da TRBC. Para tal, realizou-se uma análise estatística global dos casos, bem como uma análise das I_p e T_p desenvolvido no motor durante o processo de TRBC. Além disso, apresentam-se dois exemplos de casos de TRBC, um efetuada e outro não efetuada.

Dentre os 3240 casos, 1414 casos atenderam aos critérios para realizar a TRBC. Desta forma, as correntes e torques máximos são analisados apenas para os casos em que ocorreu o efetivo fechamento do disjuntor da fonte reserva.

⁶Para os casos simulados, considerou-se como referência de ângulo a fonte principal.

Cabe ressaltar que as medidas das variáveis são apresentadas no instante em que ocorreu o fechamento do disjuntor. No momento em que os critérios são atendidos, as análises são consideradas ideais e não fornecem informações substanciais sobre o estado do sistema no momento do fechamento do disjuntor.

5.3.4.1 Exemplo de transferência efetuada

A seguir apresenta-se um caso exemplo de TRBC em que todos os critérios são atendidos, de forma que a transferência é efetuada. Esse caso possuiu as condições iniciais da Tabela 5.4 para o sistema de baixa inércia. A Figura 5.10 apresenta os v_b , corrente no motor, torque no motor, o_{vf} e o_{fase} para esse caso.

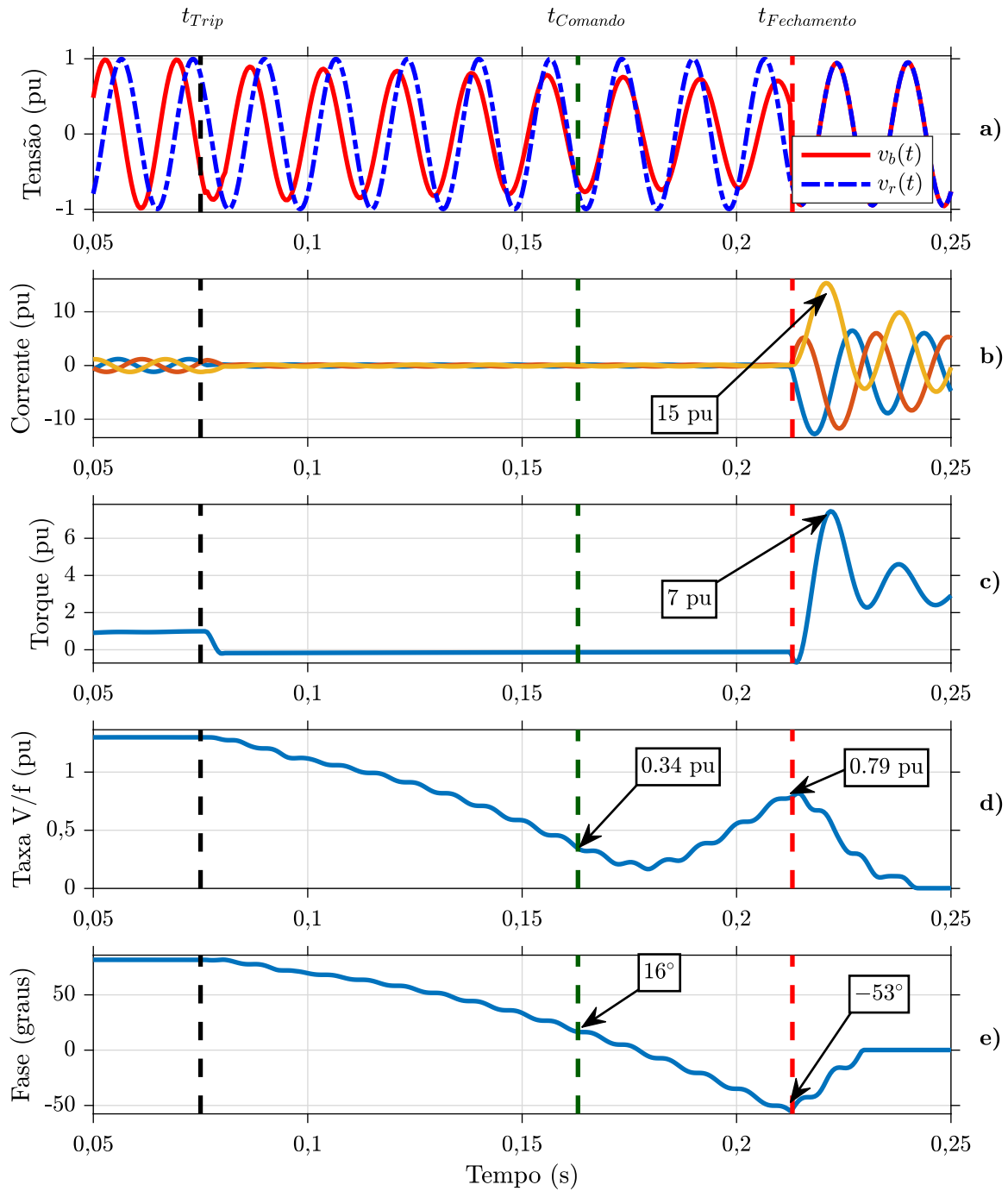
Tabela 5.4: Condições iniciais para um exemplo de uma TRBC efetuada.

Condições iniciais	Descrição	Valor
ϕ_R	Ângulo da fonte reserva	-82°
P_c	Potência da Carga	100%
ϕ_d	Ângulo de abertura	90°

Fonte: próprio autor.

Na Figura 5.10, o *trip* da fonte principal ocorre em $t_{Trip} = 75$ ms. No instante $t_{Comando} = 163$ ms, os critérios de transferência são atendidos com $o_{vf} = 0,34$ pu e $o_{fase} = 16^\circ$. No momento em que ocorre o fechamento do disjuntor ($t_{Fechamento}$) nota-se que o_{vf} (0,79 pu) mantêm-se dentro da faixa determinada pelos critérios da TRBC (taxa V/f < 1,33 pu). No entanto, o_{fase} (-53°) ultrapassa os valores pré-determinados ($|o_{fase}| < 20^\circ$). Imediatamente após o fechamento do disjuntor, I_p atinge valor de 15 pu e, nesse instante, T_p desenvolvido é de 7 pu.

Deste modo, observa-se que apesar dos critérios serem atendidos no momento em que o comando é enviado ($t_{Comando}$), no instante do fechamento efetivo do disjuntor ($t_{Fechamento}$) os critérios já não são mais atendidos.



a) tensão na barra (v_b) e na fonte reserva (v_r); b) corrente no motor; c) torque no motor; d) taxa V/f (σ_{vf}); e) diferença de fase entre a fonte reserva e tensão na barra (σ_{fase}).

Figura 5.10: Exemplo de uma TRBC efetuada.

Fonte: próprio autor.

5.3.4.2 Exemplo de transferência não efetuada

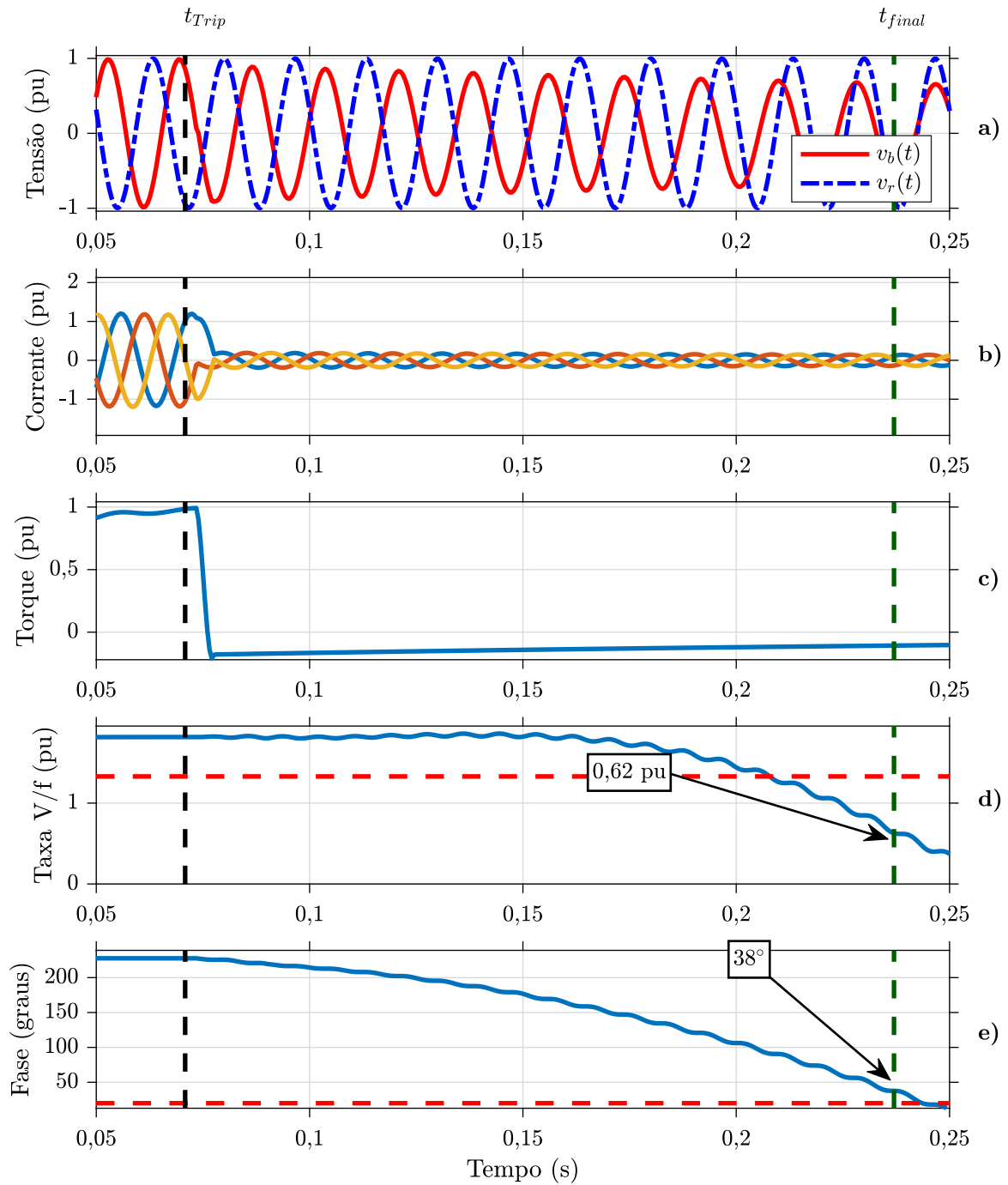
Para este exemplo de TRBC, simulou-se um caso no sistema de baixa inércia em que os critérios da TRBC não foram atendidos, ou seja, não houve o fechamento do disjuntor da fonte reserva. Esse caso possuiu as seguintes condições iniciais:

Tabela 5.5: Condições iniciais do exemplo de uma TRBC não efetuada.

Condições iniciais	Descrição	Valor
ϕ_R	Ângulo da fonte reserva	132°
P_c	Potência da Carga	100%
ϕ_d	Ângulo de abertura	45°

Fonte: próprio autor.

A Figura 5.11 apresenta os v_b , corrente no motor, torque no motor, o_{vf} e o_{fase} . O *trip* da fonte principal ocorre em $t_{Trip} = 71$ ms. No instante $t_{Final} = 273$ ms o algoritmo detecta que o tempo máximo para detectar um ponto para transferência encerrou (ou seja, tempo de transferência maior que 10 ciclos de 60 Hz). Os traços horizontais (tracejados em vermelho) nas figuras d) e e) representam os limites dos critérios da TRBC. Deste modo, entre t_{Trip} e t_{Final} o algoritmo não encontrou um instante em que os todos os critérios fossem atendidos. Os critérios só foram atendidos após o término do limite de tempo da TRBC.



a) tensão na barra (v_b) e na fonte reserva (v_r); b) corrente no motor; c) torque no motor; d) taxa V/f (σ_{vf}); e) diferença de fase entre a fonte reserva e tensão na barra (σ_{fase}).

Figura 5.11: Exemplo de uma TRBC não efetuada.

Fonte: próprio autor.

5.3.4.3 Resultados dos casos efetuados

Nesta seção, analisa-se a relação entre as variáveis calculadas e I_p e T_p nos casos simulados de TRBC nos quais a transferência foi realizada com sucesso.

A Figura 5.12 apresenta a relação entre T_p e o_{vf} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

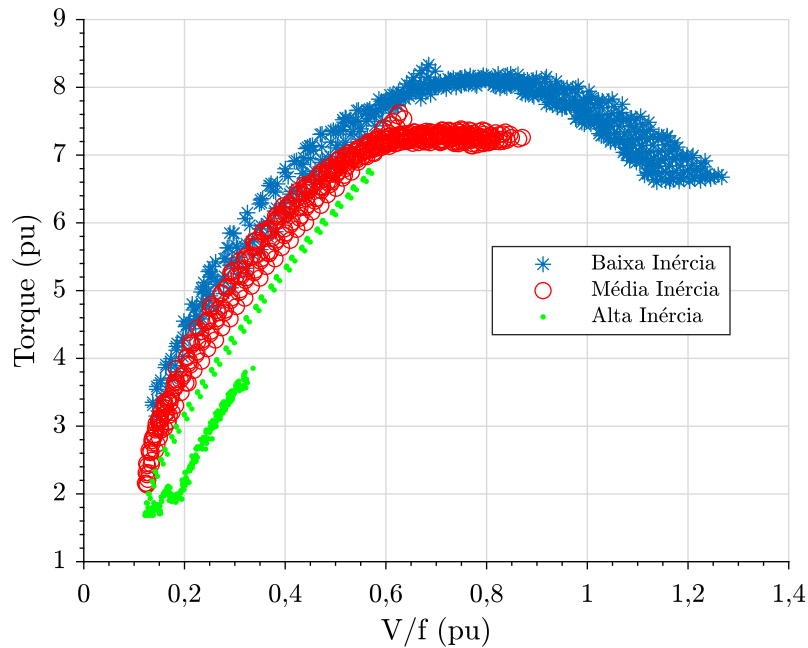


Figura 5.12: Relação entre a taxa V/f e o torque transitório - TRBC.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.12 que nenhum dos casos ultrapassou o limite de 1,33 pu da taxa V/f . No entanto, obteve-se um T_p de 8,33 pu com $o_{vf} = 0,68$ pu. Além disso, nota-se que na região entre 0 a 0,6 pu da taxa V/f , existe uma relação aproximadamente linear entre a taxa V/f e T_p , independente da inércia do sistema.

A Figura 5.13 apresenta a relação entre T_p e o_{fase} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

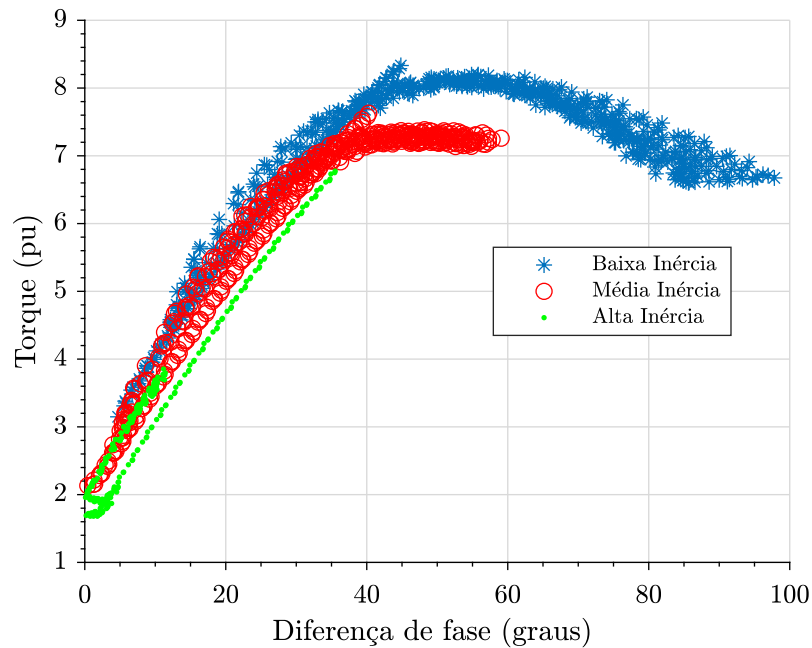


Figura 5.13: Relação entre o módulo da diferença de fase e o torque transitório - TRBC.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.13 que 66% dos casos ultrapassaram o limite de $|o_{fase}| < 20^\circ$ no instante do fechamento do disjuntor. Esse fato ocorre porque, assim que os critérios de TRBC são verificados, um comando de fechamento é enviado ao disjuntor, que por sua vez leva 50 ms para realizar o efetivo fechamento. Nesse tempo, entre o comando e o fechamento do disjuntor, a diferença angular se altera rapidamente, visto que não há fontes ativas conectadas à barra nesse momento.

Ainda, cabe ressaltar que o guia de proteção de motores do IEEE [22] (IEEE Std C37.96-2000 - IEEE Guide for AC Motor Protection) recomenda que o ângulo de fechamento do disjuntor não ultrapasse 90° . No entanto, 20 casos violaram essa recomendação.

Além disso, nota-se que existe uma relação aproximadamente linear entre o_{fase} e T_p , na região entre 0° a 40° de o_{fase} , independente da inércia do sistema.

A Figura 5.14 apresenta a relação entre I_p e o_{vf} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

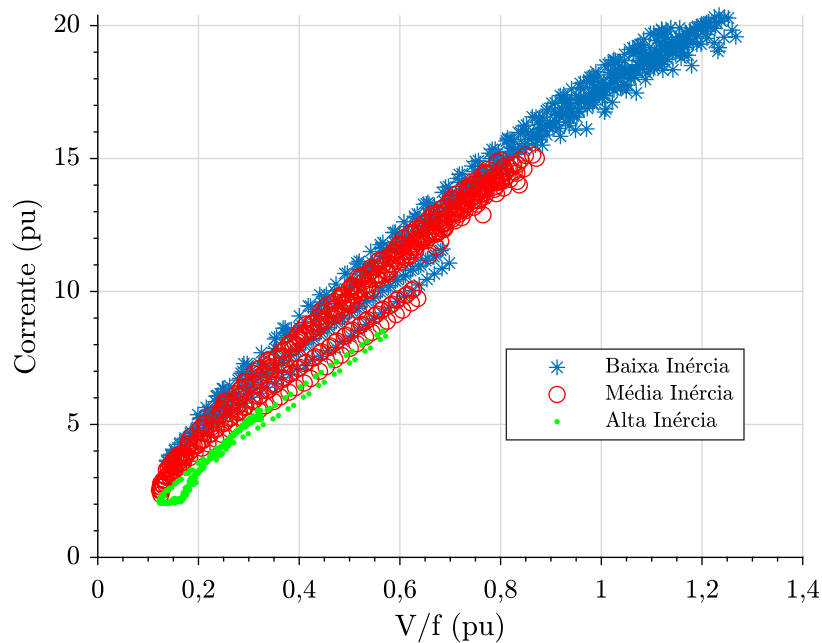


Figura 5.14: Relação entre a taxa V/f e a corrente de pico - TRBC.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.14 que nenhum dos casos ultrapassa o limite de 1,33 pu da taxa V/f . No entanto, obteve-se uma I_p de 20,39 pu com $o_{vf} = 1,23$ pu. Além disso, existe uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e I_p , independente da inércia do sistema.

Conforme mencionado na Seção 3.3, sob condições de rotor bloqueado, a corrente nos enrolamentos é de 4 a 8 vezes a corrente nominal a plena carga [33]. Correntes mantidas nesses valores podem degradar a vida útil do motor. Deste modo, nota-se que I_p máxima é extremamente alta e pode degradar a vida útil dos motores ou até mesmo danificá-los.

A Figura 5.15 apresenta a relação entre I_p e o_{fase} , dentre os casos em que a TRBC foi efetuada.

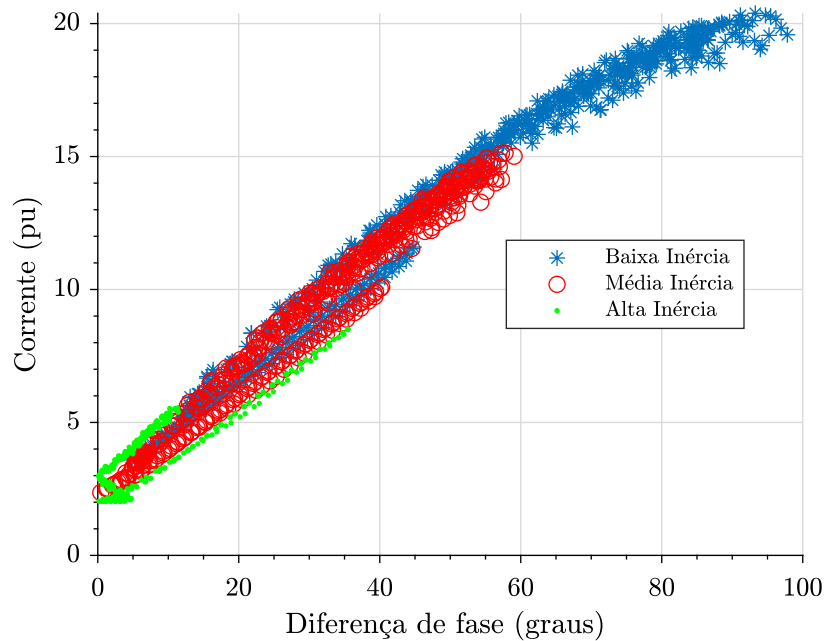


Figura 5.15: Relação entre o módulo da diferença de fase e a corrente de pico - TRBC.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.15, assim como observado na Seção 5.3.4.3, que diversos casos ultrapassaram limite de $|o_{fase}| < 20^\circ$ (Seção 5.1.3) e até mesmo o limite de $|o_{fase}| < 90^\circ$ (IEEE Std C37.96-2000, [22]). Além disso, nota-se que existe uma relação aproximadamente linear entre o_{fase} e a corrente transitória máxima, independente da inércia do sistema.

O ângulo da fonte reserva influencia no tempo de atuação da TRBC, pois, dependendo do ângulo da fonte reserva, o sistema de TRB pode levar mais tempo para encontrar um ponto de atendimento dos critérios. O tempo de atuação é definido como:

$$t_{Atuação} = t_{Comando} - t_{Trip} \quad (5.1)$$

A Figura 5.16 apresenta a relação entre o tempo de atuação ($t_{Atuação}$) e o ângulo da fonte reserva (ϕ_R), dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

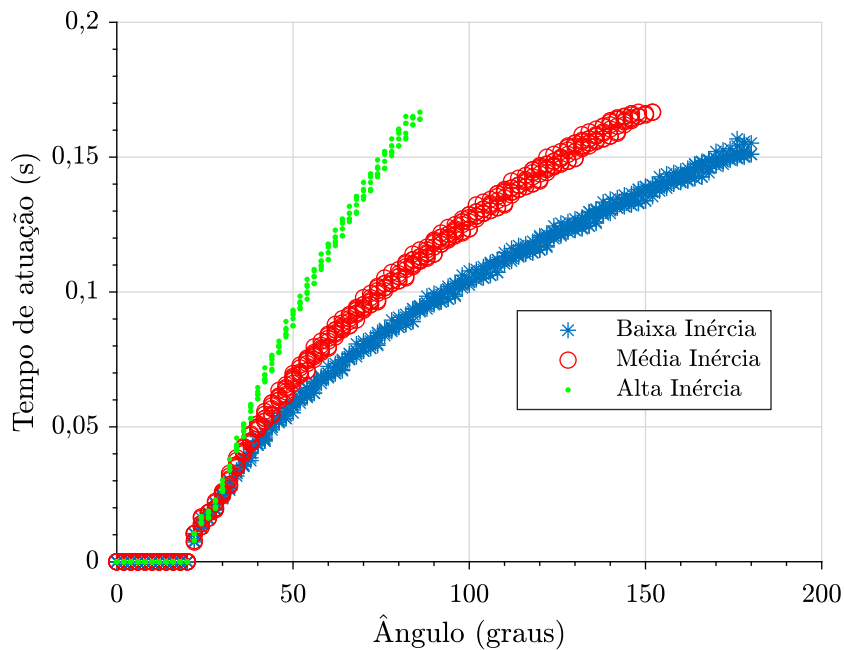


Figura 5.16: Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - TRBC.

Fonte: próprio autor.

Nota-se na Figura 5.16, que a atuação é imediata para ângulos da fonte entre -20° e 20° , visto que o critério de diferença angular e os demais critérios são facilmente atendidos para esse ângulo inicial da fonte reserva. Além disso, para cada sistema (baixa, média, alta inércia) a inclinação da curva de tempo de atuação é diferente. Esse fato ocorre porque, para um mesmo ângulo inicial da fonte reserva, as variações de ângulo da barra são mais rápidas para sistemas de baixa inércia, logo, os critérios são atendidos mais rapidamente para uma mesma diferença de fase inicial.

A Figura 5.17 apresenta a relação das duas variáveis calculadas no instante do fechamento do disjuntor da fonte reserva, o_{vf} e o_{fase} , dentre os casos em que a TRBC foi efetuada.

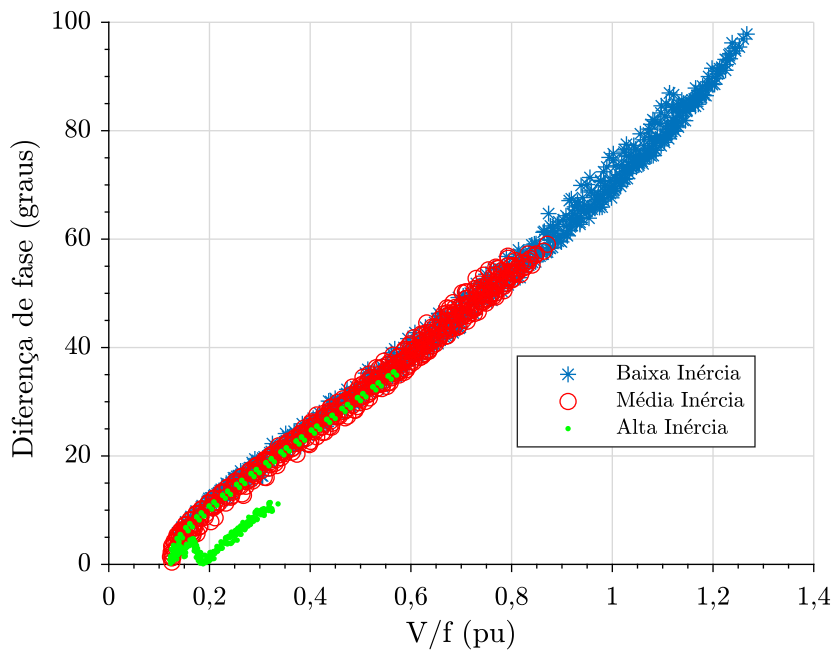


Figura 5.17: Relação entre a taxa V/f e a diferença de fase - TRBC.

Fonte: próprio autor.

Nota-se na Figura 5.17 que existe uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e o_{fase} , independente da inércia do sistema. Essa relação entre as variáveis é claramente ilustrada na Figura 2.3 e equação 2.1.

5.3.4.4 Resumo dos resultados por inércia do sistema

A Tabela 5.6 apresenta um resumo dos resultados dos casos efetuados separados pela inércia do sistema (baixa, média, alta inércia), dentre os 3240 casos simulados apresentados na Seção 5.3.3.

Na Tabela 5.6, nota-se que dentre os 1080 casos simulados para cada um dos sistemas, o sistema de baixa inércia obteve o maior número de casos efetuados, 597 casos. Esse fato ocorre em função do maior decaimento de frequência e fase no barramento de motor, aumentando a chance de encontrar um ponto de atendimento dos critérios. Por esse mesmo fato, o_{fase} tem o maior desvio padrão e valor máximo dentre os sistemas, assim como a taxa V/f . Quanto ao valor de I_p e T_p , o sistema de baixa inércia obteve os maiores valores ultrapassando os limites pré-determinados. O sistema de alta inércia apresentou uma média de o_{fase} de 9° e o_{vf} de 0,26 pu menores que os demais sistemas, e, conseqüentemente, menores valores de T_p e I_p .

Tabela 5.6: Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - TRBC.

Sistema de baixa inércia - 597 casos efetuados (55%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	3,59 pu	20,39 pu	13,74 pu	4,91 pu
Torque de pico a pico (T_p)	2,98 pu	7,98 pu	5,94 pu	1,41 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,14 pu	1,27 pu	0,76 pu	0,32 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	5°	98°	52°	25°
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	0 ms	157 ms	78 ms	53 ms
Sistema de média inércia - 503 casos efetuados (47%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	2,36 pu	15,13 pu	9,33 pu	3,61 pu
Torque de pico a pico (T_p)	1,96 pu	7,39 pu	5,89 pu	1,48 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,12 pu	0,87 pu	0,50 pu	0,21 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	59°	31°	16°
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	0 ms	167 ms	79 ms	59 ms
Sistema de alta inércia - 314 casos efetuados (29%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	2,03 pu	8,51 pu	4,13 pu	1,63 pu
Torque de pico a pico (T_p)	1,52 pu	6,57 pu	2,99 pu	1,35 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,12 pu	0,57 pu	0,26 pu	0,11 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	36°	9°	9°
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	0 ms	167 ms	58 ms	59 ms

* Tempo entre o sinal de *trip* e o envio do comando para o disjuntor.

** Medidas realizadas no fechamento do disjuntor da fonte reserva.

Fonte: próprio autor.

5.3.5 Considerações sobre a transferência rápida de barras convencional

Esta seção apresenta uma análise da TRBC utilizada na indústria. Para tal análise, utilizaram-se simulações de sistemas de baixa, média e alta inércia para verificar os pontos críticos da TRBC.

Assim como mencionado no Seção 5.2, notou-se que o valor de pico do corrente desenvolvido no processo de TRBC é proporcional tanto à o_{vf} quanto à o_{fase} , já o toque pico a pico apresenta regiões em que é proporcional à taxa V/f ($o_{vf} < 0,6pu$) bem como à diferença de fase ($0^\circ < o_{fase} < 40^\circ$), independente da inércia do sistema em ambos os caso. Além disso, existe uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e o_{fase} . Os fatos apresentados permitem afirmar que, definindo critérios para uma das variáveis monitoradas (o_{vf} e o_{fase}), pode-se limitar a corrente e torque na TRBC.

Nos resultados globais da TRBC notou-se que o sistema de baixa inércia tem maior chance

de obter transferências efetuadas, pois seu escorregamento angular é maior que os demais sistemas. Por outro lado, pode alcançar torque e correntes excessivos, maiores que 7 pu e 20 pu, respectivamente. Devido ao alto escorregamento angular do sistema de baixa inércia, esse atinge diferenças angulares além do permitido ($> 90^\circ$). Ainda, observa-se que o sistema de alta inércia obteve melhores resultados para os valores de I_p e T_p , dado que as médias de o_{fase} e de o_{vf} são menores no sistema de alta inércia em comparação com os demais sistemas.

5.4 Resultados do método de transferência rápida de barras com predição

A avaliação da metodologia TRBP, proposta no Capítulo 4, foi realizada utilizando-se as mesmas condições iniciais dos casos de simulação da Seção 5.3, com a finalidade de comparar os resultados do método convencional com o proposto. Nesta seção são apresentados os ajustes particulares, resultados dos casos estudados, e o resumo dos resultados de TRBP.

5.4.1 Grandezas elétricas calculadas

Para calcular as grandezas elétricas para o método de TRBP, é necessário calcular os coeficientes AR passos à frente, conforme apresentado no Capítulo 4.

5.4.1.1 Cálculo dos coeficientes auto-regressivos

Para calcular os coeficientes dos modelos AR, $\phi_r[k]$ e $\phi_b[k]$, a cada nova amostra k , é necessário determinar os valores de p (número de coeficientes AR) e m (número de precursores AR).

Para determinar o número ideal de coeficientes AR (p), considerou-se que um sinal senoidal pode ser modelado com $p = 2$ (exemplo: $y[k + 1] = a_1y[k] + a_2y[k - 1]$, conforme a seguinte equação:

$$\text{sen}[wT(k + 1)] = a_1\text{sen}[wT(k)] + a_2\text{sen}[wT(k - 1)] \quad (5.2)$$

onde w é a frequência angular do sinal senoidal, T é o período de amostragem e k é o instante amostral. Aplicando transformações trigonométricas, obtém-se:

$$(1 - a_2)\text{sen}[wTk]\cos[wT] + (1 + a_2)\text{sen}[wT]\cos[wTk] = a_1\text{sen}[wTk] \quad (5.3)$$

Por fim, observa-se que $a_1 = 2\cos(wT)$ e que $a_2 = -1$. Ou seja, um sinal senoidal pode ser

perfeitamente representado por apenas dois coeficientes AR. Deste modo, adota-se $p = 2$ tanto para o modelo AR das tensões na barra, v_b , quanto para a tensão na fonte reserva, v_r . Quanto ao número de precursores AR ($m + 1$), utilizou-se $m = 2p - 1$.

Cabe ressaltar que o sinal v_b não é puramente senoidal, no entanto, os valores dos coeficientes AR são atualizados a cada nova amostra k , isso permite uma adaptação dinâmica dos parâmetros de predição e baixo custo computacional.

5.4.1.2 Cálculos passos à frente do modelo auto-regressivo

Nesta etapa, é necessário calcular o número de passos à frente para os modelos AR. Para tal, utilizou-se um tempo de fechamento do disjuntor da fonte reserva de $T_{bc} = 50$ ms, compatível com o encontrado em catálogos de fabricantes em [48]. Deste modo, conforme equação 4.5, obtém-se $n = 128$, ou seja, 4 ciclos de 60 Hz.

Por fim, são calculados as seguintes grandezas de estimativas passos à frente: $\hat{\theta}_{vf}$, $\hat{\theta}_{fase}$ e $\hat{\theta}_{amp}$. Para cada uma dessas grandezas, são estabelecidas regras que permitem o envio do comando de fechamento para o disjuntor da fonte reserva.

5.4.2 Verificação dos critérios

Para o método de TRBP, as grandezas calculadas são comparadas com limites pré-definidos, e caso sejam atendidos, é enviado um sinal de fechamento (C_{Dr}) para o disjuntor da fonte reserva, Dr (apresentados nas Figura 5.1 e 5.2).

Os ajustes dos critérios foram definidos com maior restrição que os apresentados na Seção 2.2, visto que este método pode prever as grandezas elétricas e assim obter pontos de transferência mais apropriados. Os valores adotados foram:

- $th_{vf} = 0,8$ pu;
- $th_{fase} = 5^\circ$;
- $th_{amp} = 0,5$ pu;
- $k_{estab} = 16$ amostras (1/2 ciclo de 60 Hz).

As estimativas $\hat{Bb}[k]$ e $\hat{Br}[k]$ possuem um histórico de $m + 1$ (4) amostras anteriores. Portanto, caso ocorra um transitório no instante k , são necessárias $2m + 2$ (8) novas amostras

para estabilizar a estimativa novamente, devido ao janelamento do modelo AR. Para assegurar que o transitório de abertura do disjuntor (k_{trip}) não afete o modelo, foi utilizado $k_{estab} = 16^7$

5.4.3 Resultados de simulação da transferência rápida de barras com predição

A verificação da metodologia foi realizada por meio dos casos de simulação apresentados na Seção 5.3.3 e submetidos a metodologia de TRBP, apresentada em na Seção 4.1.

As medidas das variáveis são apresentadas no instante em que ocorreu o fechamento do disjuntor. No momento em que os critérios são atendidos, as análises são consideradas ideais e não fornecem informações substanciais sobre o estado do sistema no momento do fechamento do disjuntor. As medidas de I_p e T_p são realizadas após o fechamento do disjuntor.

Dentre os 3240 casos simulados, 1771 casos (55%) atenderam aos critérios para realização da TRBP. Sendo assim, os valores I_p e T_p referem-se apenas aos casos em que ocorreu o efetivo fechamento do disjuntor da fonte reserva.

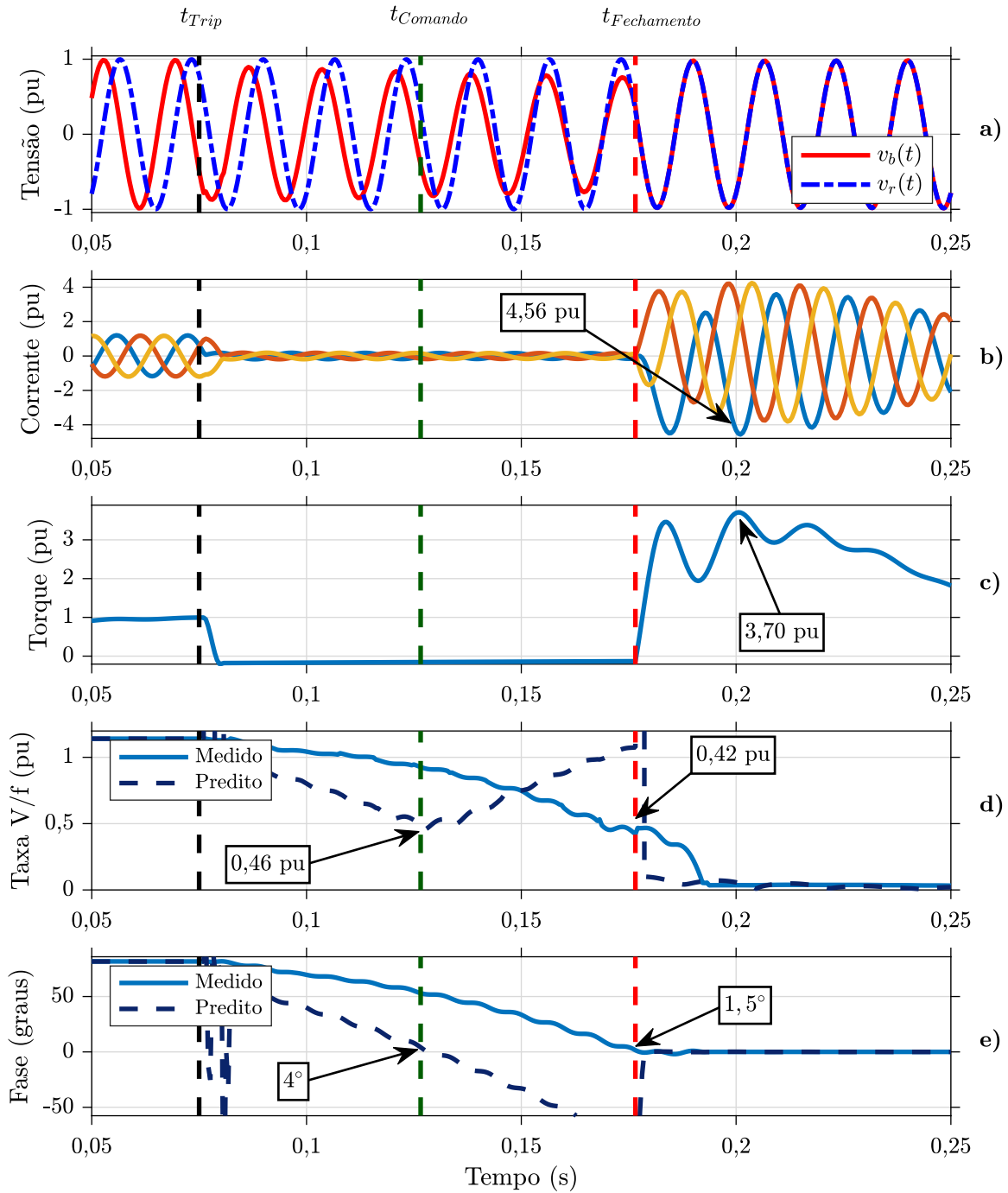
5.4.3.1 Exemplo de transferência efetuada

Para exemplificar a aplicação do algoritmo de TRBP, utilizaram-se os mesmos casos apresentados na Seção 5.3.4.1 com as condições iniciais da Tabela 5.4. Neste caso, os critérios para a realização da TRBP foram atendidos com sucesso ocorrendo o fechamento do disjuntor da fonte reserva. A Figura 5.18 apresenta os v_b , corrente no motor, torque no motor, o_{vf} e o_{fase} .

Na Figura 5.18, o *trip* da fonte principal ocorre em $t_{Trip} = 75$ ms; no instante $t_{Comando} = 126,6$ ms os critérios de transferência são atendidos. Note-se que o valor predito de \hat{o}_{vf} é de 0,46 pu e de $\hat{o}_{fase} = 4^\circ$. No momento em que ocorre o fechamento do disjuntor ($t_{Fechamento} = 176,6$ ms), nota-se que o_{vf} (0,42 pu) e o_{fase} ($1,5^\circ$) mantêm-se na faixa determinada pelos critérios apresentados na Seção 5.4.2. Após o fechamento do disjuntor, o valor de I_p atinge 4,56 pu e T_p desenvolvido é de 3,7 pu. Para esse mesmo caso, aplicando a TRBC, obteve-se I_p de aproximadamente 3 vezes maior (15 pu) e T_p de 2 vezes maior (7 pu) (conforme apresentado na Figura 5.10).

Além disso, nota-se que após o *trip* há uma instabilidade na predição de fase e da taxa V/f. No entanto, isso não afeta o resultado, visto que foi considerado um tempo de estabilização de 1/2 ciclo de 60 Hz, $k_{estab} = 16$ amostras.

⁷Cabe ressaltar que o transitório de abertura do disjuntor tem duração maior que uma amostra, por esse motivo é recomendado adotar ($k_{estab} > 16$)

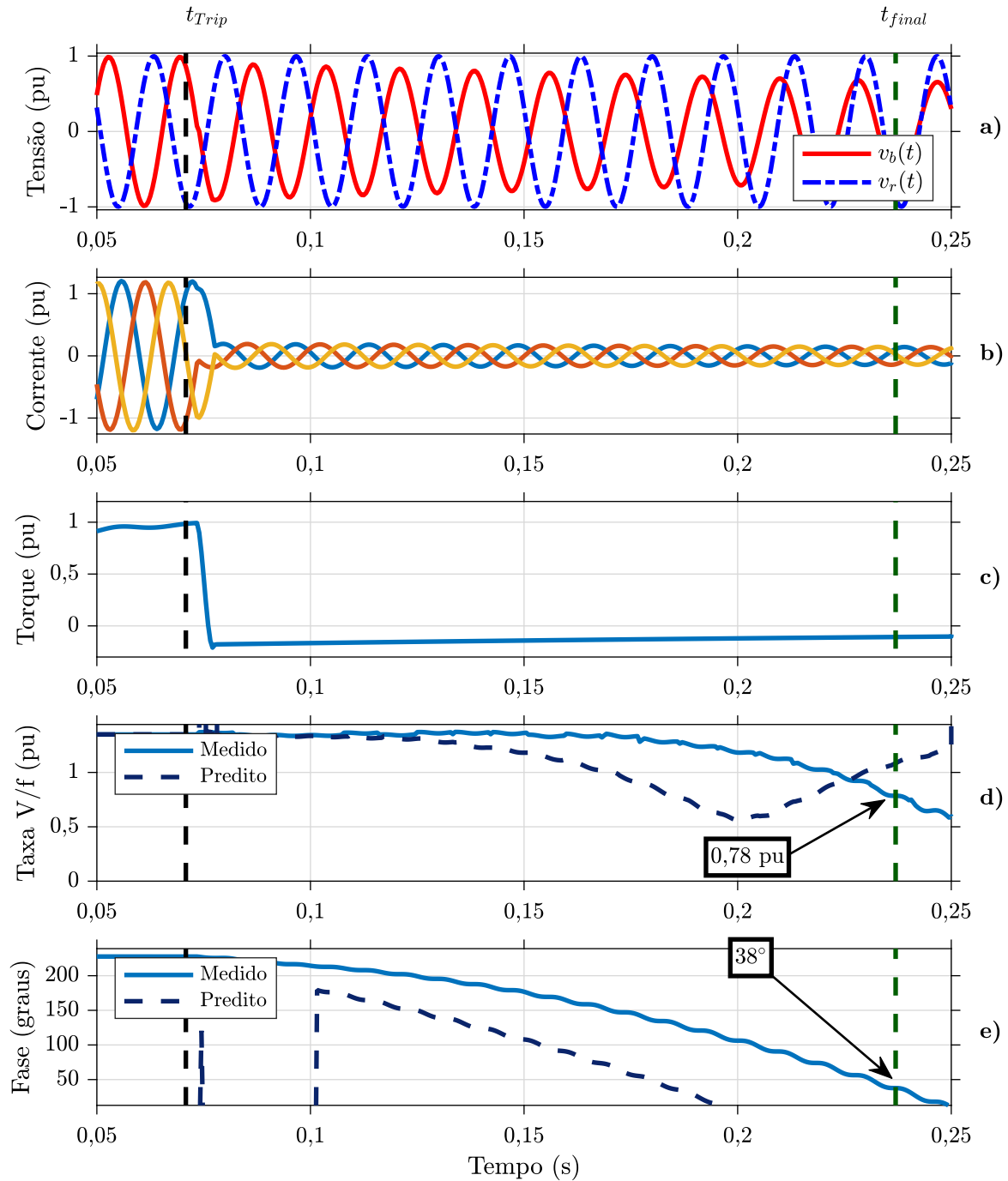


a) tensão na barra (v_b) e na fonte reserva (v_r); b) corrente no motor; c) torque no motor; d) taxa V/f (σ_{vf}); e) diferença de fase entre a fonte reserva e tensão na barra (σ_{fase}).

Figura 5.18: Exemplo de uma TRBP efetuada.

Fonte: próprio autor.

5.4.3.2 Exemplo de transferência não efetuada



a) tensão na barra (v_b) e na fonte reserva (v_r); b) corrente no motor; c) torque no motor; d) taxa V/f (o_{vf}); e) diferença de fase entre a fonte reserva e tensão na barra (o_{fase}).

Figura 5.19: Exemplo de uma TRBP não efetuada.

Fonte: próprio autor.

Como exemplo de aplicação do método de TRBP, utilizou-se o mesmo caso apresentado na Seção 5.3.4.2 com as condições iniciais da Tabela 5.5. Neste caso, os critérios para a realização da TRBP não foram atendidos dentro do tempo limite. Logo, não houve o fechamento do disjuntor da fonte reserva. A Figura 5.19 apresenta os v_b , corrente no motor, torque no motor, o_{vf} e o_{fase} .

Na Figura 5.19, o *trip* da fonte principal ocorre em $t_{Trip} = 71$ ms. No instante $t_{Final} = 273$ ms, o algoritmo identifica que o tempo máximo para detectar um ponto ótimo para transferência encerrou. Deste modo, entre t_{Trip} e t_{Final} , o algoritmo não encontrou um instante em que os todos os critérios fossem atendidos.

5.4.3.3 Erros de predição do modelo

A Tabela 5.7 apresenta os erros de predição para os casos simulados. Para calcular os erros de predição foi considerada a diferença absoluta entre o valor predito da variável no instante do envio do comando de fechamento e o valor medido no instante do fechamento, conforme apresentado nas equação 5.4 e 5.5.

$$\epsilon_{vf} = |\hat{o}_{vf}(t_{Comando}) - o_{vf}(t_{Fechamento})| \quad (5.4)$$

$$\epsilon_{fase} = |\hat{o}_{fase}(t_{Comando}) - o_{fase}(t_{Fechamento})| \quad (5.5)$$

Tabela 5.7: Erros de predição da taxa V/f e diferença de fase do modelo AR.

Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
ϵ_{vf}	0 pu	0,21 pu	0,03 pu	0,03 pu
ϵ_{fase}	0,01°	10,34°	3,58°	2,54°

Fonte: próprio autor.

Nota-se que o erro máximo de predição de diferença de fase é de $\epsilon_{fase} = 10,34^\circ$ e ocorre no sistema de baixa inércia. Já o erro máximo de predição para a taxa V/f é de $\epsilon_{vf} = 0,21$ pu e também ocorre no sistema de baixa inércia. Esse fato acontece no sistema de baixa inércia pois o decaimento da tensão para esse sistema é mais rápido e o modelo AR não atinge precisão para atenuar esse erro. Apesar disso, o erro médio e desvio padrão são promissores para tal aplicação.

5.4.3.4 Resultados dos casos efetuados

Para analisar os resultados do algoritmo de TRBP em relação às variáveis monitoradas, utilizaram-se os casos simulados em que a transferência foi efetuada. As análises apresentadas consideram as medidas das variáveis monitoradas no fechamento do disjuntor. As medidas do valor de I_p e de T_p são realizadas logo após o fechamento do disjuntor. A Figura 5.20 apresenta a relação entre os valores de T_p e o_{vf} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

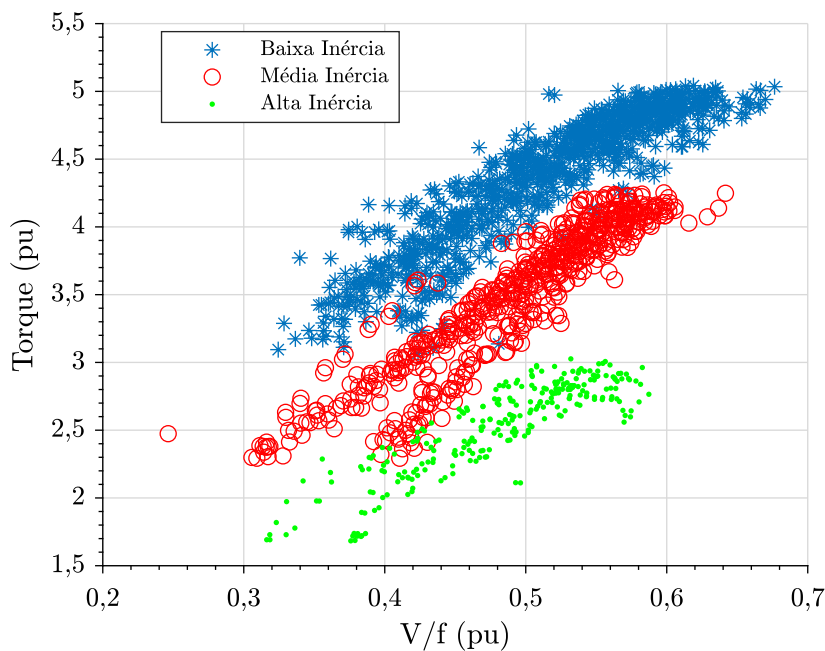


Figura 5.20: Relação entre a taxa V/f e o torque transitório - TRBP.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.20 que nenhum dos casos ultrapassa 0,68 pu da taxa V/f , visto que o limiar ajustado para o sinal predito é de 0,8 pu. Além disso, T_p desenvolvido é de 4,83 pu com $o_{vf} = 0,62$ pu. Ademais, nota-se uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e T_p , sendo que, para um mesmo valor de o_{vf} o sistema de baixa inércia desenvolve torques maiores durante a transferência.

A Figura 5.21 apresenta a relação entre T_p e o_{fase} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

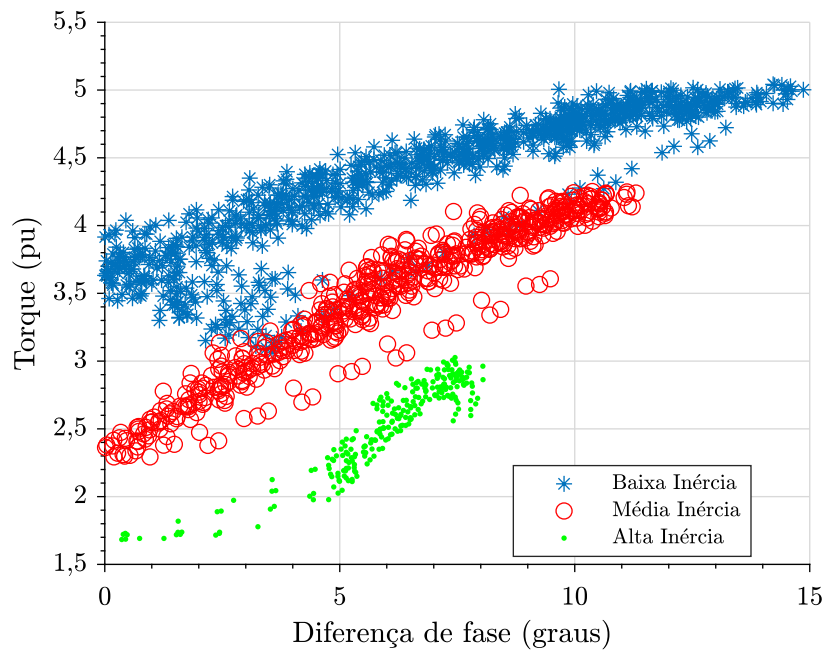


Figura 5.21: Relação entre o módulo da diferença de fase e o torque transitório - TRBP.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.21 que, apesar do limite do critério de diferença de fase (entre a fonte reserva e a barra) ter sido ajustado para $|o_{fase}| < 5^\circ$, alguns casos ultrapassaram esse limite (atingindo 15°) no instante de fechamento do disjuntor. Apesar dos erros de predição, o modelo AR contribui para o aprimoramento da TRB quando comparado com os resultados apresentados na Figura 5.13. Cabe ressaltar que nenhum caso ultrapassa o limite de $|o_{fase}| > 90^\circ$ (estabelecido no IEEE Std C37.96-2000, [22]). Como comentário geral, nota-se que para um mesmo valor da variável calculada o sistema de baixa inércia desenvolve torques maiores que os demais.

A Figura 5.22 apresenta a relação entre I_p e o_{vf} , dentre os casos efetuados.

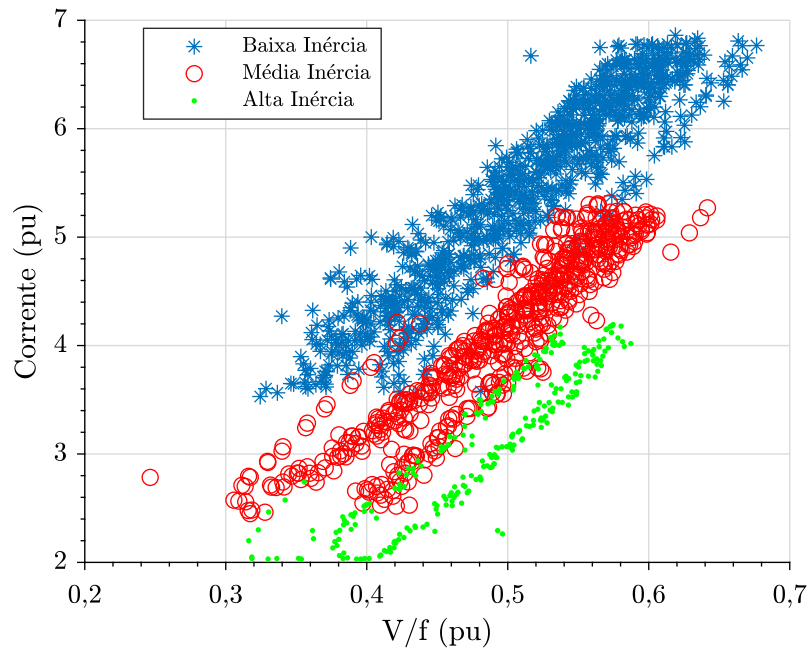


Figura 5.22: Relação entre a taxa V/f e a corrente de pico - TRBP.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.22 uma I_p de 6,86 pu com $o_{vf} = 0,62$ pu. Esse valor máximo está compatível com a corrente de rotor bloqueado que pode desenvolver de 4 a 8 pu, conforme o IEEE Std 620 [33]. Deste modo, a aplicação da TRBP contribui para uma maior vida útil dos motores em aplicações de TRB. Similarmente as demais relações das variáveis monitoradas, o sistema de baixa inércia desenvolve correntes normalmente maiores que os demais sistemas.

A Figura 5.23 apresenta a relação entre I_p e o_{fase} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

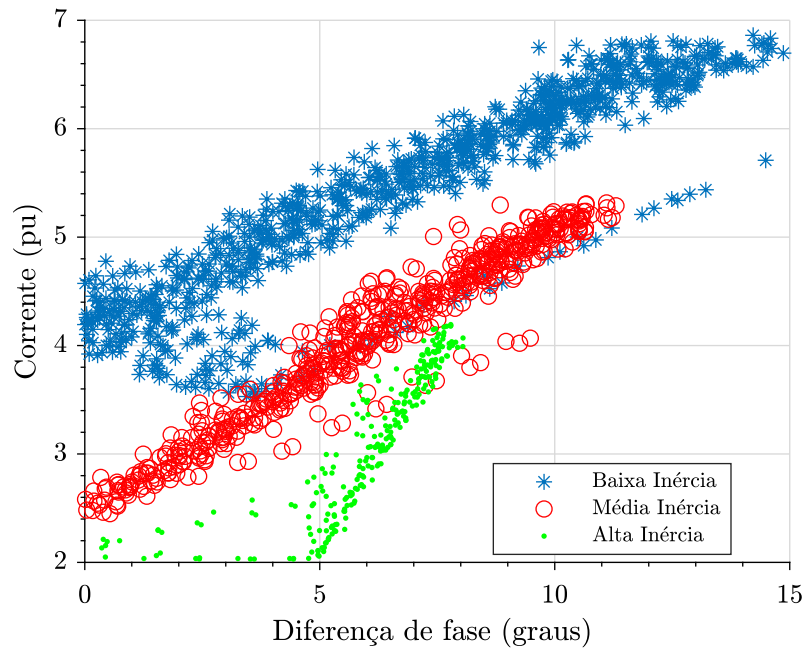


Figura 5.23: Relação entre o módulo da diferença de fase e a corrente de pico - TRBP.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.23 que alguns casos ultrapassaram limite de $|o_{fase}| < 5^\circ$. No entanto, não ultrapassam o limite de $|o_{fase}| < 90^\circ$ (estabelecido no IEEE Std C37.96-2000, [22]).

A Figura 5.24 apresenta a relação entre o tempo de atuação ($t_{Atuação}$, equação 5.1) e o ângulo da fonte reserva.

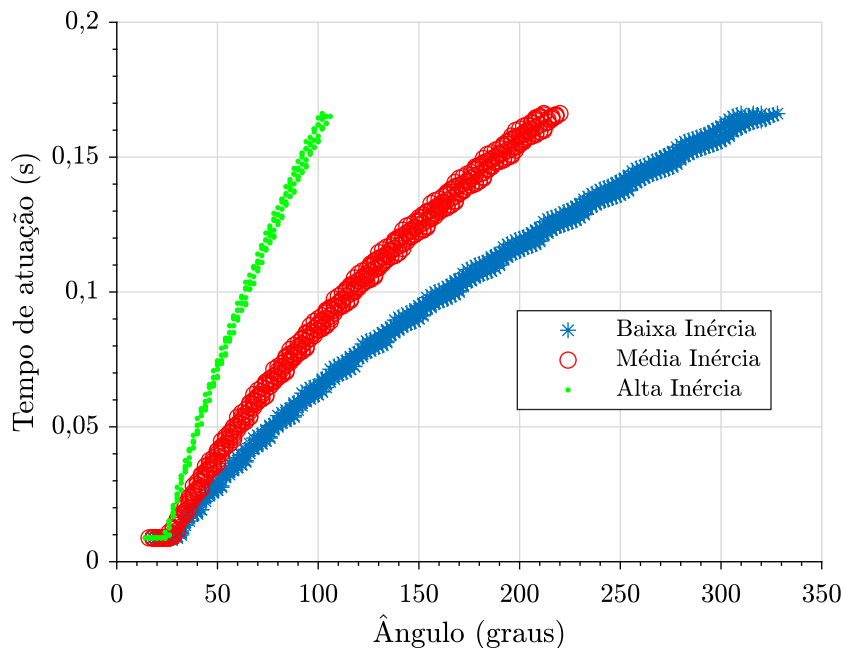


Figura 5.24: Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - TRBP.

Fonte: próprio autor.

Nota-se na Figura 5.24 que o algoritmo não atua para tempo menor que $1/2$ ciclo de 60 Hz porque está bloqueado para atuar nesse período, conforme ajuste k_{estab} . Além disso, de forma análoga ao observado no algoritmo TRBC, a inclinação da curva de tempo de atuação varia para cada sistema (baixa, média e alta inércia). Notavelmente, nos sistemas de baixa inércia, as variações de ângulo da barra ocorrem de maneira mais rápida. Por conseguinte, para um mesmo ângulo inicial da fonte de reserva, os critérios estabelecidos são atendidos de forma mais ágil nesse tipo de sistema. Esse fato ocorre, pois, para um mesmo ângulo inicial da fonte reserva, as variações de ângulo da barra são mais rápidas para sistemas de baixa inércia, logo, os critérios podem ser atendidos mais rapidamente.

5.4.3.5 Resumo dos resultados por inércia do sistema

A Tabela 5.8 apresenta um resumo dos resultados dos casos simulados, separado-os pela inércia do sistema (baixa, média, alta inércia), dentre os 3240 casos apresentados na Seção 5.3.3.

Na Tabela 5.8, nota-se que, dentre os 1080 casos simulados para cada um dos sistemas, o sistema de baixa inércia obteve o maior número de casos efetuados, 904 casos. Esse fato ocorre em função do maior decaimento de frequência e de variação de fase no barramento de motores, aumentando a chance do método proposto encontrar um ponto que atenda aos critérios. Por

Tabela 5.8: Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - TRBP.

Sistema de baixa inércia - 904 casos efetuados (84%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	3,53 pu	6,86 pu	5,42 pu	0,89 pu
Torque de pico a pico (T_p)	3,07 pu	5,04 pu	4,35 pu	0,49 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,32 pu	0,68 pu	0,51 pu	0,08 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	15°	7°	4°
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	9 ms	166 ms	97 ms	46 ms
Sistema de média inércia - 598 casos efetuados (55%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	2,45 pu	5,32 pu	4,08 pu	0,78 pu
Torque de pico a pico (T_p)	2,29 pu	4,25 pu	3,49 pu	0,53 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,25 pu	0,64 pu	0,49 pu	0,07 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	11°	6°	3°
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	9 ms	166 ms	95 ms	47 ms
Sistema de alta inércia - 269 casos efetuados (25%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	2,03 pu	4,19 pu	3,12 pu	0,65 pu
Torque de pico a pico (T_p)	1,68 pu	3,03 pu	2,53 pu	0,34 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,32 pu	0,59 pu	0,48 pu	0,06 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	8°	6°	2°
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	9 ms	166 ms	87 ms	50 ms

* Tempo entre o sinal de *trip* e o envio do comando para o disjuntor.

** Medidas realizadas no fechamento do disjuntor da fonte reserva.

Fonte: próprio autor.

esse mesmo fato, o_{fase} tem o maior desvio padrão e valor máximo dentre os sistemas, assim como ocorre com a taxa V/f. Quanto ao T_p e I_p , o sistema de baixa inércia obteve os maiores valores.

5.5 Resultados do método do novo critério de transferência rápida de barras com predição

A avaliação da metodologia propostas NTRB no Capítulo 4 foi realizada utilizando as mesmas condições iniciais dos casos de simulação da Seção 5.3 com a finalidade de se comparar os resultados do método convencional com o proposto. Nesta seção, é apresentada uma análise inicial dos limiares do critério RMSE: os ajustes particulares, resultados dos casos estudados, e o resumo dos resultados do método.

5.5.1 Definição dos limites do novo critério

Nesta seção avalia-se a relação entre o RMSE e a dinâmica do sistema de TRB, objetivando a definição do limite th_{RMSE} para ser utilizado no método de NTRB. Além disso, é apresentado uma análise sobre o potencial da comparação de sinais fundamentado em RMSE.

5.5.1.1 Cálculo de fase em sinais com decaimento de frequência

Os IEDs comerciais de Transmissão de Bloco de TRB adotam uma taxa de amostragem fixa para realizar a TDF, levando em consideração a frequência fundamental do sistema. Sua unidade de processamento de sinal utiliza a TDF para calcular a diferença de fase entre as tensões que precisam ser sincronizadas [18, 19]. No cenário da TRB, trata-se de dois sinais que, inicialmente, possuem a mesma frequência. Entretanto, após a falha da fonte principal, um desses sinais sofre uma diminuição tanto em frequência quanto em amplitude.

A Figura 5.25 apresenta um exemplo da aplicação do bloco de cálculo de fase utilizado para calcular a diferença de fase entre dois sinais, um com variação de frequência e outro com frequência constante. Ambos os sinais mantêm o ângulo de fase igual a 0° .

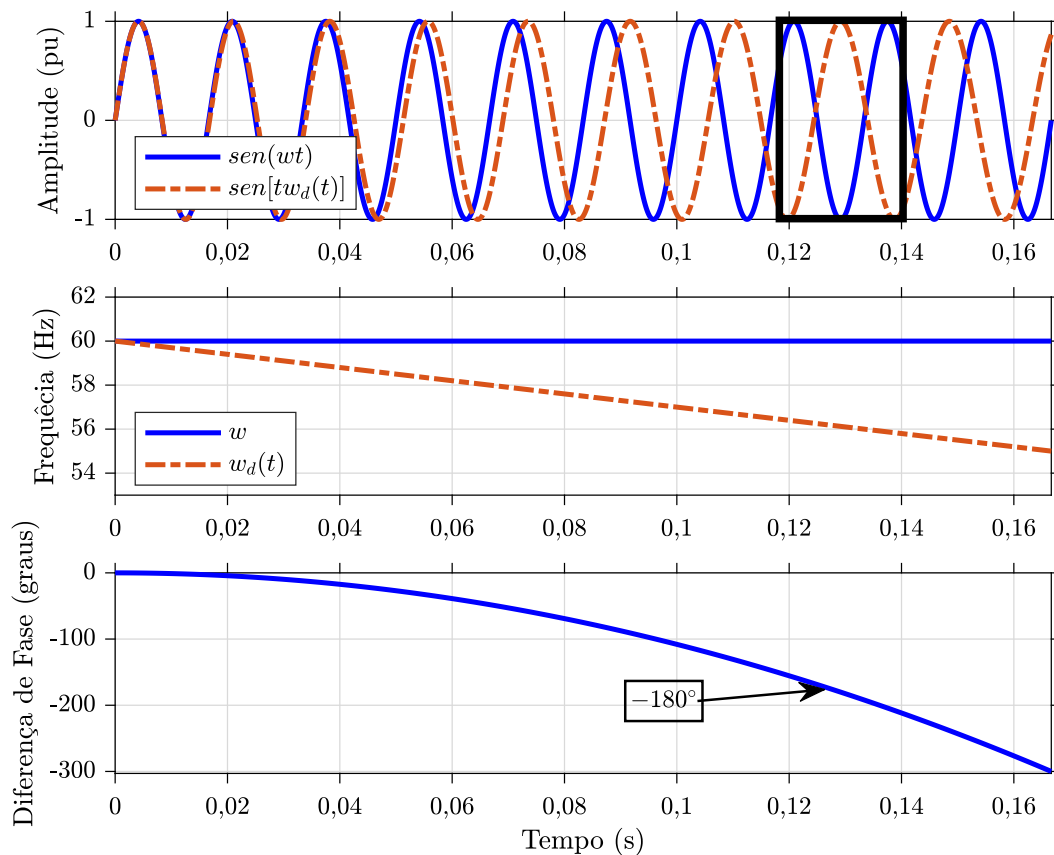


Figura 5.25: Cálculo de diferença de fase entre sinais com frequência em decaimento.

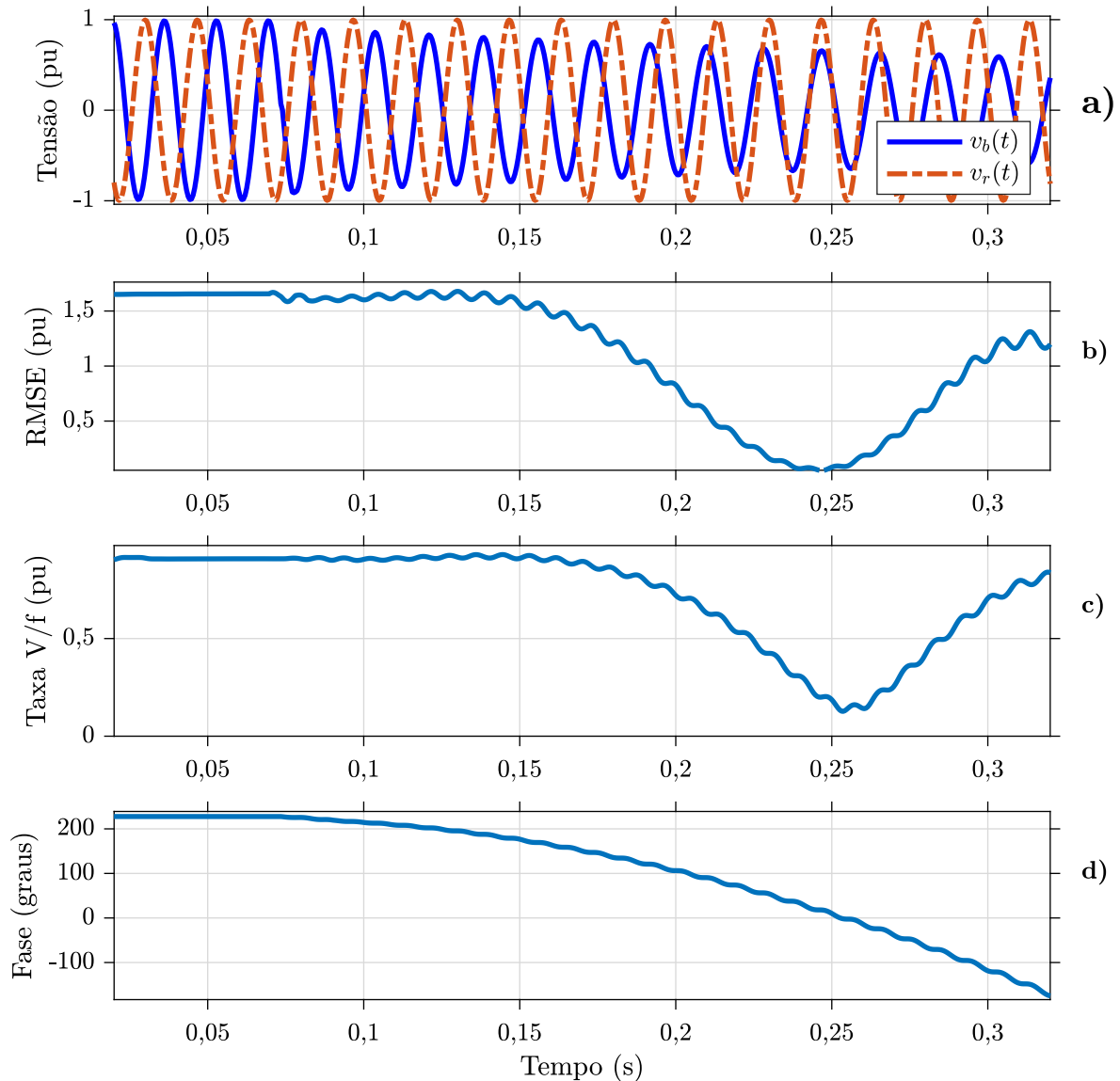
Fonte: próprio autor.

Na Figura 5.25, nota-se que a diferença de fase foi calculada pela TDF com taxa de amostragem fixa. Por esse motivo, houve uma diferença de fase de -180° em 129 ms. No entanto, o sinal em decaimento, $sen[w_d(t)t]$, modifica apenas sua frequência e não sua fase. Conceitualmente, a diferença de fase calculada não corresponde ao real valor. Tal cálculo é normalmente utilizado entre sinais de mesma frequência [24]. Logo, não há sentido físico/matemático para esse cálculo de fase aplicado à TRB.

5.5.1.2 Relação entre o novo critério e os transitórios eletromagnéticos

Nesta seção analisa-se a relação entre o RMSE e I_p e T_p para os mesmos casos de simulação apresentados no Seção 5.2, de modo a estabelecer uma comparação entre o a TRBS e o método proposto neste capítulo.

A Figura 5.26 apresenta um caso simulado na Seção 5.2 e a comparação entre o_{rms} , o_{vf} e o_{fase} .



a) tensão na barra (v_b) e na fonte reserva (v_r); b) RMSE (o_{rms});
 c) taxa V/f (o_{vf}); d) diferença de fase entre a fonte reserva e tensão na barra (o_{fase}).

Figura 5.26: Comparação entre RMSE, taxa V/f e diferença de fase.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.26 que há uma tendência semelhante entre o_{vf} e o_{rms} . Além disso, o ponto mínimo de RMSE acontece antes de 250 ms, já o ponto mínimo da taxa V/f acontece após este instante.

Adicionalmente, observa-se uma distorção nos cálculos tanto da taxa V/f quanto do RMSE. Essa ocorrência é atribuída ao janelamento aplicado nos cálculos entre sinais de frequências

distintas. Apesar dessa distorção, ao comparar os cálculos de diferença de fase utilizando a TDF, o valor do RMSE apresenta uma interpretação matemática mais coerente com a similaridade entre os sinais analisados.

A Figura 5.27 apresenta a relação entre σ_{rms} e a σ_{vf} , dentre os casos simulados de TRBS.

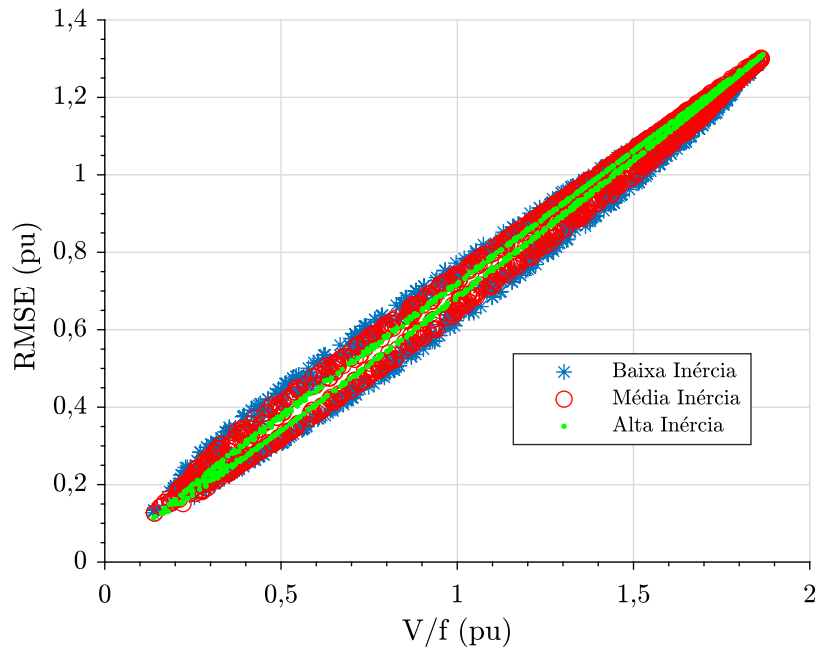


Figura 5.27: Relação entre o RMSE e a taxa V/f - novo critério.

Fonte: próprio autor.

Nota-se na Figura 5.27 que a hipótese de que existe uma semelhança entre σ_{vf} e σ_{rms} , apresentada na Figura 5.26, é confirmada devido à proporcionalidade entre os valores calculados.

A Figura 5.28 apresenta a relação entre T_p e σ_{rms} dentre os casos simulados.

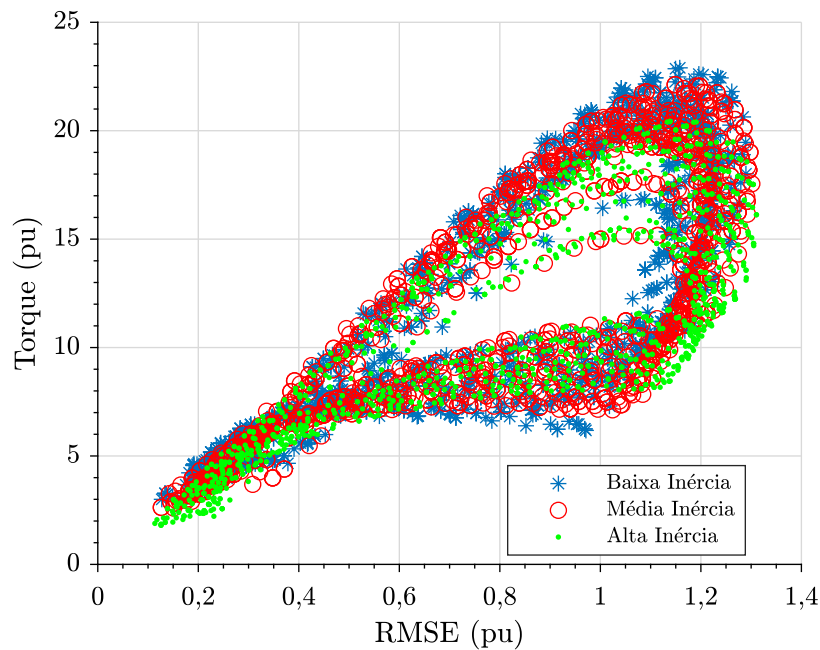


Figura 5.28: Relação entre RMSE e o torque transitório - novo critério.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.28 um T_p máximo de 22,9 pu com $o_{rms} = 1,17$ pu. Além disso, nota-se que existe uma relação aproximadamente linear entre o_{rms} e T_p , na região entre 0 pu a 0,5 pu de o_{rms} , independente da inércia do sistema. Ainda, podemos perceber uma semelhança na disposição dos pontos com a Figura 5.4.

A Figura 5.29 apresenta a relação entre a corrente transitória e o_{rms} , dentre os casos simulados.

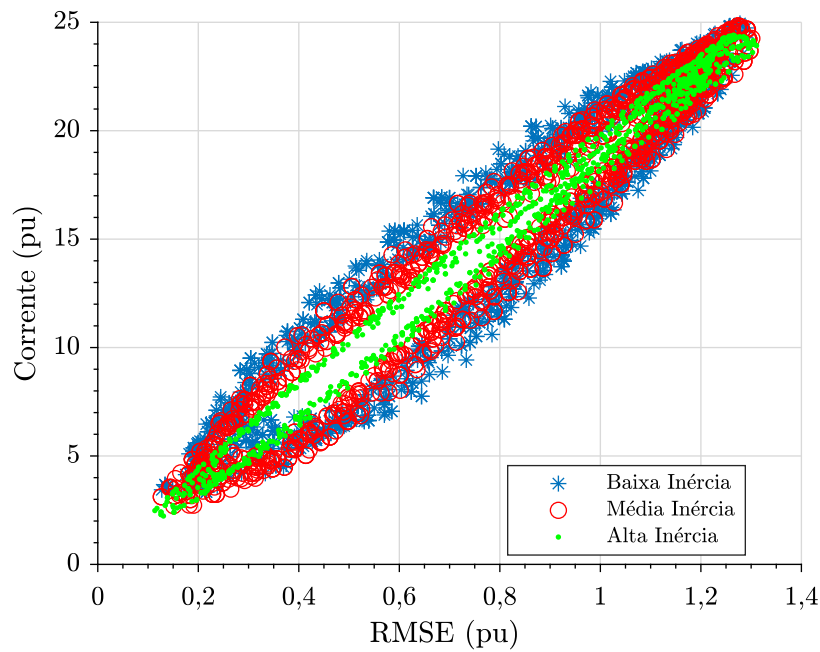


Figura 5.29: Relação entre RMSE e a corrente de pico - novo critério.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.29 que a corrente pico obtida dentre os casos simulados foi de 24,95 pu com um RMSE de $o_{rms} = 1,29$ pu. Nota-se, também, que existe uma relação aproximadamente linear entre o_{rms} e I_p , independente da inércia do sistema. Ainda, pode-se perceber uma semelhança na disposição dos pontos com a Figura 5.6.

A Figura 5.30 apresenta a relação entre o_{rms} e o_{fase} , dentre os casos simulados.

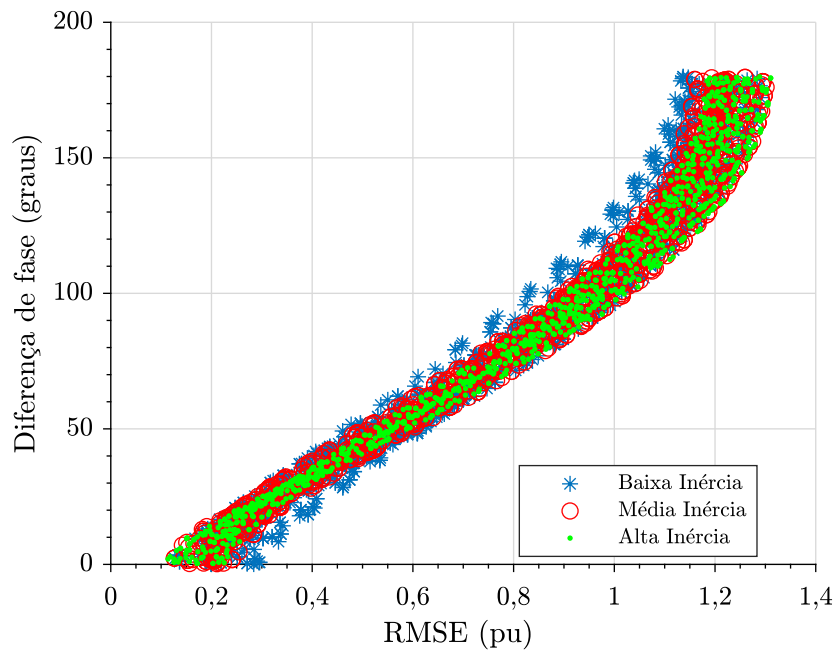


Figura 5.30: Relação entre RMSE e a diferença de fase - novo critério.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.30 que relação o_{rms} e o_{fase} é semelhante à relação o_{vf} e o_{fase} apresentada na Figura 5.8.

5.5.1.3 Definição dos limites do novo critério

Diante das relações apresentadas de torque e corrente desenvolvida na TRBS com o_{rms} , pode-se determinar os critérios para limitar tanto a corrente quanto o torque no sistema de TRB e determinar o valor de th_{RMSE} .

O *IEEE Application Guide for IEEE Std 1547* [23] recomenda que a diferença de fase para realizar um sincronismo entre duas fontes não ultrapasse 20° . Logo, a Figura 5.31 apresenta a região em que essa recomendação é atendida (figura semelhante à Figura 5.30)⁸.

⁸Cabe ressaltar que a norma considerada para limitar o novo critério refere-se ao sincronismo regular de fontes. No estado da arte atual, essa seria a melhor referência a ser adotada no momento, visto que as não há critérios bem definidos para TRB

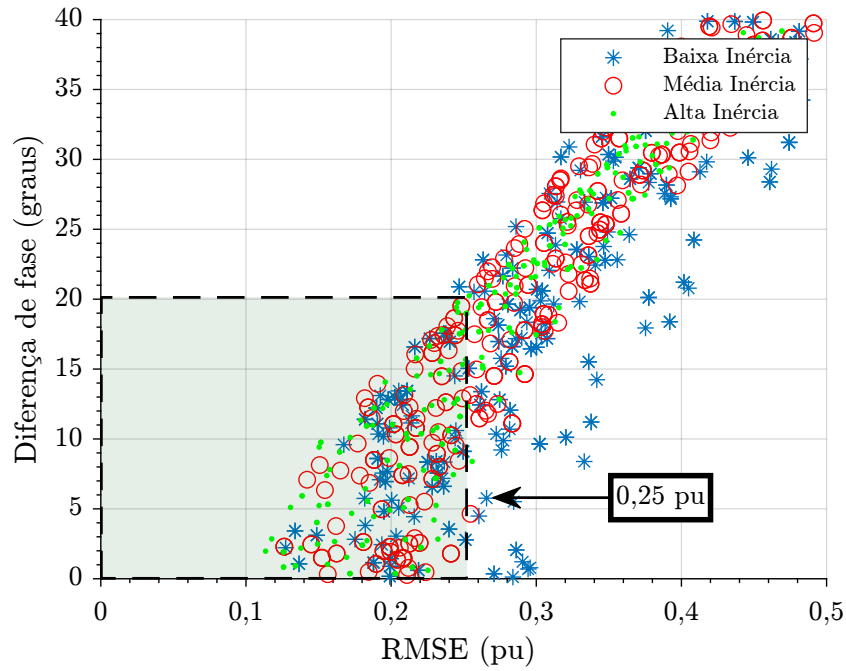


Figura 5.31: Relação entre RMSE e a diferença de fase - definição do novo critério.

Fonte: próprio autor.

Na Figura 5.31, nota-se que para atender as recomendações do IEEE Std 1547 deve-se limitar o_{rms} em $th_{RMSE} = 0,25$ pu.

A Figura 5.32 apresenta a região em que RMSE é limitado em 0,25 pu (figura semelhante à Figura 5.29).

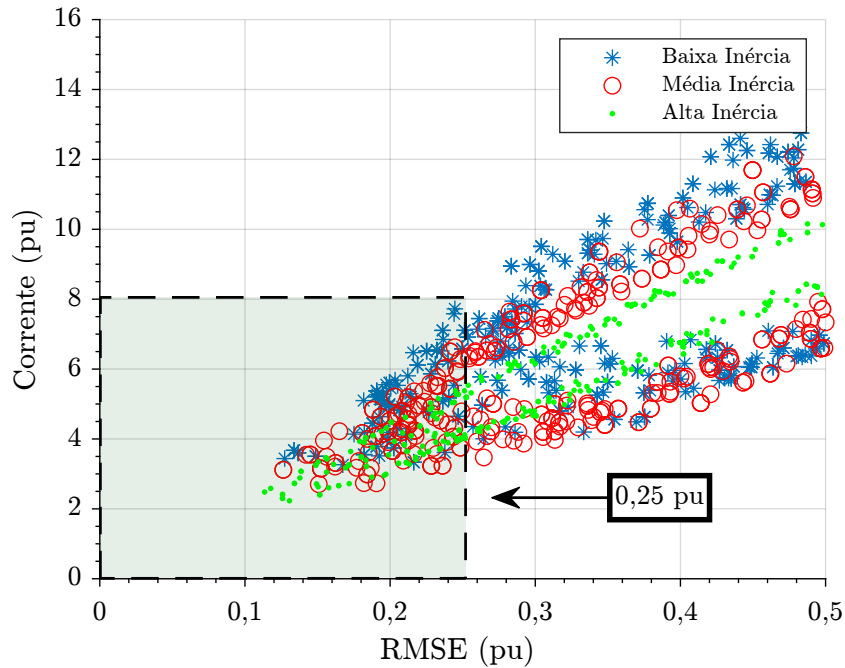


Figura 5.32: Relação entre RMSE e a corrente de pico - definição do novo critério.

Fonte: próprio autor.

Na Figura 5.32, nota-se que, ao limitar RMSE em 0,25 pu, obtém-se uma I_p de 8 pu. Esse comportamento está em conformidade com a IEEE Std 620 [33] que afirma que, sob condições de rotor bloqueado, a corrente nos enrolamentos podem atingir de 4 a 8 vezes a corrente nominal a plena carga. Deste modo, os motores são projetados para suportar tal nível de corrente.

A Figura 5.33 apresenta a região em que RMSE é limitado a 0,25 pu e T_p desenvolvido nas simulações (figura semelhante à Figura 5.28).

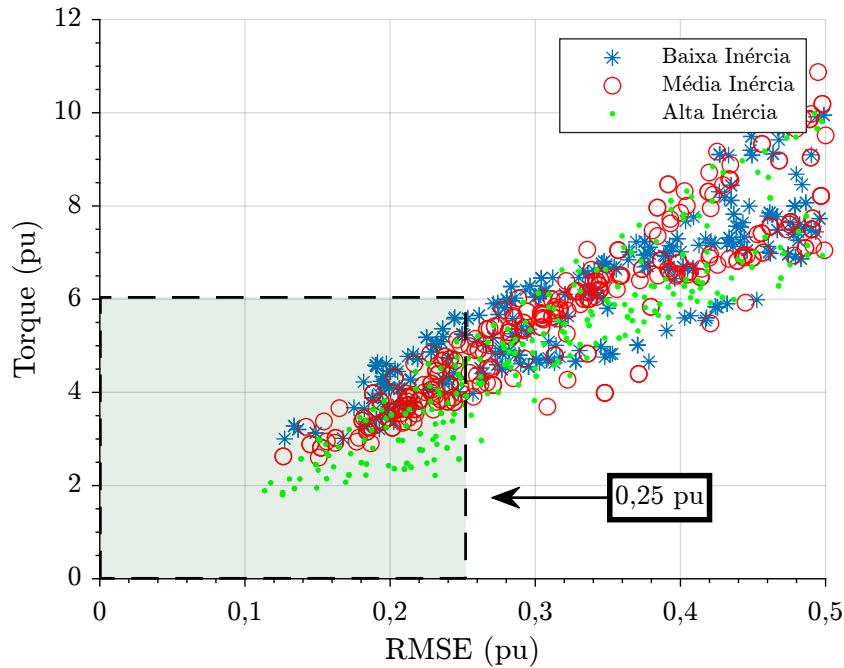


Figura 5.33: Relação entre RMSE e a corrente de pico - definição do novo critério.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.33 que T_p máximo desenvolvido é de 6 pu, para o limite adotado. No Capítulo 2, discute-se o torque máximo permitido para um motor de indução. A referência [34] menciona que o torque máximo de uma máquina pode ser de 3 pu. Adicionalmente a isso, conforme mencionado na Seção 3.3, o projeto do eixo de motores deve considerar um fator de segurança (F_{seg}). Não é recomendado que esse valor seja inferior a 1,5. Para este trabalho, considera-se o valor conservativo de $F_{seg} = 2$ para o projeto do eixo da máquina [36, 37, 35]. Deste modo, assume-se que o valor de 6 pu para o torque máximo (torque máximo x F_{seg}) é um valor aceitável para a TRB.

Por fim, para este novo critério, adota-se um limite máximo de $th_{RMSE} = 0,25$ pu para RMSE, pois permite que a TRB ocorra nos limites aceitáveis de corrente e torque. Além disso, entende-se que, para aplicações específicas, pode-se modificar o valor dos limites de RMSE para obter resultados mais ou menos restritivos.

Cabe ressaltar que, para se determinar o critério RMSE, não foi utilizada a NEMA/ANSI C50.41 [15] por se entender que seus critérios foram retirados visto que são poucos restritivos e inseguros para a TRB, como já mencionado no Capítulo 2.

5.5.2 Grandezas elétricas calculadas

Para calcular as grandezas elétricas para o método de TRBP é necessário calcular os coeficientes AR passos à frente conforme apresentado no Capítulo 4. Os ajustes do modelo AR são semelhantes aos do método de TRBP, apresentados na Seção 5.4.1.

Por fim, calcula-se o ponto mínimo $RMSE_{min}$, bem como a amostra correspondente ao ponto mínimo k_{min} , conforme 4.10.

5.5.3 Verificação dos critérios

Os valores adotados para os ajustes dos critérios deste método foram os seguintes:

- $k_{estab} = 32$ amostras (1 ciclo de 60 Hz);
- $th_{RMSE} = 0,25$ pu.

O valor de foi adotado conforme Seção 5.5.1.3. O tempo de estabilização (k_{estab}) diferiu do adotado para o método de TRBP, visto que o cálculo RMSE é realizado em todo o sinal predito e a janela de média RMSE é de $N = 16$ (equação 4.8). Deste modo, foi adotado um tempo de estabilização maior.

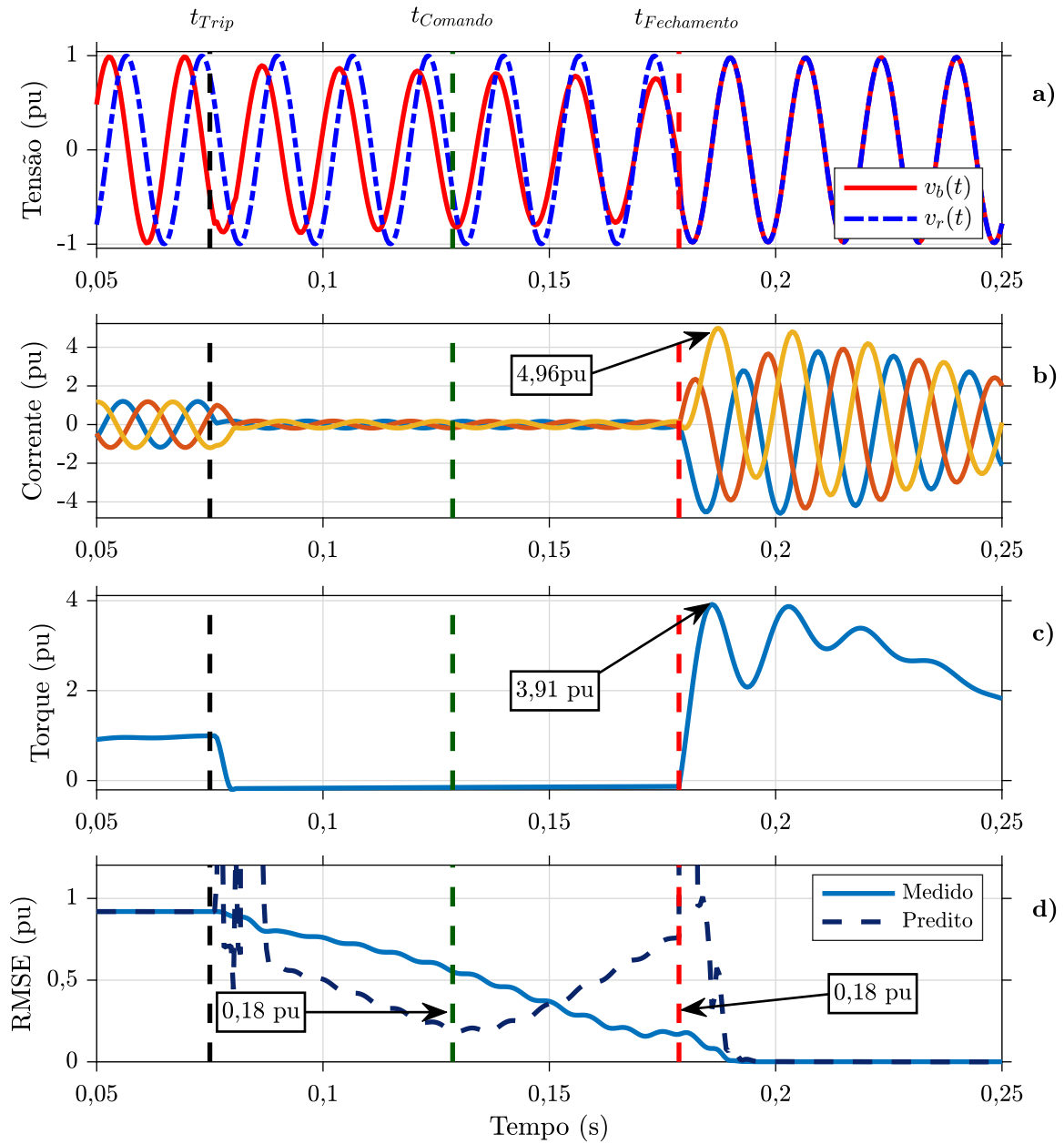
5.5.4 Resultados de simulação

A avaliação da metodologia foi realizada por meio dos casos de simulações apresentados na Seção 5.3.3 e submetidos à metodologia de NTRB, apresentada na Seção 4.2.

Dentre os 3240 casos, 1473 (45%) atenderam aos critérios para realizar a transferência pelo NTRB. Desta forma, as correntes de pico e torques de pico a pico máximos serão apenas para os casos em que ocorreu o efetivo fechamento do disjuntor da fonte reserva.

5.5.4.1 Exemplo de transferência efetuada

Para exemplificar a aplicação do algoritmo de NTRB, utilizou-se o mesmo caso apresentado na Seção 5.3.4.1 e Seção 5.4.3.1 com as condições iniciais da Tabela 5.4. Neste caso, os critérios para a realização do NTRB foram atendidos com sucesso, ocorrendo o fechamento do disjuntor da fonte reserva. A Figura 5.34 apresenta os sinais de v_b , corrente no motor, torque no motor e o_{RMSE} .



a) tensão na barra (v_b) e na fonte reserva (v_r); b) corrente no motor; c) torque no motor; d) RMSE (o_{RMSE}).

Figura 5.34: Exemplo de uma NTRB efetuada.

Fonte: próprio autor.

Na Figura 5.34, o *trip* da fonte principal ocorre em $t_{Trip} = 75$ ms e no instante $t_{Comando} = 128,6$ ms os critérios de transferência são atendidos. Nota-se que o valor predito do RMSE é de $\hat{o}_{RMSE} = 0,18$ pu. No momento em que ocorre o fechamento do disjuntor ($t_{Fechamento} = 178,6$ ms), nota-se que o valor de RMSE é o mesmo que o predito $o_{RMSE} = 0,18$ pu, mantendo-se na faixa pré-determinada pelos critérios apresentados na Seção 5.5.1.3, ou seja, $o_{RMSE} <$

0,25 pu. Após o fechamento do disjuntor, I_p atinge o valor de 4,96 pu e T_p desenvolvido 3,91 pu. Para esse mesmo caso, aplicando a TRBC, obteve-se I_p de cerca de três vezes maior (15 pu) e o torque de pico duas vezes maior (7 pu) (apresentado na Figura 5.10).

Além disso, nota-se que após o *trip* há uma instabilidade na predição de fase do RMSE. No entanto, isso não afeta o resultado, visto que foi considerado um tempo de estabilização de 1 ciclo de 60 Hz, $k_{estab} = 32$ amostras.

5.5.4.2 Exemplo de transferência não efetuada

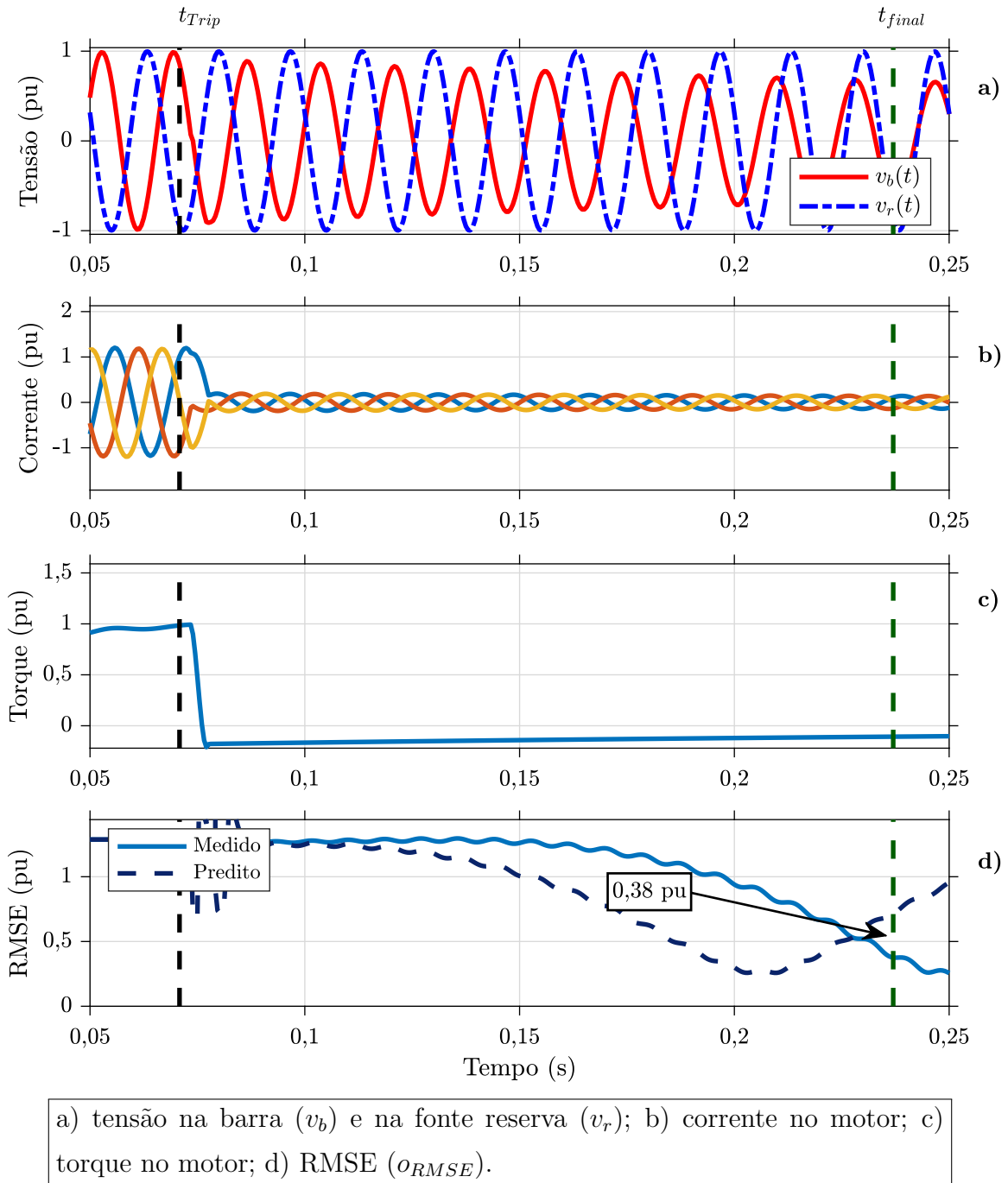


Figura 5.35: Exemplo de uma NTRB não efetuada.

Fonte: próprio autor.

Como exemplo de aplicação do método de NTRB, utilizou-se o mesmo caso apresentado na Seção 5.3.4.2 e Seção 5.4.3.2 com as condições iniciais da Tabela 5.5. Neste caso, os critérios para a realização do NTRB não foram atendidos no tempo limite, logo não houve o fechamento

do disjuntor da fonte reserva. A Figura 5.35 apresenta os sinais de v_b , corrente no motor, torque no motor e o_{RMSE} .

Na Figura 5.35, o *trip* da fonte principal ocorre em $t_{Trip} = 71$ ms. No instante $t_{Final} = 273$ ms o algoritmo identifica que o tempo máximo para detectar um ponto ótimo para transferência encerrou. Deste modo, entre t_{Trip} e t_{Final} o algoritmo não encontrou um instante em que os todos os critérios fossem atendidos.

5.5.4.3 Erros de predição do modelo

A Tabela 5.9 apresenta os erros de predição para os casos simulados. Para calcular os erros de predição, foi considerada a diferença absoluta entre o valor predito da variável no instante do envio do comando de fechamento e o valor medido no instante do fechamento, conforme apresentado na equação 5.6

$$\epsilon_{RMSE} = |\hat{o}_{RMSE}(t_{Comando}) - o_{RMSE}(t_{Fechamento})| \quad (5.6)$$

Tabela 5.9: Erros de predição do RMSE do modelo AR.

Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
ϵ_{RMSE}	0 pu	0,12 pu	0,02 pu	0,01 pu

Fonte: próprio autor.

Nota-se que o erro máximo de predição de RMSE é de $\epsilon_{RMSE} = 0,12$ pu e ocorre no sistema de baixa inércia, devido ao decaimento de tensão ser mais rápido que os demais sistemas. Apesar disso, o modelo AR apresenta resultados promissores de predição, visto o erro médio de 0,02 pu.

5.5.4.4 Resultados dos casos efetuados

Para analisar os resultados do algoritmo de NTRB em relação às variáveis monitoradas, utilizaram-se os casos simulados em que a transferência foi efetuada. As análises apresentadas consideram as medidas das variáveis monitoradas no fechamento do disjuntor. As medidas da I_p e T_p são realizadas logo após o fechamento do disjuntor.

A Figura 5.36 apresenta a relação entre T_p máxima e o_{rms} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

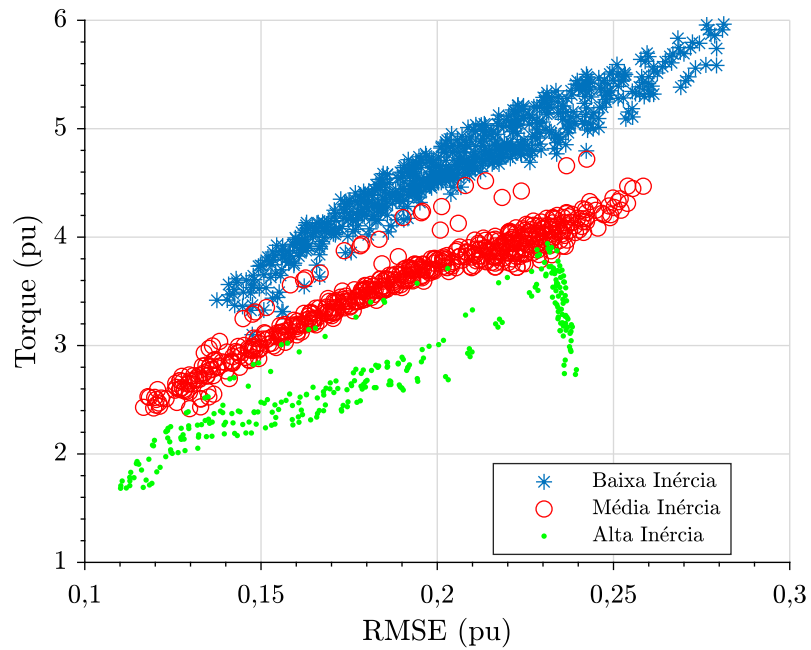


Figura 5.36: Relação entre o RMSE e o torque transitório - NTRB.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.36 que alguns dos casos ultrapassaram o limiar de 0,25 pu do RMSE. Além disso, T_p desenvolvido foi de 5,96 pu com $\sigma_{rms} = 0,28$ pu.

A Figura 5.37 apresenta a relação entre o torque pico a pico máximo e valor da taxa V/f , dentre os casos em que a transferência foi efetuado.

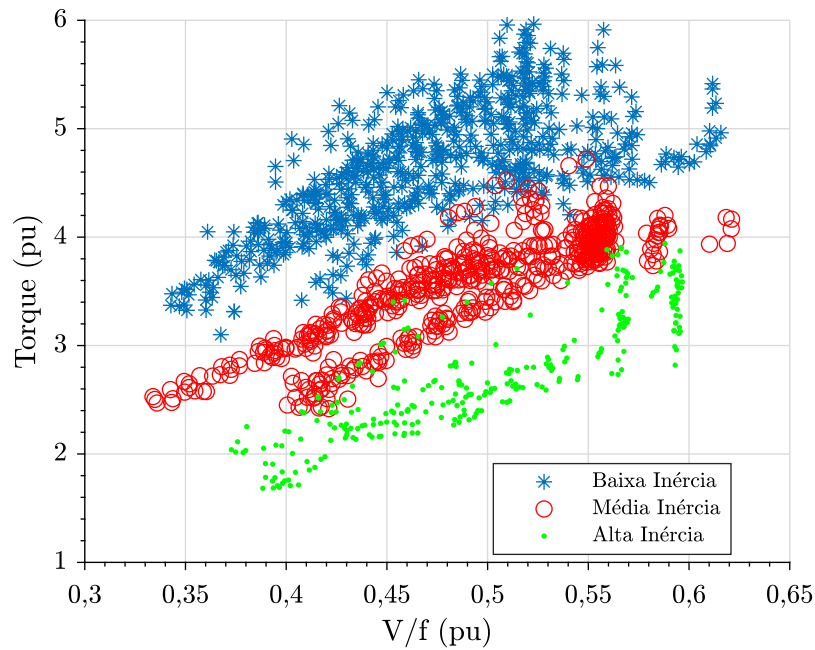


Figura 5.37: Relação entre a taxa V/f e o torque transitório - NTRB.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.37 que nenhum dos casos ultrapassou 0,68 pu da taxa V/f . Além disso, no T_p desenvolvido a taxa V/f é de $o_{vf} = 0,62$ pu.

A Figura 5.38 apresenta a relação entre o T_p e o_{fase} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

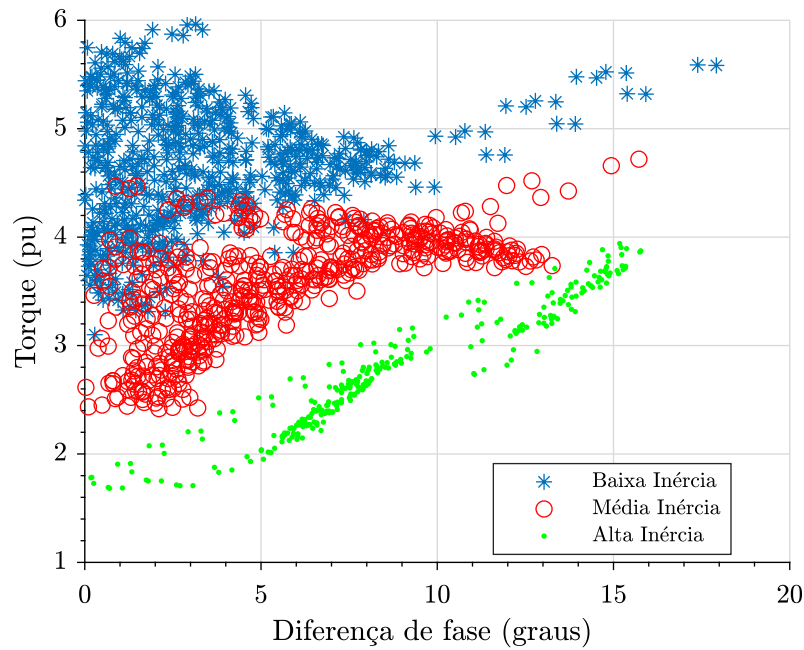


Figura 5.38: Relação entre o módulo da diferença de fase e o torque transitório - NTRB.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.38 que $|o_{fase}| < 18^\circ$. Cabe ressaltar que nenhum caso ultrapassa o limite de $|o_{fase}| > 90^\circ$ (estabelecido no IEEE Std C37.96-2000, [22]).

Como comentário geral, nota-se que para um mesmo valor da variável monitorada, o sistema de baixa inércia desenvolve torques normalmente maiores que os demais.

A Figura 5.39 apresenta a relação entre I_p e valor do RMSE, dentre os casos efetuados.

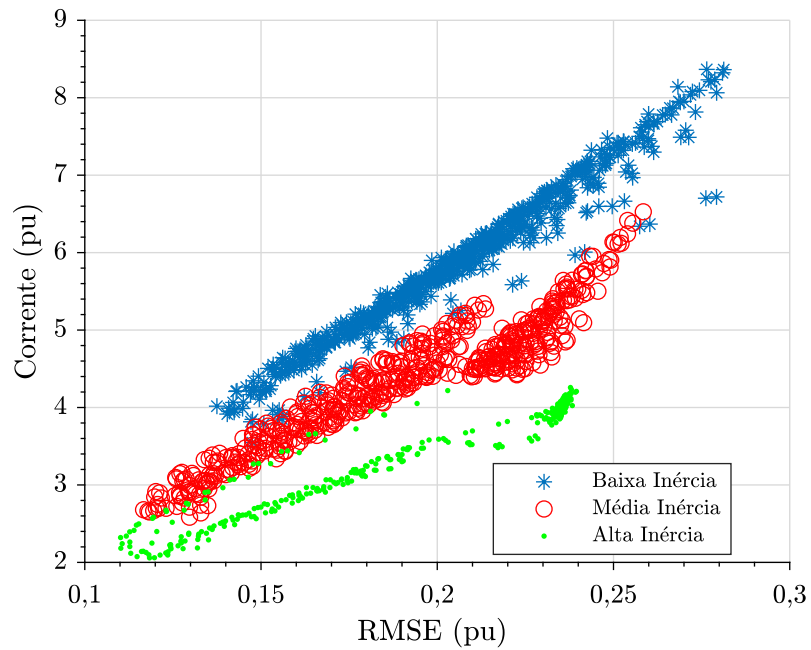


Figura 5.39: Relação entre o RMSE e a corrente de pico - NTRB.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.39 que alguns dos casos ultrapassaram o limiar de 0,25 pu do RMSE. Além disso, I_p desenvolvida é de 8,97 pu com $o_{rms} = 0,28$ pu.

A Figura 5.40 apresenta a relação entre I_p e o_{vf} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

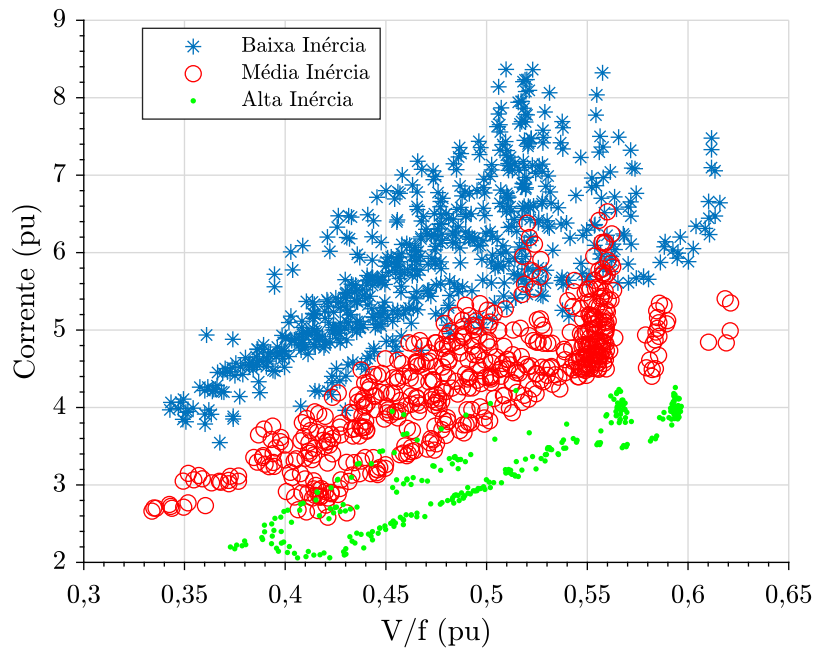


Figura 5.40: Relação entre a taxa V/f e a corrente de pico - NTRB.

Fonte: próprio autor.

Observa-se que na Figura 5.40 obteve-se uma I_p de 8,97 pu com $o_{vf} = 0,62$ pu. Esse valor já não está compatível com a corrente de rotor bloqueado que pode desenvolver de 4 a 8 pu, conforme o IEEE Std 620 [33]. Deste modo, a aplicação do NTRB poderia ser modificada para ser mais restrita e, assim, contribuir para uma maior vida útil dos motores em aplicações de TRB.

A Figura 5.41 apresenta a relação entre I_p e o_{fase} , dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

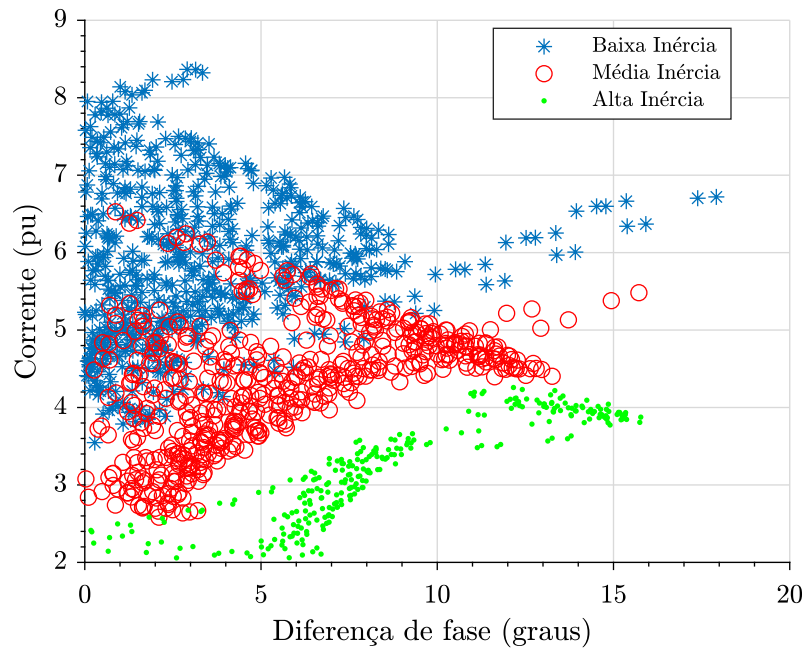


Figura 5.41: Relação entre o módulo da diferença de fase e a corrente de pico - NTRB.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 5.41 que, assim como observado na Seção 5.5.4.4, alguns casos ultrapassaram limite pré definido de $|o_{fase}| < 5^\circ$, apesar disso, na maioria dos casos, se manteve abaixo de 8 pu.

A Figura 5.42 apresenta a relação entre o tempo de atuação ($t_{Atuação}$, equação 5.1) e o ângulo da fonte reserva⁹ dentre os casos em que a transferência foi efetuada.

⁹considera-se que a fonte principal é a referência com ângulo 0°

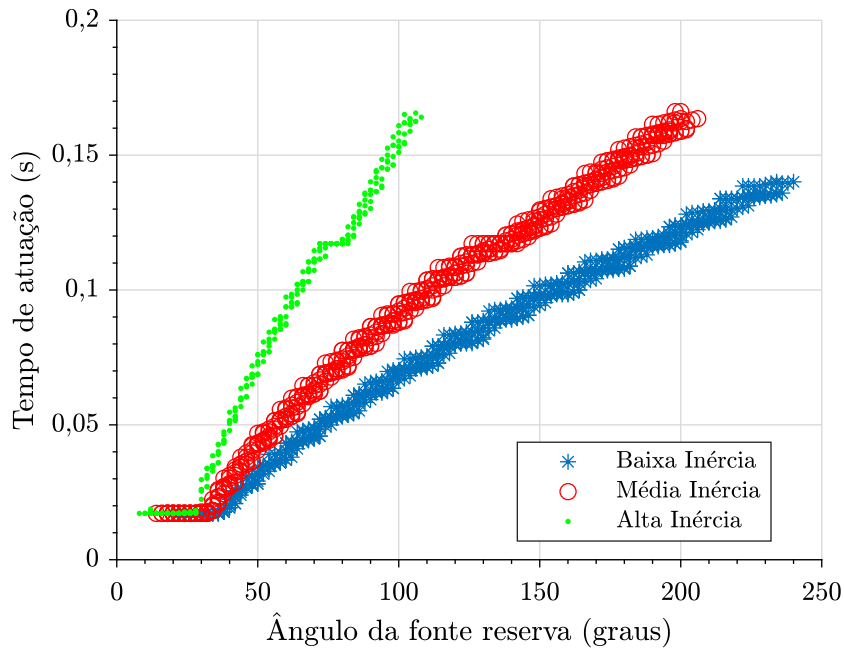


Figura 5.42: Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - NTRB.

Fonte: próprio autor.

Nota-se o algoritmo não atua para tempo menor que um ciclo de 60 Hz, conforme ilustrado na Figura 5.42, por que estar bloqueado para atuar nesse período que equivale ao valor de k_{est} . Além disso, similarmente ao que ocorre para o algoritmo de TRBC, a inclinação da curva de tempo de atuação é diferente para cada sistema (baixa, média e alta inércia). Isso porque as variações de ângulo da barra são mais rápidas para sistemas de baixa inércia, para um mesmo ângulo inicial da fonte reserva. Logo, os critérios são atendidos mais rapidamente.

5.5.4.5 Resumo dos resultados por inércia do sistema

A Tabela 5.10 apresenta um resumo dos resultados dos casos efetuados separados pela inércia do sistema (baixa, média, alta inércia), dentre os 3240 casos simulados apresentados na seção 5.3.3.

Na Tabela 5.10, nota-se que dentre os 1080 casos simulados para cada um dos sistemas, o sistema de baixa inércia obteve o maior número e casos efetuados, 904 casos (84%). Esse fato ocorre em função do maior decaimento de frequência e de variação de fase no barramento de motores, aumentando a chance do método proposto encontrar um ponto que atende os critérios. Por esse mesmo fato, σ_{fase} tem o maior desvio padrão e valor máximo dentre os sistemas, assim como ocorre com a σ_{vf} . Quanto ao T_p e I_p , o sistema de baixa inércia obteve os maiores valores.

Tabela 5.10: Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - NTRB.

Sistema de baixa inércia - 627 casos efetuados (58%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	3,55 pu	8,37 pu	5,85 pu	0,98 pu
Torque de pico a pico (T_p)	3,10 pu	5,96 pu	4,65 pu	0,56 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,34 pu	0,62 pu	0,47 pu	0,06 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	18°	3°	3°
RMSE (o_{rms}) **	0,14 pu	0,28 pu	0,20 pu	0,03 pu
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	17 ms	140 ms	80 ms	37 ms
Sistema de média inércia - 558 casos efetuados (52%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	2,58 pu	6,53 pu	4,33 pu	0,79 pu
Torque de pico a pico (T_p)	2,42 pu	4,72 pu	3,56 pu	0,49 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,33 pu	0,62 pu	0,49 pu	0,06 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	16°	6°	3°
RMSE (o_{rms}) **	0,12 pu	0,26 pu	0,19 pu	0,04 pu
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	17 ms	166 ms	93 ms	45 ms
Sistema de alta inércia - 288 casos efetuados (27%)				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_p)	2,06 pu	4,26 pu	3,21 pu	0,64 pu
Torque de pico a pico (T_p)	1,68 pu	3,94 pu	2,76 pu	0,57 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,37 pu	0,60 pu	0,50 pu	0,07 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	16°	9°	4°
RMSE (o_{rms}) **	0,11 pu	0,24 pu	0,18 pu	0,04 pu
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	17 ms	166 ms	83 ms	48 ms

* Tempo entre o sinal de *trip* e o envio do comando para o disjuntor.

** Medidas realizadas no fechamento do disjuntor da fonte reserva.

Fonte: próprio autor.

6 ANÁLISE COMPARATIVA

Este capítulo realiza uma análise comparativa dos resultados apresentados no Capítulo 5. Seu objetivo é relacionar os resultados gerais dos métodos TRBC, TRBP e NTRB, quanto à I_p , T_p , $t_{Atuação}$ e o número de casos efetuados e bem-sucedidos.

6.1 Comparação quanto às correntes de pico

A Tabela 6.1 apresenta os resultados em relação à I_p : mínimo, máxima, média e desvio padrão dos três métodos.

Tabela 6.1: Comparação dos resultados de corrente de pico por inércia do sistema.

Sistema de baixa inércia				
Método	Corrente de Pico (I_p)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	3,59 pu	20,39 pu	13,74 pu	4,91 pu
TRBP	3,53 pu	6,86 pu	5,42 pu	0,89 pu
NTRP	3,55 pu	8,37 pu	5,85 pu	0,98 pu
Sistema de média inércia				
Método	Corrente de Pico (I_p)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	2,36 pu	15,13 pu	9,33 pu	3,61 pu
TRBP	2,45 pu	5,32 pu	4,08 pu	0,78 pu
NTRP	2,58 pu	6,53 pu	4,33 pu	0,79 pu
Sistema de alta inércia				
Método	Corrente de Pico (I_p)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	2,03 pu	8,51 pu	4,13 pu	1,63 pu
TRBP	2,03 pu	4,19 pu	3,12 pu	0,65 pu
NTRP	2,06 pu	4,26 pu	3,21 pu	0,64 pu

Fonte: próprio autor.

Ao analisar a Tabela 6.1, é possível observar que, independentemente da inércia do sistema, os piores resultados são obtidos pelo método TRBC. Por outro lado, o método TRBP obteve as menores médias de I_p e menores correntes de pico máximo. Já o método NTRP obteve resultados semelhantes ao TRBP, exceto para o sistema de baixa inércia, atingindo correntes de pico máxima de 8,37 pu.

6.2 Comparação quanto ao torque de pico a pico

A Tabela 6.2 apresenta os resultados em relação a T_p : mínimo, máxima, média e desvio padrão dos três métodos.

Tabela 6.2: Comparação dos resultados de torque de pico a pico por inércia do sistema.

Sistema de baixa inércia				
Método	Torque de Pico a Pico (T_p)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	2,98 pu	7,98 pu	5,94 pu	1,41 pu
TRBP	3,07 pu	5,04 pu	4,35 pu	0,49 pu
NTRP	3,10 pu	5,96 pu	4,65 pu	0,56 pu
Sistema de média inércia				
Método	Torque de Pico a Pico (T_p)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	1,96 pu	7,39 pu	5,89 pu	1,48 pu
TRBP	2,29 pu	4,25 pu	3,49 pu	0,53 pu
NTRP	2,42 pu	4,72 pu	3,56 pu	0,49 pu
Sistema de alta inércia				
Método	Torque de Pico a Pico (T_p)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	1,52 pu	6,57 pu	2,99 pu	1,35 pu
TRBP	1,68 pu	3,03 pu	2,53 pu	0,34 pu
NTRP	1,68 pu	3,94 pu	2,76 pu	0,57 pu

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Tabela 6.2 que os resultados obtidos foram semelhantes aos apresentados para as correntes de pico, com destaque para o melhor desempenho do método TRBP.

6.3 Comparação quanto ao tempo de atuação

A Tabela 6.3 apresenta os resultados em relação à I_p : mínimo, máxima, média e desvio padrão dos três métodos.

Tabela 6.3: Comparação dos resultados de tempo de atuação por inércia do sistema.

Sistema de baixa inércia				
Método	Tempo de atuação ($t_{Atuação}$)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	0 ms	157 ms	78 ms	53 ms
TRBP	9 ms	166 ms	97 ms	46 ms
NTRP	17 ms	140 ms	80 ms	37 ms
Sistema de média inércia				
Método	Tempo de atuação ($t_{Atuação}$)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	0 ms	167 ms	79 ms	59 ms
TRBP	9 ms	166 ms	95 ms	47 ms
NTRP	17 ms	166 ms	93 ms	45 ms
Sistema de alta inércia				
Método	Tempo de atuação ($t_{Atuação}$)			
	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
TRBC	0 ms	167 ms	58 ms	59 ms
TRBP	9 ms	166 ms	87 ms	50 ms
NTRP	17 ms	166 ms	83 ms	48 ms

Fonte: próprio autor.

Os resultados apresentados na Tabela 6.3 indicam que o método TRBC obteve as melhores médias de tempos de atuação, apesar dos maiores desvios padrão. Além disso, os métodos TRBP e NTRB obtiveram tempo mínimo fixo, visto que essas transferências são bloqueadas devido ao tempo de estabilização do modelo AR (k_{estab}). O TRBP obteve um tempo mínimo de 9 ms (aproximadamente 1/2 ciclo de 60 ms), enquanto o NTRB obteve um tempo mínimo de 17 ms (aproximadamente 1 ciclo de 60 ms), ambos compatíveis com os valores de k_{estab} adotados.

6.4 Comparação quanto ao número de casos efetuados

A Tabela 6.4 apresenta os resultados referentes ao número de casos efetuados dentre os três métodos.

Tabela 6.4: Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - número de casos efetuados.

Método	N° de casos efetuados (%)			
	Baixa Inércia	Média Inércia	Alta Inércia	Total
TRBC	597 (55%)	503 (47%)	314 (29%)	1414 (44%)
TRBP	904 (84%)	598 (55%)	269 (25%)	1771 (55%)
NTRP	627 (58%)	558 (52%)	288 (27%)	1473 (45%)

Fonte: próprio autor.

Ao analisar a Tabela 6.4, é possível observar que o número de casos efetuados foi maior no TRBP em comparação com o TRBC. Além disso, os resultados obtidos pelo NTRB foram ligeiramente superiores aos do TRBC.

Cabe ressaltar que o tempo total para realizar transferência é no máximo de 10 ciclos de 60 Hz. Nos métodos TRBP e NTRB esse tempo é reduzido devido ao tempo de estabilização, sendo: 9,5 e 9 ciclos, respectivamente. Deste modo, considerando que o tempo do processo é menor para o método do NTRB, pode-se afirmar que o número de casos efetuados seria semelhante entre os dois métodos (TRBP e NTRB) se ambos tivessem a mesma janela de $t_{Atuação}$.

6.5 Comparação quanto ao sucesso de transferência

Embora a Tabela 6.4 forneça informações sobre o número de casos efetuados, é importante destacar que esses não são considerados casos bem-sucedidos devido aos potenciais danos que correntes e torques elevados podem causar aos equipamentos do sistema elétrico. Portanto, para avaliar o sucesso das simulações, foi estabelecido um critério que define I_p máxima de 8 pu e T_p de 6 pu. A Tabela 6.5 apresenta os resultados do número de casos bem-sucedidos para os três métodos.

Tabela 6.5: Resumos dos resultados de simulação por inércia do sistema - sucesso de transferência.

Método	N° de casos bem-sucedidos/efetuados (%)			
	Baixa Inércia	Média Inércia	Alta Inércia	Total
TRBC	98/597 (16%)	174/503 (35%)	298/314 (95%)	570/1414 (40%)
TRBP	904/904 (100%)	598/598 (100%)	269/269 (100%)	1771/1771 (100%)
NTRP	616/627 (98%)	558/558 (100%)	288/288 (100%)	1462/1473 (99%)

Fonte: próprio autor.

Na Tabela 6.5, é possível observar que o número de casos bem-sucedidos foi maior ao utilizar o método de TRBP, que se manteve dentro dos limites seguros em 100% dos casos realizados. Por outro lado, apenas 40% dos casos do método TRBC se mantiveram dentro do limite adotado para o sucesso da transferência. Já o método do NTRB obteve sucesso em 99% dos casos em que a transferência foi efetuada.

7 VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS

Para validar os métodos, utilizou-se o modelo do sistema elétrico da usina nuclear conhecida como APR1400. No contexto da validação de métodos, o modelo da APR1400 é amplamente utilizado em diversas áreas do conhecimento devido à sua relevância e disponibilidade detalhada dos dados. A documentação com informações específicas sobre a certificação de design do APR1400, pode ser encontrada diretamente do site oficial da *U.S. Nuclear Regulatory Commission* [49].

A APR1400 possui um reator de água pressurizada (PWR) avançado desenvolvido pela Korea Electric Power Corporation (KEPCO). O nome APR1400 significa *Advanced Power Reactor 1400* e se refere à sua capacidade de geração de energia elétrica, que é de aproximadamente 1400 megawatts. Essa usina é considerada uma das tecnologias nucleares mais avançadas disponíveis atualmente. Ela foi projetada para fornecer eletricidade de maneira segura, confiável e eficiente, com um foco especial na segurança operacional. Nessa usina utiliza-se a TRB para aprimorar a segurança da instalação.

Neste capítulo, é realizada uma análise de validação dos métodos TRBP e NTRB. Para isso, são simulados vários casos no sistema elétrico da APR1400 incluindo a TRBC. Uma análise complementar é apresentada no Anexo A.

7.1 Descrição do sistema elétrico simulado da usina nuclear APR1400

A APR1400 possui um sistema elétrico que fornece energia para os sistemas auxiliares da usina durante a operação normal, para o sistema de proteção do reator e para os recursos de segurança durante condições anormais e de acidente. O sistema elétrico é composto por um sistema Classe 1E e outro não Classe 1E. O sistema Classe 1E é um sistema de segurança projetado para operar durante situações de emergência, desempenhando funções críticas, como resfriamento do reator e fornecimento de energia para sistemas de segurança. Esse sistema requer redundância, logo a APR1400 possui quatro sistemas Classe 1E redundantes e idênticos, chamados de Trem A, Trem B, Trem C e Trem D [6]. Por outro lado, um sistema não Classe 1E é um sistema que não é classificado como essencial para a segurança nuclear ou não segue

os requisitos rigorosos de segurança.

Para validar os métodos, simulou-se o sistema de 4,16 kV Classe 1E - Trem A, tomando por base informações do Documento de Controle de Projeto (DCP) Nível 2, especificamente do Capítulo 8 - Sistemas Elétricos de Potência [50]. Tal documento fornece detalhes do sistema elétrico da usina suficientes para a modelagem do sistema elétrico.

A Figura 7.1 apresenta um modelo simplificado do sistema 4,16 kV Classe 1E - Trem A da APR1400.

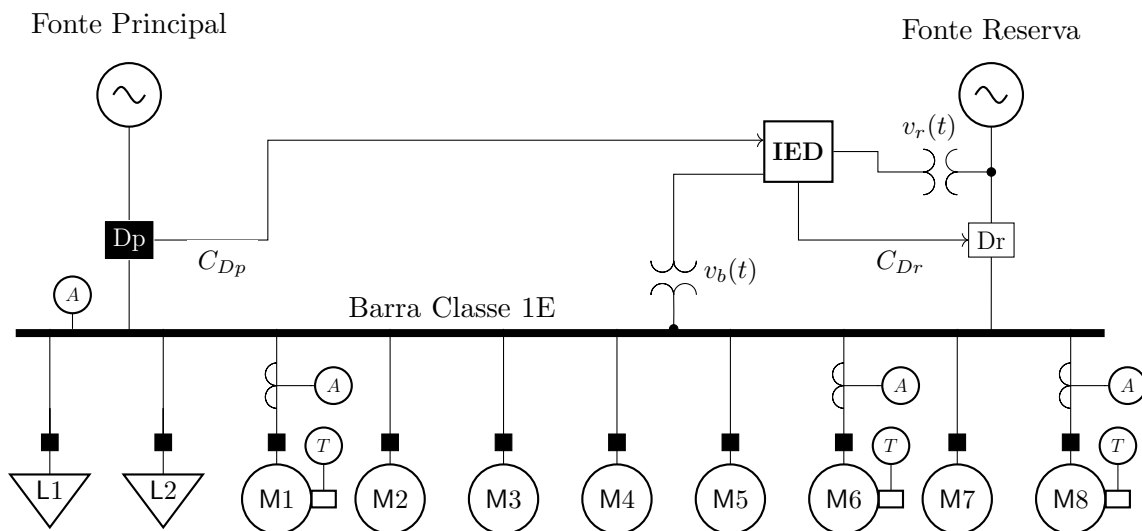


Figura 7.1: Diagrama unifilar simplificado do sistema 4,16 kV Classe 1E - Trem A da APR1400.

Fonte: próprio autor.

O sistema elétrico apresentado na Figura 7.1 é composto por oito motores e duas cargas equivalentes ativas que representam os demais sistemas da usina. No intuito de avaliar o desempenho dos métodos, foram monitoradas as seguintes grandezas após realização da transferência:

- Corrente de pico na barra (I_{pb}): o módulo da corrente máxima desenvolvida na barra Classe 1E após o fechamento do disjuntor da fonte reserva;
- Corrente de pico no motor M (I_{pM}): o módulo da corrente máxima desenvolvida nos terminais do motor M após o fechamento do disjuntor da fonte reserva. Os valores de M assumem o número sequencial do motor, deste modo I_{p1} , I_{p6} e I_{p8} (ver Tabela 7.1);
- Torque pico a pico no motor M (T_{pM}): a diferença entre o pico positivo e o pico negativo de torque desenvolvido no motor após o fechamento do disjuntor da fonte reserva. Os valores de M assumem o número sequencial do motor, deste modo T_{p1} , T_{p6} e T_{p8} (ver Tabela 7.1).

Neste estudo, compreendeu-se que não haveria benefícios significativos em apresentar todas as outras variáveis além dessas. Dessa forma, foram selecionados três motores, representando respectivamente o de menor potência (M1), o de potência média (M6) e o de maior potência (M8). Ainda, para análise de corrente, foi incluída, além dos motores, a corrente na barra. Os resultados relacionados aos motores M1 e M6 são apresentados no Anexo A. Neste estudo, compreendeu-se que não haveria benefícios significativos em apresentar todas as variáveis além dessas.

A Tabela 7.1 apresenta as potências das cargas conectadas ao barramento do sistema 4,16 kV Classe 1E - Trem A da APR1400.

Tabela 7.1: Potências das Cargas 1E conectadas sistema 4,16 kV Classe 1E - Trem A da APR1400

Tag	Cargas Classe 1E	Potência
M1	Bomba de Carregamento	780 hp
M2	Grupo de Ventiladores de Torre de Resfriamento	900 hp
M3	Bomba de Injeção de Segurança	1.000 hp
M4	Bomba de Resfriamento em Parada	1.000 hp
M5	Chiller Essencial	1.100 hp
M6	Bomba de Água de Serviço Essencial	1.248 hp
M7	Bomba de Alimentação Auxiliar Acionada por Motor	1.260 hp
M8	Bomba de Água de Resfriamento de Componentes	2.355 hp
L1	Centro de Carga	2.000 kW
L2	Centro de Controle de Motores	350 kW

Fonte: próprio autor.

O momento de inércia da carga acoplada ao eixo do motor foi calculado como 50% da capacidade máxima para cada motor [51], conforme equação seguinte.

$$J_{carga} = 0,03 \times P^{0,9} \times p^{2,5} \quad (7.1)$$

onde J_{carga} é o momento de inércia da carga acoplada no eixo do motor (kg.m^2); P_n é a potência nominal no eixo do motor (kW); e p é o número de pares de polos.

7.2 Casos de validação

Os casos de simulação foram semelhantes aos apresentados na Seção 5.3.3. Deste modo, foram realizadas todas as combinações desses parâmetros, totalizando 1080 simulações.

7.3 Validação do método de transferência rápida de barras convencional

Nesta seção, analisa-se a aplicação do método TRBC no sistema elétrico da usina nuclear APR1400 considerando os casos da Seção 7.2. A Tabela 7.2 apresenta um resumo dos resultados dos casos efetuados, dentre os 1080 casos simulados para o motor M8.

Tabela 7.2: Resumos dos resultados de simulação APR1400 - TRBC.

Sistema APR1400 - 716 casos efetuados/368 bem sucedidos

Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_{p8})	3,10 pu	11,75 pu	7,95 pu	2,29 pu
Corrente de pico (I_{pb})	3,62 pu	9,42 pu	7,19 pu	1,58 pu
Torque de pico a pico (T_{p8})	4,06 pu	7,05 pu	5,16 pu	0,79 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,31 pu	1,12 pu	0,77 pu	0,22 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	18°	94°	55°	20°
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	0 ms	166 ms	82 ms	55 ms

* Tempo entre o sinal de *trip* e o envio do comando para o disjuntor.

** Medidas realizadas no fechamento do disjuntor da fonte reserva.

Fonte: próprio autor.

Na Tabela 7.2, observa-se que dentre os 1080 casos, 716 casos (66%) atenderam aos critérios para realizar a TRBC. Ainda, apresentou uma média de o_{fase} de 55°, diferente do valor de ajuste de 20° no TRBC.

Além disso, os valores máximos de I_{pb} e T_{p8} ultrapassaram os valores considerados seguros (respectivamente 8 pu e 6 pu, ver Seção 6.5), tanto para os valores de corrente no motor M8, corrente na barra e torque em M8. Dentre os 716 casos, apenas 368 foram bem-sucedidos (cerca de 51% dos casos efetuados).

7.4 Validação do método de transferência rápida de barras com predição

Nesta seção, analisa-se a aplicação do método de TRBP no sistema elétrico da usina nuclear APR1400 considerando os casos da Seção 7.2. A Tabela 7.3 apresenta um resumo dos resultados dos casos efetuados, dentre os 1080 casos simulados.

Tabela 7.3: Resumos dos resultados de simulação APR1400 - TRBP.

Sistema APR1400 - 857 casos efetuados/857 bem sucedidos

Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_{p8})	1,89 pu	4,83 pu	3,45 pu	0,64 pu
Corrente de pico (I_{pb})	2,08 pu	4,21 pu	3,28 pu	0,54 pu
Torque de pico a pico (T_{p8})	2,80 pu	4,43 pu	3,80 pu	0,40 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,43 pu	0,78 pu	0,63 pu	0,08 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	16°	9°	4°
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	9 ms	166 ms	94 ms	46 ms

* Tempo entre o sinal de *trip* e o envio do comando para o disjuntor.

** Medidas realizadas no fechamento do disjuntor da fonte reserva.

Fonte: próprio autor.

Na Tabela 7.2, observa-se que dentre os 1080 casos, 857 casos (79%) atenderam aos critérios para realizar a TRBP, obtendo sucesso em 100% dos casos (os valores máximos de I_{pb} e T_{p8} mantiveram-se dentro dos limites seguros, respectivamente 8 pu e 6 pu, Seção 6.5). Ainda, apresentou uma média de diferença de fase de 9°, não ultrapassando 16°.

7.5 Validação do método do novo critério de transferência rápida de barras com predição

Nesta seção, analisa-se a aplicação do método NTRB no sistema elétrico da usina nuclear APR1400 considerando os casos da Seção 7.2. A Tabela 7.4, apresenta um resumo do resultado dos casos efetuados para o ajuste $th_{RMSE} = 0,25$ pu.

Tabela 7.4: Resumos dos resultados de simulação APR1400 - NTRB com ajuste $th_{RMSE} = 0,25$ pu.

Sistema APR1400 - 133 casos efetuados/133 bem sucedidos				
Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_{ps})	2,01 pu	4,03 pu	2,92 pu	0,45 pu
Corrente de pico (I_{pb})	2,12 pu	3,47 pu	2,64 pu	0,29 pu
Torque de pico a pico (T_{ps})	2,85 pu	4,09 pu	3,31 pu	0,29 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,45 pu	0,57 pu	0,51 pu	0,03 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	8°	5°	2°
RMSE (o_{rms}) **	0,18 pu	0,26 pu	0,21 pu	0,02 pu
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	17 ms	51 ms	30 ms	11 ms

* Tempo entre o sinal de *trip* e o envio do comando para o disjuntor.

** Medidas realizadas no fechamento do disjuntor da fonte reserva.

Fonte: próprio autor.

Na Tabela 7.4, observa-se que dentre os 1080 casos, apenas 133 casos atenderam aos critérios para realizar a TRB, ou seja, cerca de 12%. No entanto, dentre os casos efetuados todos realizaram a transferência com segurança (dentro dos valores limites de corrente e torque). Ainda, apresentou uma média de diferença de fase de 5° e corrente máxima menor que 3,5 pu.

O baixo número de casos efetuados ocorreu devido ao sistema elétrico simulado possuir baixa inércia, o que resulta em quedas abruptas de tensão e frequência. Vários fatores podem ocasionar essas quedas, como a quantidade de cargas estáticas em comparação com as cargas rotativas, como motores.

A Figura 7.2 apresenta uma simulação da abertura do disjuntor da fonte principal, mostrando o decaimento da tensão, frequência e RMSE do sistema.

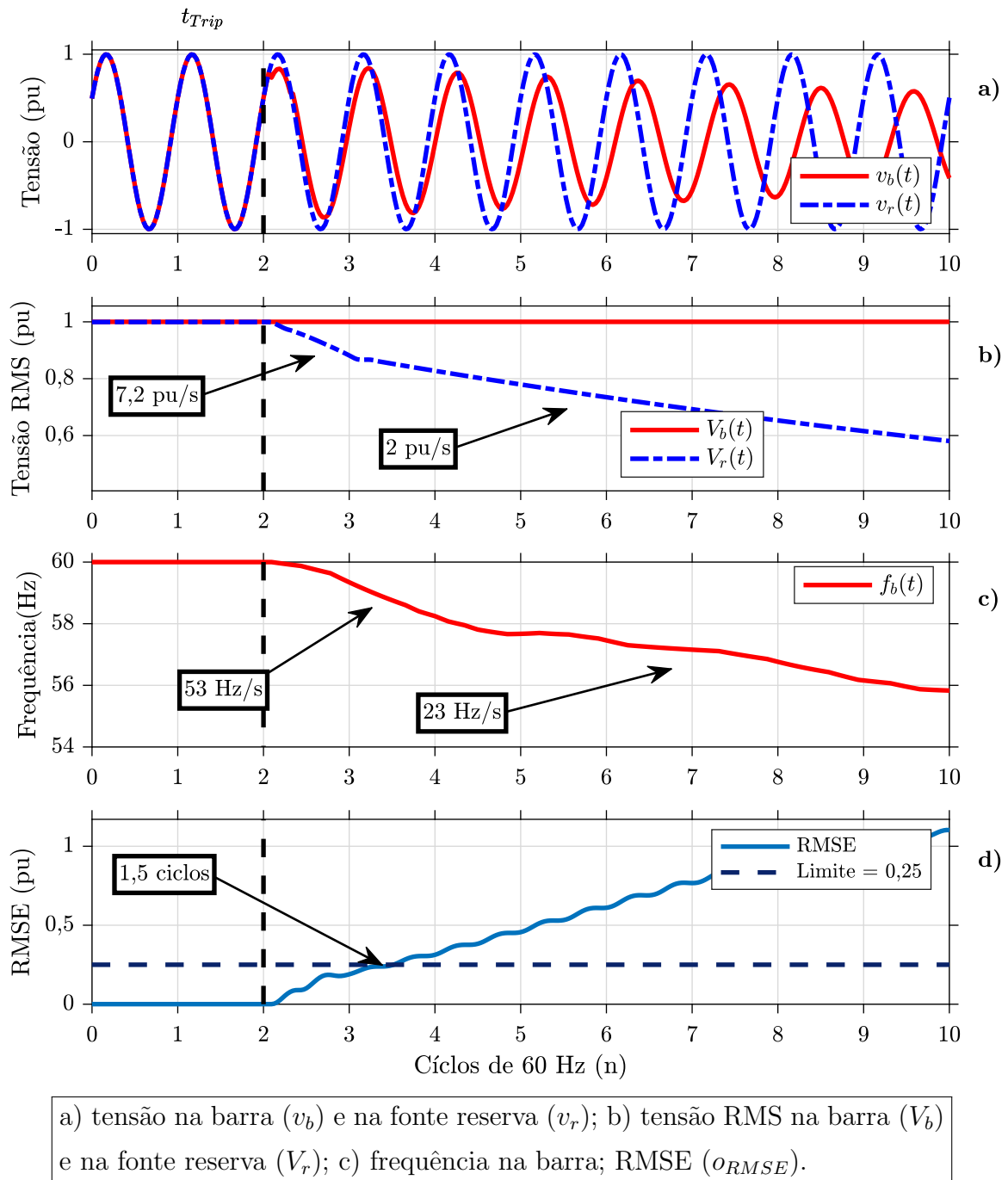


Figura 7.2: Exemplo do decaimento do barramento de motores para o sistema elétrico da APR1400.

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 7.2 que o decaimento de tensão e frequência ao se abrir o disjuntor é de 7,2 pu/s e 53 Hz/s, respectivamente. Esses valores indicam que o sistema elétrico da usina APR1400 possui características de baixa ou muito baixa inércia, conforme [11]. Consequentemente, o valor de RMSE se cresce mais rapidamente, ultrapassando o ajuste de

$th_{RMSE} = 0,25$ pu em apenas 1,5 ciclos. Isso resulta em poucas e rápidas atuações do método.

Considerando a equação 4.7, o RMSE é uma média da diferença ponto a ponto de dois sinais, logo seu cálculo depende diretamente da amplitude e frequência do sinal. Em sistemas com baixa inércia, após o *trip* da fonte principal, as quedas de tensão na barra de motores são mais abruptas, o que resulta em valores iniciais de RMSE menores em comparação com os demais sistemas. Essa diminuição inicial do RMSE reduz a chance da manobra de TRB ocorrer. Portanto, para aumentar as chances de sucesso do método, o limiar th_{RMSE} pode ser ajustado visando obter melhores desempenhos e mantendo a segurança.

As Tabela 7.5 e 7.6 apresentam resultados de simulação para $th_{RMSE} = 0,3$ pu¹ e $th_{RMSE} = 0,4$ pu, respectivamente.

Tabela 7.5: Resumos dos resultados de simulação APR1400 - NTRB com ajuste $th_{RMSE} = 0,3$ pu.

Sistema APR1400 - 303 casos efetuados/303 bem sucedidos

Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_{p8})	2,01 pu	4,77 pu	3,22 pu	0,57 pu
Corrente de pico (I_{pb})	2,02 pu	4,08 pu	2,84 pu	0,41 pu
Torque de pico a pico (T_{p8})	2,82 pu	4,33 pu	3,44 pu	0,31 pu
Taxa V/f (o_{vf}) ^{**}	0,45 pu	0,67 pu	0,56 pu	0,05 pu
Diferença de fase (o_{fase}) ^{**}	0°	12°	7°	3°
RMSE (o_{rms}) ^{**}	0,18 pu	0,31 pu	0,24 pu	0,03 pu
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) [*]	17 ms	86 ms	47 ms	21 ms

* Tempo entre o sinal de *trip* e o envio do comando para o disjuntor.

** Medidas realizadas no fechamento do disjuntor da fonte reserva.

Fonte: próprio autor.

¹O Anexo A discute os resultados dos casos de simulação para o ajuste de $th_{RMSE} = 0,3$ pu

Tabela 7.6: Resumos dos resultados de simulação APR1400 - NTRB com ajuste $th_{RMSE} = 0,4$ pu.

Sistema APR1400 - 830 casos efetuados/830 bem sucedidos

Descrição	Mínimo	Máximo	Média μ	Desvio Padrão σ
Corrente de pico (I_{ps})	2,01 pu	5,96 pu	3,74 pu	0,72 pu
Corrente de pico (I_{pb})	2,02 pu	5,02 pu	3,33 pu	0,58 pu
Torque de pico a pico (T_{ps})	2,82 pu	5,44 pu	3,85 pu	0,45 pu
Taxa V/f (o_{vf}) **	0,45 pu	0,77 pu	0,64 pu	0,08 pu
Diferença de fase (o_{fase}) **	0°	25°	13°	8°
RMSE (o_{rms}) **	0,18 pu	0,40 pu	0,31 pu	0,06 pu
Tempo de atuação ($t_{Atuação}$) *	17 ms	165 ms	89 ms	46 ms

* Tempo entre o sinal de *trip* e o envio do comando para o disjuntor.

** Medidas realizadas no fechamento do disjuntor da fonte reserva.

Fonte: próprio autor.

Ao analisar as tabelas apresentadas, verifica-se um aumento no número de casos efetuados. Além disso, todos os casos permaneceram dentro dos limites considerados seguros para corrente e torques transitórios. Destacando-se os 830 casos efetuados com sucesso para o ajuste de $th_{RMSE} = 0,4$ pu.

7.6 Considerações sobre a validação dos métodos

O estudo de caso de validação foi realizado com base no sistema elétrico da usina APR1400. A modelagem real dos parâmetros desse sistema permitiu uma avaliação da aplicação dos métodos TRBC, TRBP e NTRB em um caso simulado de uma aplicação real da TRB.

A validação dos métodos propostos mostrou o potencial do método e a segurança da aplicação desses quando comparado com o TRBC.

O método TRBC violou os limites de corrente e torque em 49% dos casos. Já os métodos TRBP e NTRB não ultrapassaram os limites em nenhum caso de validação, mesmo aqueles com ajustes menos restritivos.

Especificamente, o método NTRB apresentou uma baixa taxa de efetividade quando ajustado com $th_{RMSE} = 0,25$ pu. No entanto, mesmo nessa configuração, ele não excedeu os limites de segurança estabelecidos. Ao ajustá-lo com $th_{RMSE} = 0,4$ pu, os resultados foram semelhantes aos obtidos pelo método de TRBP, com valores ligeiramente mais altos para corrente e

torque máximos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A TRB é um procedimento que envolve a comutação rápida de fontes em um barramento de motores. Em caso de falha da fonte principal, o dispositivo de TRB atua com o objetivo de assegurar a continuidade da operação do sistema, transferindo o suprimento de energia para uma fonte reserva saudável. Durante essa transferência, é crucial garantir a integridade dos equipamentos conectados ao barramento, uma vez que estão sujeitos a níveis elevados de correntes e torques transitórios.

Motivado pelas lacunas em diversos aspectos do método TRBC, esse trabalho apresentou duas propostas para algoritmos preditivos aplicados à TRB: 1) A Transferência Rápida de Barras com Predição (TRBP), considerando os critérios TRBC; e 2) Um Novo Critério de Transferência Rápida de Barras com Predição (NTRB), um algoritmo preditivo para TRB considerando um novo critério de TRB. Ambos os algoritmos predizem os sinais de tensão na barra por um tempo equivalente ao tempo de fechamento do disjuntor, para garantir que os critérios sejam atendidos.

Diante dos mesmos cenários de simulação, os novos métodos sugeridos foram comparados com o método TRBC. Os métodos propostos (TRBP e NTRB) apresentaram despenho consideravelmente superior ao método de TRBC. A corrente de pico atingida pelo método TRBP foi cerca de 3 vezes menor que o método TRBC, assegurando uma corrente máxima de 6,8 pu (mantendo-se nos limites de corrente de rotor bloqueado de projeto dos motores de 4 a 8 vezes a corrente nominal a plena carga - IEEE Std 620 [33]). Já o método NTRB, obteve resultados ligeiramente inferiores aos do TRBP atingindo correntes de 8,37 pu e ultrapassando 8 pu em 11 casos. Por outro lado, o TRBC desenvolveu correntes maiores que 20 pu, o que de fato levaria à atuação de proteções do sistema. Quanto ao torque pico a pico, A TRBC assegurou um torque de 7,98 pu; já o TRBP, torques de 5,04 pu e NTRB, torques de 5,96 pu.

Quanto ao tempo de atuação dos métodos, houve uma limitação para os métodos TRBP e NTRB relacionada à estabilização do modelo AR após o *trip* da fonte principal. Essa limitação impõe bloqueios à atuação da transferência de 1/2 ou 1 ciclo de onda, após o sinal de *trip*. Esse fato contribui para aumentar o tempo médio de atuação dos métodos propostos, obtendo tempos de atuação mais lentos que a TRBC. No entanto, cabe considerar que os métodos TRBP e NTRB utilizam a predição do sinal para encontrar o ponto ótimo para o fechamento

do disjuntor da fonte reserva. Sendo assim, esses métodos aguardam o melhor momento para realizar a TRB, aumentando assim o tempo de atuação.

O número de transferências realizadas por cada método foi calculado. No entanto, essas transferências não são consideradas casos bem-sucedidos, uma vez que em alguns casos, as correntes e torques atingem níveis elevados que podem causar danos ao sistema elétrico. Portanto, para avaliar o sucesso dos casos simulados, foi estabelecido um limite máximo de corrente de pico de 8 pu e torque pico a pico de 6 pu. O método TRBC obteve 40% de sucesso nas transferências realizadas, enquanto o NTRB obteve 99% e o TRBP obteve 100% de sucesso.

O estudo de caso de validação foi conduzido utilizando o sistema elétrico da usina APR1400 como base. A modelagem dos parâmetros reais desse sistema possibilitou a avaliação dos métodos TRBC, TRBP e NTRB em uma simulação que representa uma aplicação real da TRB. A validação dos métodos propostos demonstrou o potencial e a segurança desses métodos em comparação com o TRBC.

Submetido aos casos de validação, a TRBC excedeu os limites de corrente e torque em 49% dos casos. Por outro lado, os métodos TRBP e NTRB não ultrapassaram os limites em nenhum dos casos de validação, mesmo com ajustes menos restritivos, no caso do NTRB.

Em particular, o método NTRB obteve baixa taxa de efetividade quando ajustado com $th_{RMSE} = 0,25$ pu, entretanto, não ultrapassou os limites de segurança. Quando ajustado com $th_{RMSE} = 0,4$ pu, obteve resultados próximos do método TRBP, com corrente e torque máximos ligeiramente superiores.

Em termos gerais, o método TRBP demonstra os melhores resultados em comparação com os outros métodos discutidos neste trabalho. Ainda que utilize de critérios semelhantes aos utilizados na indústria, porém com limites mais restritivos. Por outro lado, o método NTRB introduz um novo critério baseado no RMSE e apresenta baixo custo computacional. Os métodos propostos de TRB mostram resultados promissores, reduzindo efetivamente as correntes transitórias em aproximadamente três vezes e aumentando, em até 60%, a chance de sucesso na transferência.

Uma característica importante dos métodos TRBP e NTRB são que eles se adaptam a qualquer sistema que requer TRB, visto que têm como referência apenas o sinal de tensão. Deste modo, a aplicação dos algoritmos dispensam os estudos requeridos pelas normas nucleares apresentados na Seção 3.1.

Além disso, essas metodologias têm um alto potencial de aplicação na categoria de TRB conhecida como “Transferência em Fase”, que foi apresentada no Capítulo 2. Nessa categoria,

utiliza-se a supervisão do ângulo de fase, nível de tensão e frequência do barramento de motores, assim como ocorre na metodologia TRBC.

Finalmente, os métodos propostos neste estudo demonstraram um desempenho notável, alcançando seu objetivo primordial de garantir a segurança das instalações, especialmente aquelas com requisitos rigorosos de segurança. Essas abordagens são de particular importância em ambientes no qual a disponibilidade contínua de energia é crucial para evitar acidentes graves. Dessa forma, esses métodos apresentam uma contribuição significativa tanto para a eficiência financeira quanto para a segurança da vida humana, quando aplicados aos processos industriais de alto risco.

ANEXO A – RESULTADOS DOS CASOS DE VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS

Neste anexo, é apresentada uma análise simplificada dos casos de validação do Capítulo 7. O processo de avaliação dos resultados foi restrito a apenas três motores, suficientes para evidenciar as conclusões deste estudo. Dessa forma, foram selecionados três motores, representando respectivamente o de menor potência (M1), o de potência média (M6) e o de maior potência (M8). Ainda, para análise de corrente, foi incluído, além dos motores, a corrente na barra.

É fundamental ressaltar que as medições das variáveis são apresentadas no momento em que o disjuntor foi fechado. As medições da corrente de pico e do torque de pico a pico são realizadas após o fechamento do disjuntor.

A.1 Validação do método de transferência rápida de barras convencional

Nesta seção, analisa-se o sistema TRBC da APR1400 considerando os casos da Seção 7.2.

A.1.1 Análise das correntes e torques transitórios

Utilizou-se dos casos simulados no qual a TRBC foi efetuada para verificar a relação entre as variáveis monitoradas e a corrente de pico e torque de pico a pico durante a transferência.

A Figura A.1 apresenta a relação entre os torques de pico a pico e o_{vf} , dentre os casos efetuados.

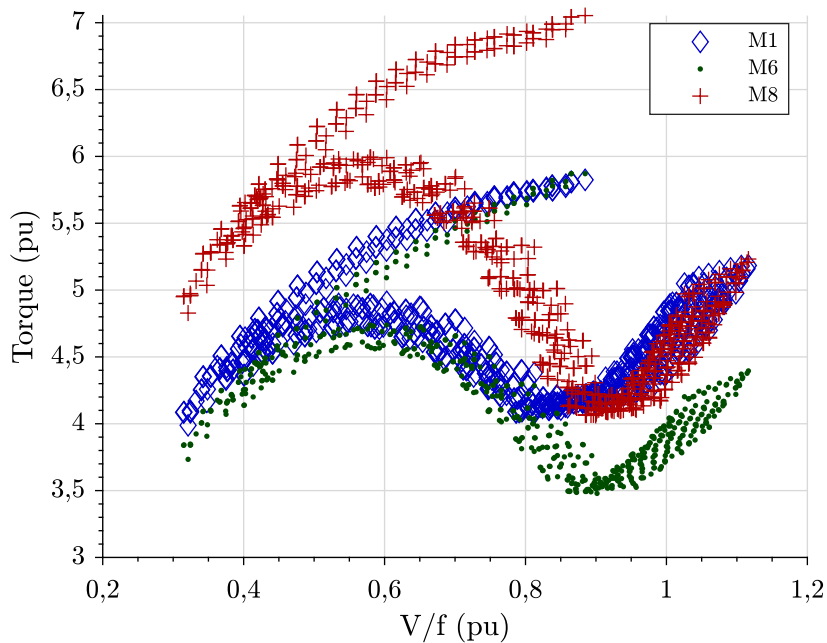


Figura A.1: Relação entre a taxa V/f e os torques transitórios - Análise da TRBC.

Observa-se na Figura A.1 que nenhum dos casos ultrapassa o limite de 1,33 pu da taxa V/f . No entanto, o torque de pico a pico ultrapassa o valor máximo de 6 pu, obtendo 7,05 pu com taxa V/f de $o_{vf} = 0,88$ pu, para o motor M8 (2.355 hp).

A Figura A.2 apresenta a relação entre os torques transitórios de pico a pico e a o_{fase} , dentre os casos efetuados.

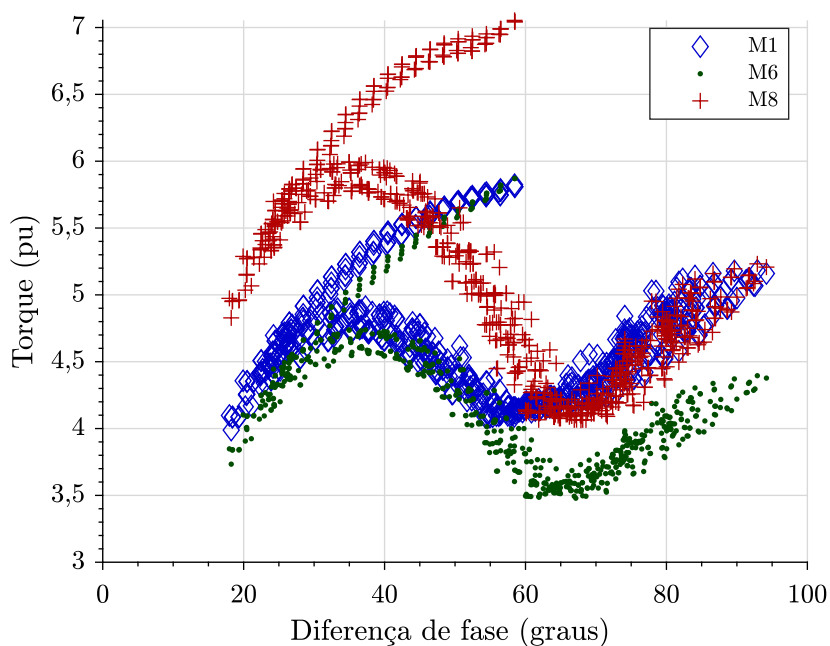


Figura A.2: Relação entre a diferença de fase e os torques transitórios - Análise da TRBC.

Observa-se na Figura A.2 que diversos casos ultrapassaram o limite de $|o_{fase}| < 20^\circ$ no instante do fechamento do disjuntor. Ainda, obteve-se que o torque de pico a pico máximo ocorreu $o_{fase} = 60^\circ$, para o motor M8 (2.355 hp).

A Figura A.3 apresenta a relação entre as correntes de pico e o_{vf} , dentre os casos efetuados.

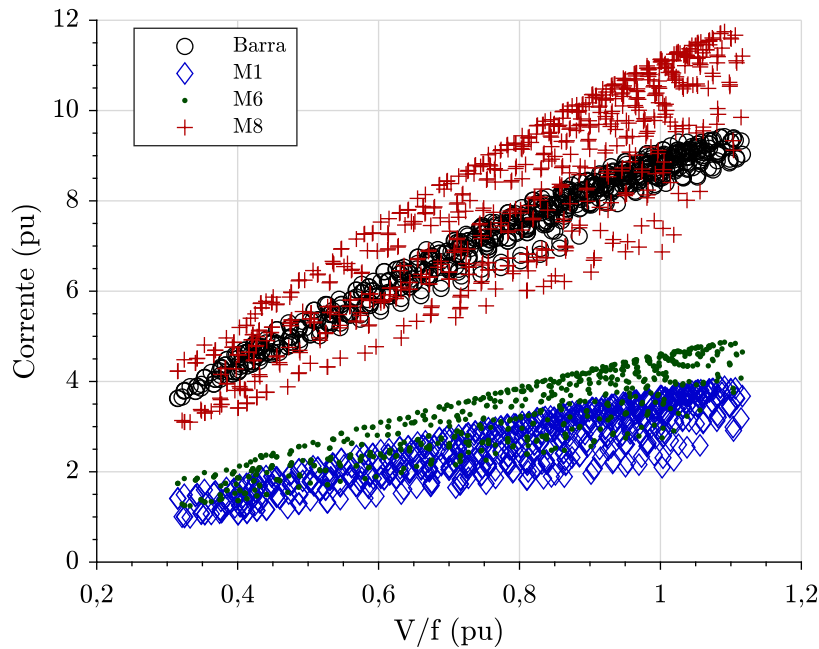


Figura A.3: Relação entre a taxa V/f e as correntes de picos - Análise da TRBC.

Observa-se na Figura A.3 que nenhum dos casos ultrapassa o limite de 1,33 pu da taxa V/f . No entanto, obteve-se I_{pb} de 9,42 pu na barra e I_{p8} de 11,45 pu no motor M8. Os demais motores, por sua vez, mantiveram-se no limite de 6 pu. Além disso, existe uma relação aproximadamente linear entre o_{vf} e as correntes de pico.

A Figura A.4 apresenta a relação entre as correntes de pico e o_{fase} , dentre os casos efetuados.

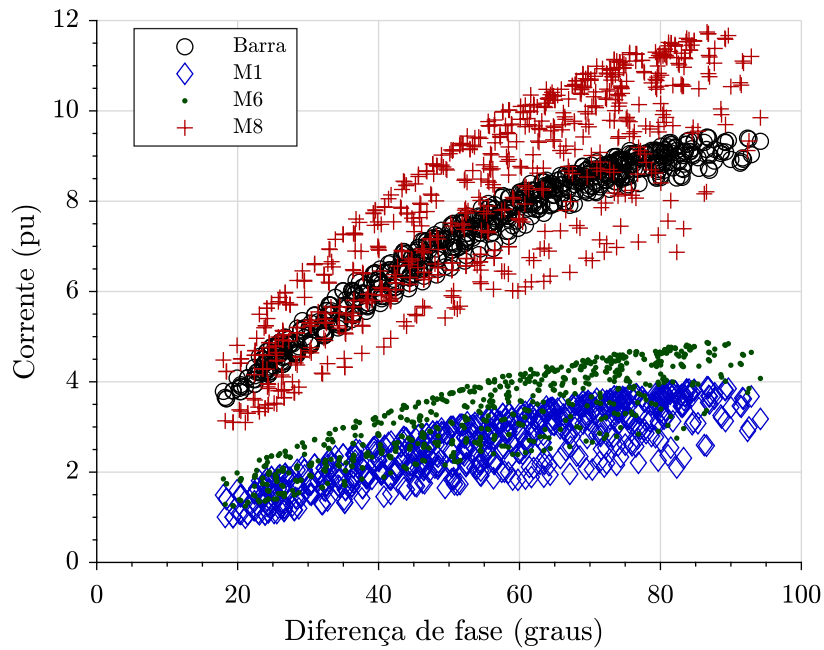


Figura A.4: Relação entre a diferença de fase e as correntes de pico - Análise da TRBC.

Observa-se na Figura A.4 que diversos casos ultrapassaram o limite de $|o_{fase}| < 20^\circ$ no instante do fechamento do disjuntor. Ainda, obteve-se que o corrente máximo ocorreu $o_{fase} = 86^\circ$ tanto para a barra quanto para o motor M8. Além disso, nota-se que existe uma relação aproximadamente linear entre a o_{fase} e a corrente transitório máximo.

A Figura A.5 apresenta a relação entre o tempo de atuação (tempo entre o *trip* e o comando do disjuntor, equação 5.1) e o ângulo da fonte reserva, dentre os casos efetuados.

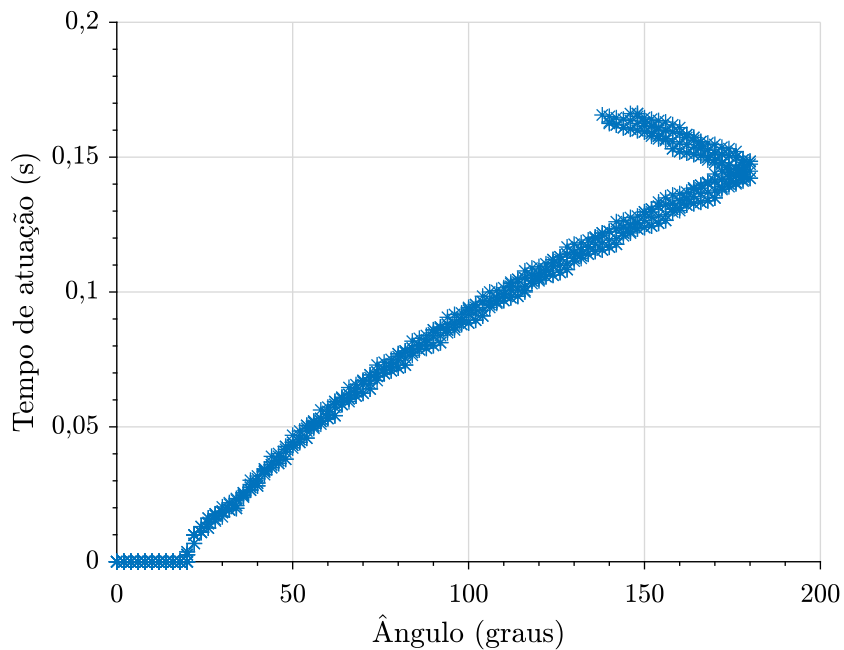


Figura A.5: Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - Análise da TRBC.

Nota-se na Figura A.5, que a atuação é imediata para ângulos da fonte entre -20° e 20° pois o critério de diferença angular e os demais critérios são facilmente atendidos para esse ângulo inicial da fonte reserva.

A Figura A.6 apresenta a relação das duas variáveis calculadas no instante do fechamento do disjuntor da fonte reserva, o_{vf} e o_{fase} , dentre os casos efetuados.

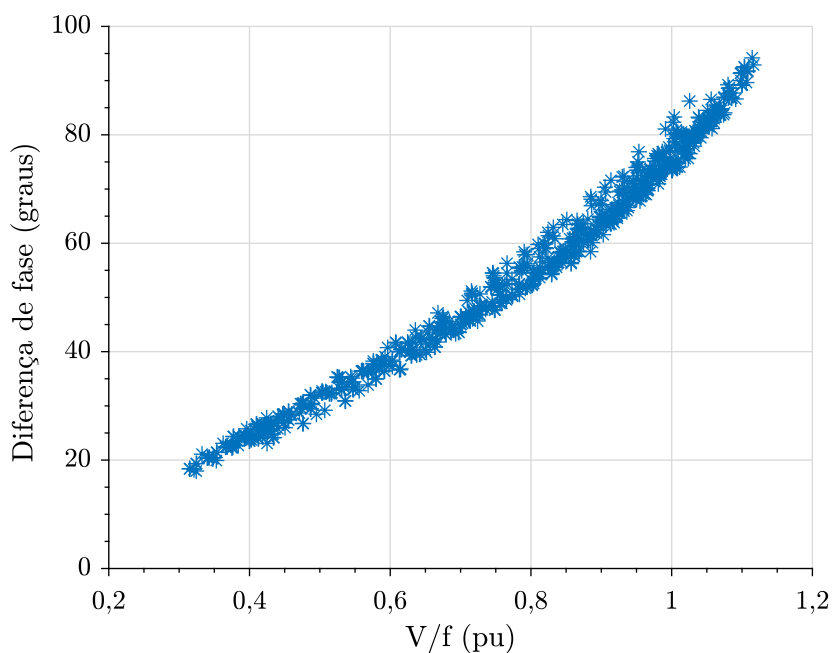


Figura A.6: Relação entre a taxa V/f e a diferença de fase - Análise da TRBC.

Nota-se na Figura A.6 que existe uma relação aproximadamente linear entre a o_{vf} e o_{fase} .

A.2 Resultados dos casos de validação do método transferência rápida de barras com predição

Nesta seção, analisa-se o sistema TRBP da APR1400 dado os casos da Seção 7.2.

A.2.1 Análise das correntes e torques transitórios

Utilizou-se dos casos simulados nos quais a TRBP foi efetuada para verificar a relação entre as variáveis monitoradas e a corrente de pico e torque de pico a pico durante a transferência.

A Figura A.7 apresenta a relação entre os torques pico a pico e o_{vf} , dentre os casos efetuados.

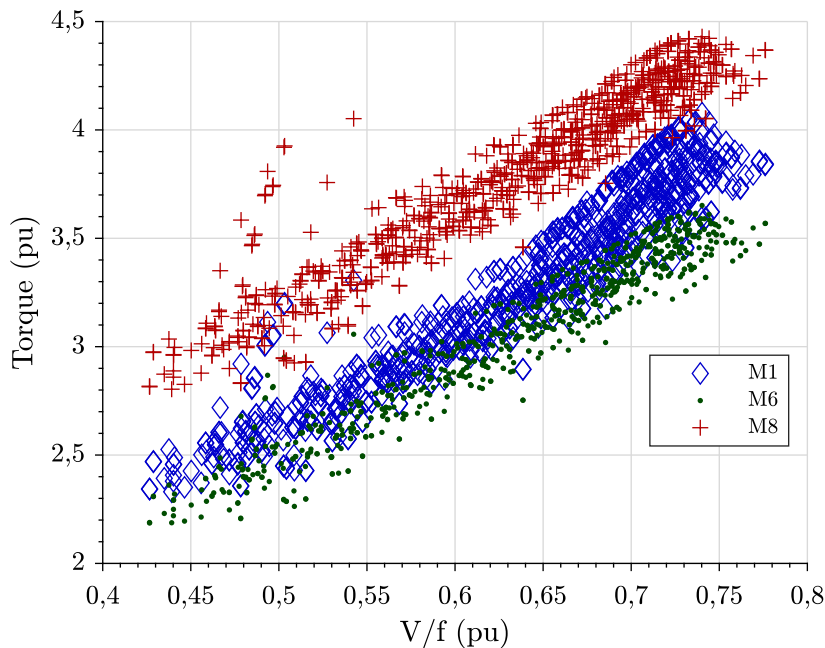


Figura A.7: Relação entre a taxa V/f e os torques transitórios - Validação da TRBP.

Observa-se na Figura A.7 que nenhum dos casos ultrapassa 0,78 pu da taxa V/f , visto que o limiar ajustado para o sinal predito é de 0,8 pu. Além disso, o torque de pico a pico desenvolvido é de 4,43 pu com taxa V/f de $o_{vf} = 0,74$ pu.

A Figura A.8 apresenta a relação entre os torques pico a pico e o_{fase} , dentre os casos efetuados.

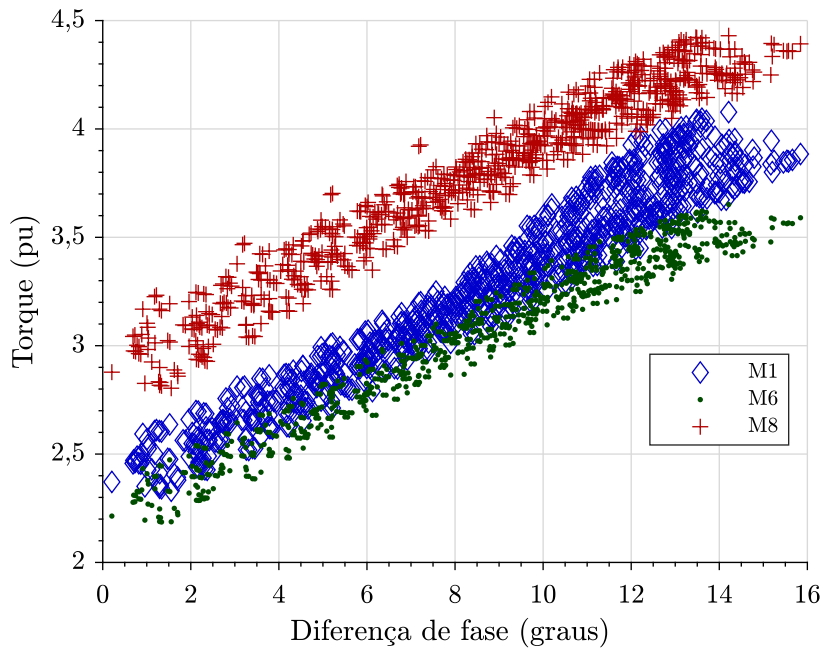


Figura A.8: Relação entre a diferença de fase e os torques transitórios - Validação da TRBP.

Observa-se na Figura A.8 que apesar do limite do critério de diferença de fase (entre a fonte reserva e a barra) ter sido ajustado para $|o_{fase}| < 5^\circ$, no fechamento do disjuntor, alguns casos ultrapassaram esse limite (atingindo 16°), devido aos erros de predição. No entanto, o modelo AR mostra-se contribuir para a melhoria do método quando comparado com a Figura A.2.

A Figura A.9 apresenta a relação entre as correntes de pico e o_{vf} , dentre os casos efetuados.

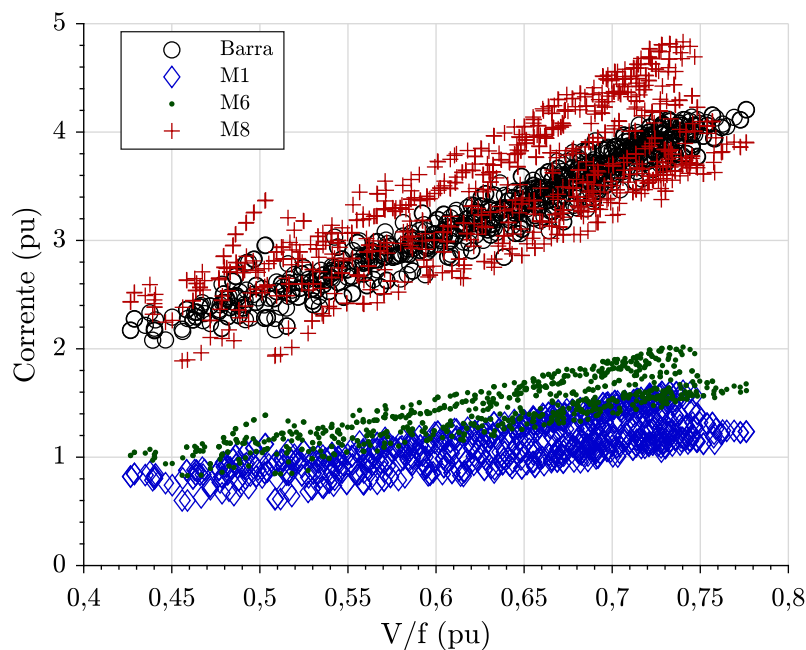


Figura A.9: Relação entre a taxa V/f e as correntes de pico - Validação da TRBP.

Observa-se, na Figura A.9, que foram obtidas correntes de pico de 4,21 pu na barra e 4,83 pu no motor M8, com taxas V/f de $o_{vf} = 0,77$ pu e $o_{vf} = 0,74$ pu, respectivamente.

A Figura A.10 apresenta a relação entre as correntes de pico e o_{fase} , dentre os casos efetuados.

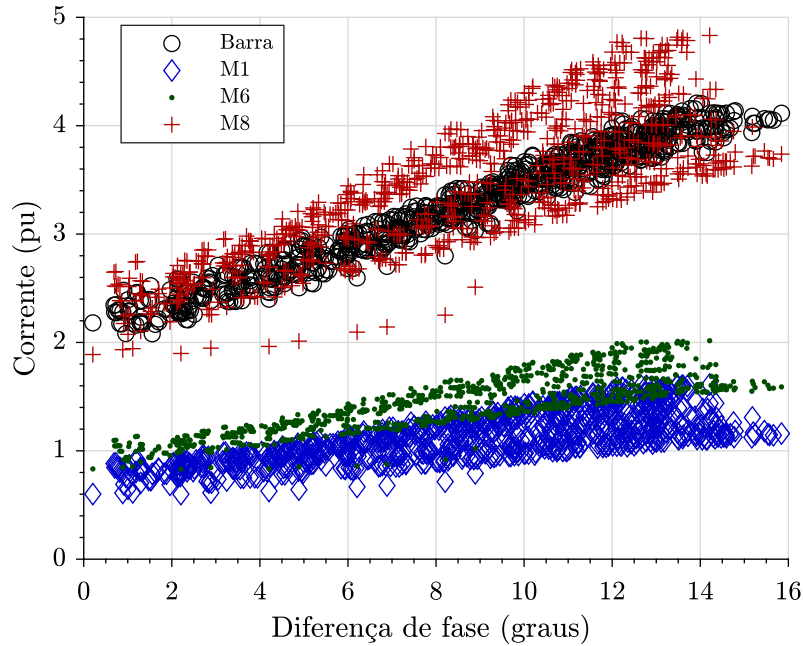


Figura A.10: Relação entre a diferença de fase e as correntes de pico - Validação da TRBP.

Observa-se na Figura A.10, assim como observado na Seção A.2.1, que alguns casos ultrapassaram limite de $|o_{fase}| < 5^\circ$ ajustado para o TRBP.

A Figura A.11 apresenta a relação entre o tempo de atuação (tempo entre o *trip* e o comando do disjuntor, equação 5.1) e o ângulo da fonte reserva¹, dentre os casos efetuados.

¹considera-se que a fonte principal é a referência com ângulo 0°

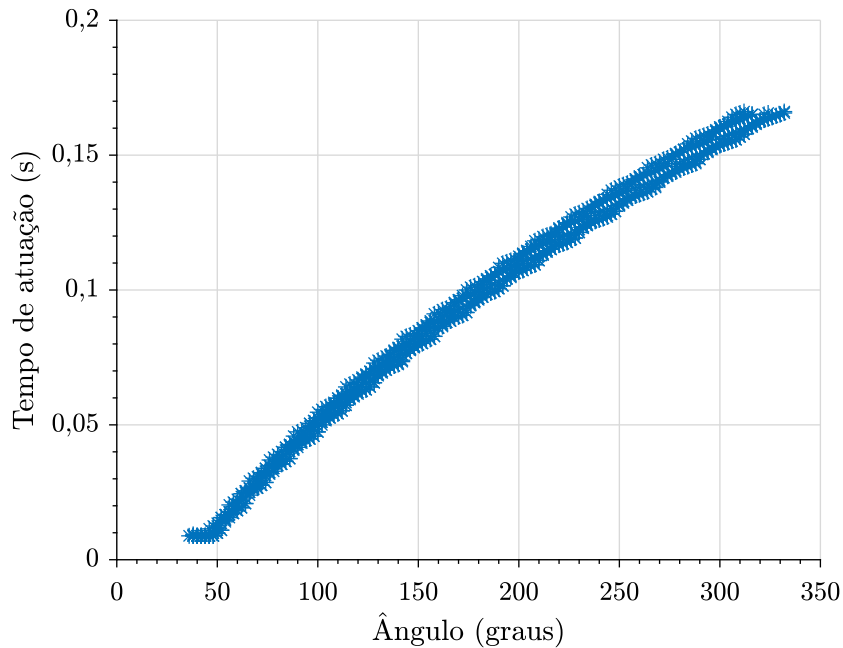


Figura A.11: Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - Validação da TRBP.

Nota-se na Figura A.11 que o algoritmo não atua para tempo menor que $1/2$ ciclo de 60 Hz por estar bloqueado para atuar nesse período, tendo em vista que os erros de predição durante as k_{estab} amostras após o *trip*.

A.3 Resultados dos casos de validação do método novo critério de transferência rápida de barras com predição

Nesta seção, analisam-se os casos de validação aplicando a metodologia do NTRB da APR1400 com ajuste $RMSE\ th_{RMSE} = 0,3$ pu, dado os casos da Seção 7.2.

A.3.1 Análise das correntes e torques transitórios

Utilizou-se dos casos simulados no qual a NTRB foi efetuada para verificar a relação entre as variáveis monitoradas e a corrente de pico e torque de pico a pico durante a transferência.

A Figura A.12 apresenta a relação entre o torque de pico a pico máxima e valor o RMSE, dentre os casos efetuados.

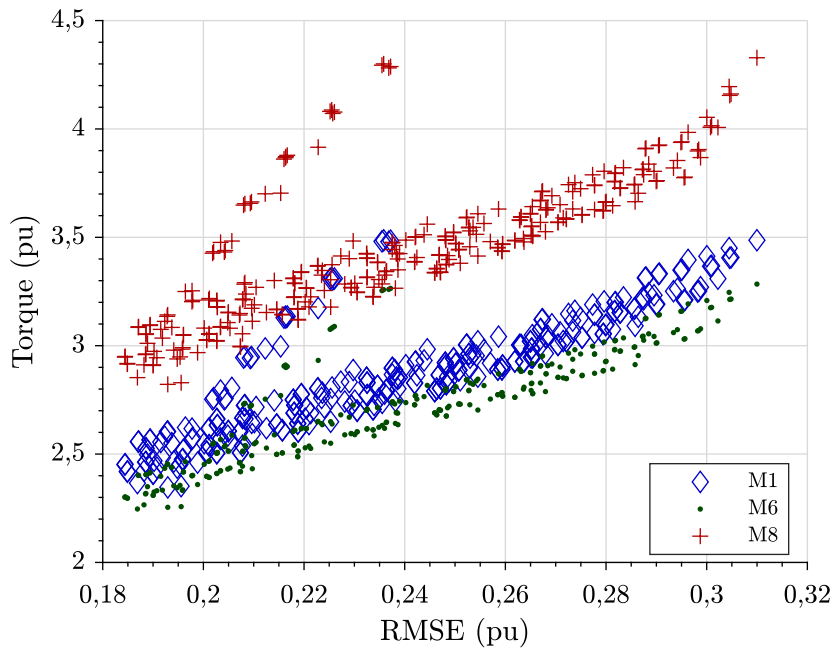


Figura A.12: Relação entre o RMSE e os torques transitórios - Validação do NTRB.

Observa-se na Figura A.12 que alguns dos casos ultrapassaram o limiar de 0,3 pu do RMSE, devido aos erros de predição AR. Além disso, o torque de pico a pico desenvolvido foi de 4,33 pu com o RMSE de $\sigma_{rms} = 0,31$ pu.

A Figura A.13 apresenta a relação entre a corrente de pico e valor do RMSE, dentre os casos efetuados.

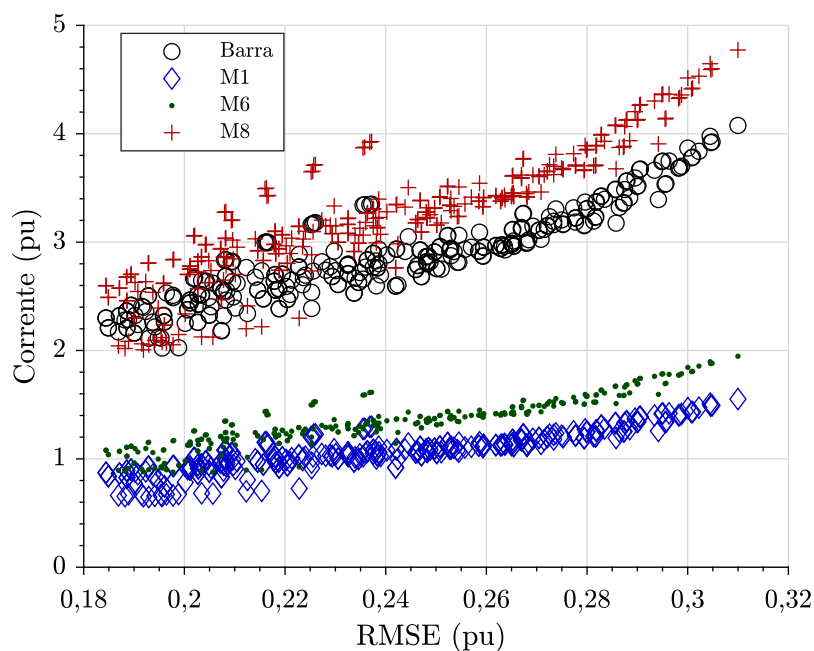


Figura A.13: Relação entre o RMSE e as correntes de pico - Validação do NTRB.

Observa-se na Figura A.12 que a corrente de pico máxima é de 4,08 pu na barra e 4,77 pu no motor, com o RMSE de $o_{rms} = 0,31$ pu em ambos.

A Figura A.14 apresenta a relação entre o tempo de atuação (tempo entre o *trip* e o comando do disjuntor, equação 5.1) e o ângulo da fonte reserva² dentre os casos efetuados.

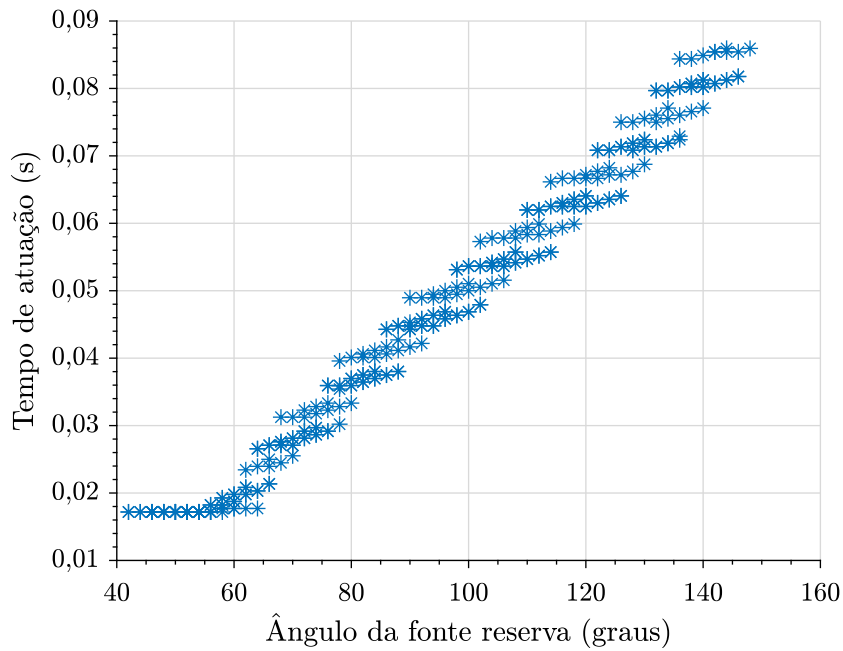


Figura A.14: Relação entre o tempo de atuação e o ângulo da fonte reserva - Validação do NTRB.

Nota-se na Figura A.14 que o algoritmo não atua para tempo menor que 1 ciclo de 60 Hz por estar bloqueado para atuar nesse período, tendo em vista que os erros de predição durante as k_{estab} amostras após o *trip* não são interessantes para a aplicação.

²considera-se que a fonte principal é a referência com ângulo 0°

REFERÊNCIAS

- 1 KHAN, F. I.; ABBASI, S. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *Journal of loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, v. 11, n. 4, p. 261–277, 1998.
- 2 HORNAK, D.; ZIPSE, D. Automated bus transfer control for critical industrial processes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 27, n. 5, p. 862–871, 1991.
- 3 HOLT, M.; CAMPBELL, R. J.; NIKITIN, M. B. *Fukushima nuclear disaster*. [S.l.]: Congressional Research Service Washington, DC, USA, 2012.
- 4 U.S. Nuclear Regulatory Commission. U.S. Code of Federal Regulations, Part 50, Appendix A, General Design Criteria 17 and General Design Criteria 18. *GDC 17*.
- 5 IEEE Standard for Preferred Power Supply (PPS) for Nuclear Power Generating Stations (NPGS). *IEEE Std 765-2012 (Revision of IEEE Std 765-2006)*, p. 1–26, 2013.
- 6 IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations. *IEEE Std 308-2012 (Revision of IEEE Std 308-2001)*, 2013.
- 7 MAZZONI, O. S. *Electrical Systems for Nuclear Power Plants*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018.
- 8 U.S. Nuclear Regulatory Commission. Station blackout. *RG 1.155*, 1988.
- 9 CHANG, C.-K. A new mv bus transfer scheme for nuclear power plants. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, EDP Sciences, v. 1, p. 12, 2015.
- 10 YALLA, M. V. V. S.; BECKWITH, T. R. Expanded field data analysis in support of a torque-based motor bus transfer criterion. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, n. 5, p. 4983–4991, 2018.
- 11 GARDELL, J.; FREDRICKSON, D. Motor bus transfer applications issues and considerations. *J9 working group report to the rotating machinery protection subcommittee of the IEEE-power system relay committee*, 2012.
- 12 PETTIGREW, R. et al. Motor bus transfer. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 8, n. 4, p. 1747–1758, 1993.
- 13 U.S. Nuclear Regulatory Commission and others. *NUREG-0800: Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants (LWR Edition)*. [S.l.], 2007.
- 14 National Electrical Manufacturers Association. Motors and generators. *NEMA Standards Publication MG 1-2006*, 2016.
- 15 POLYPHASE Induction Motors For Power Generating Stations. *ANSI/NEMA C50.41-2012*, 2012.

- 16 INFORMATION Notice No. 91-57: Operational Experience on Bus Transfer. [S.l.], 1991.
- 17 RANJBARI, G.; AKHBARI, M.; KAZEMI, A. Fast motor bus transfer impact analysis in industrial plants, a dynamic perspective. *Electric Power Systems Research*, v. 187, p. 106456, 2020.
- 18 YALLA, M. V. Design of a high-speed motor bus transfer system. In: IEEE. *Conference Record 2009 IEEE Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*. [S.l.], 2009. p. 1–12.
- 19 ZAMANI, M. A.; ZADEH, M. D.; SIDHU, T. S. A compensated dft-based phase-angle estimation for fast motor-bus transfer applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 30, n. 2, p. 569–577, 2014.
- 20 PRASAD, M.; THEIVARAJAN, N. Normal power supply system of a nuclear power plant—modelling and simulation studies for fast bus transfer. In: IEEE. *2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems*. [S.l.], 2011. p. 294–299.
- 21 NILSSON, N. Report on the working group to revise ansi c50.41. In: *IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 1, p. 84–85 vol.1.
- 22 IEEE Guide for AC Motor Protection. *IEEE Std C37.96-2012 (Revision of IEEE Std C37.96-2000)*, p. 1–160, 2013.
- 23 IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM), IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. *IEEE Std 1547.2-2008*, p. 1–217, 2009.
- 24 National Institute of Standards and Technology (NIST). *Time and Frequency from A to Z*. 2016. Disponível em: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/popular-links/time-frequency-z/time-and-frequency-z-p>.
- 25 Siemens. *Multi-function High Speed Motor Bus Transfer 7VU683*. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-4/high-speed-busbar-transfer-device/high-speed-busbar-transfer-siprotec-7vu68.html>.
- 26 SEN, P. C. *Principles of electric machines and power electronics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- 27 International Atomic Energy Agency. SSG-34: Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants. *SSG-34 Specific Safety Guides*, Vienna, 2016. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/10688/design-of-electrical-power-systems-for-nuclear-power-plants>.
- 28 IEEE Standard for Criteria for the Protection of Class 1E Power Systems and Equipment in Nuclear Power Generating Stations. *IEEE Std 741-2017 (Revision of IEEE Std 741-2007)*, p. 1–63, 2017.
- 29 BEST, R. J.; MORROW, D. J.; CROSSLEY, P. A. Effect of loading, voltage difference and phase angle on the synchronisation of a small alternator. *IET electric power applications*, IET, v. 3, n. 6, p. 531–542, 2009.
- 30 BECKWITH, T. R.; MOZINA, C. J. Motor bus transfer system performance testing and the search for a new transfer success criterion. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 53, n. 1, p. 653–659, 2017.

- 31 MURALIMANO HAR, P. et al. Implementation of a microprocessor-based motor bus transfer scheme. In: *2016 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–9.
- 32 Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). *SEL-700BT Motor Bus Transfer Relay - Instruction Manual*. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://selinc.com/api/download/132531/>.
- 33 IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines. *IEEE Std 620-1996*, p. i–, 1996.
- 34 IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book). *IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book]*, p. 1–710, 2001.
- 35 ARMAH, S. K. Preliminary design of a power transmission shaft under fatigue loading using asme code. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 11, n. 1, p. 227–244, 2018.
- 36 TONG, W. *Mechanical design of electric motors*. [S.l.]: CRC press, 2014.
- 37 BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. *Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.
- 38 YALLA, M. V.; VAKILI, A.; BECKWITH, T. R. Calculation of transient torques on motors during a residual voltage motor bus transfer. In: IEEE. *2018 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*. [S.l.], 2018. p. 1–10.
- 39 AHO, T. et al. Torsional excitation upon short-circuit in induction motors-in conventional and high-speed trains. In: TURBOMACHINERY LABORATORY, TEXAS A&M ENGINEERING EXPERIMENT STATION. *Proceedings of the 46th Turbomachinery Symposium*. [S.l.], 2017.
- 40 DARWISH, H. A.; FIKRI, M. Practical considerations for recursive dft implementation in numerical relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 42–49, 2006.
- 41 MCGRATH, B. P.; HOLMES, D. G.; GALLOWAY, J. J. H. Power converter line synchronization using a discrete fourier transform (dft) based on a variable sample rate. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 877–884, 2005.
- 42 FOY, W. H. Position-location solutions by taylor-series estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-12, n. 2, p. 187–194, 1976.
- 43 KAY, S. M. *Modern spectral estimation: theory and application*. Prentice Hall, 1987. Disponível em: libgen.li/file.php?md5=9156df85b4407fd308080530f75e19dd.
- 44 GREVILLE, T. N. E. The pseudoinverse of a rectangular or singular matrix and its application to the solution of systems of linear equations. *SIAM Review*, v. 1, n. 1, p. 38–43, 1959. Disponível em: <https://doi.org/10.1137/1001003>.
- 45 LIU, Z.; LAGANIERE, R. On the use of phase congruency to evaluate image similarity. In: *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 2, p. II–II.

- 46 PONTIUS, R. G.; THONTTEH, O.; CHEN, H. Components of information for multiple resolution comparison between maps that share a real variable. *Environmental and ecological statistics*, Springer, v. 15, n. 2, p. 111–142, 2008.
- 47 WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. *International Journal of Geographical Information Science*, Taylor & Francis, v. 20, n. 1, p. 89–102, 2006.
- 48 Schneider Electric. *Selecting Masterpact MTZ1 Circuit Breakers*. 2020. Disponível em: <https://www.productinfo.schneider-electric.com/masterpact-mtz/5bec4d46347bdf0001da09b7/Masterpact>.
- 49 U.S. Nuclear Regulatory Commission. *APR1400 Design Control Document*. 2018. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/design-cert/apr1400/dcd.html>. Acesso em: 9 de julho de 2023.
- 50 U.S. Nuclear Regulatory Commission. *APR1400 Design Control Document - Tier 2 - Chapter 8 - Electric Power*. 2018. <https://www.nrc.gov/docs/ML1822/ML18228A655.pdf>. Acesso em: 9 de julho de 2023.
- 51 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 17094-1: Máquinas elétricas girantes - parte 1: Motores de indução trifásicos - requisitos. *Rio de Janeiro*, ABNT, 2018.