

MÉTODO SEGURO PARA TRANSFERÊNCIA RÁPIDA DE BARRAS EM USINAS NUCLEARES

A safe method for fast bus transfer in nuclear power plants

Jésus Anício de Oliveira Neto¹ , Lucas Soares Gusman² ,
Giovanni Manassero Junior³ 

Resumo: A Transferência Rápida de Barras (TRB) consiste na comutação rápida de fontes alternadas de energia sem interrupção do fornecimento. Tal transferência é aplicável principalmente em usinas nucleares as quais necessitam de continuidade e disponibilidade de alimentação de energia para manter seus sistemas de segurança nuclear em pleno funcionamento. Diferentemente das fontes de alimentação ininterrupta (ou *no-break*), a TRB utiliza fontes infinitas de potência providas pelas concessionárias de energia e, deste modo, fornece grande disponibilidade de potência para manter, sem restrições, os sistemas de segurança nuclear. Vários estudos e relatórios de usinas nucleares evidenciam que o sistema de TRB convencional apresenta graves falhas de segurança que podem prejudicar o desligamento seguro do reator nuclear. Este trabalho apresenta um método seguro de TRB que prevê os sinais de tensão do barramento, visando minimizar danos nos equipamentos conectados à barra. A predição é feita através de um Modelo Autorregressivo e a Raiz do Erro Quadrático Médio. O método de transferência proposto apresenta resultados promissores que efetivamente reduzem as correntes transitórias em cerca de 3 vezes e obtêm um aumento de até 60% na chance de transferência bem-sucedida.

Palavras-chave: Transferência rápida de barras. Usinas nucleares de potência. Sistemas de segurança. Máquinas elétricas. Dispositivos eletrônicos inteligentes. Modelos autorregressivos.

Abstract: Fast Bus Transfer (FBT) consists of the fast switching of alternate energy sources without supply interruption. Such transfer is mainly applicable in nuclear power plants, which need continuity and availability of energy supply to keep their nuclear safety systems in full operation. Unlike uninterruptible power supplies (or *no-break*), FBT uses infinite sources of power provided by the grid and provides great availability of power to keep nuclear safety systems without power restrictions. Several studies and reports from nuclear power plants show evidence that the conventional FBT system has serious safety flaws that can jeopardize the safe shutdown of nuclear reactors. This work presented a safe FBT method that predicts the bus voltage signals, aiming to minimize damage to the equipment connected to the bus. The prediction is made through a linear Autoregressive Model and the Root Mean Squared Error. The proposed transfer method shows promising results that effectively reduce the transient currents by about 3 times and obtain an increase of up to 60% in the chance of successful transfer.

Keywords: Fast bus transfer. Nuclear power plants. Safety systems. Electrical machinery. Intelligent electronic device. Autoregressive models.

1. Encarregado da Divisão de Engenharia Elétrica na Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha, São Paulo, SP - Brasil. E-mail: jesus.oliveira@marinha.mil.br

2. Ajudante da Seção de Estudos e Simulações na Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha, São Paulo, SP - Brasil. E-mail: lucas.gusman@marinha.mil.br

3. Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP - Brasil. E-mail: manassero@usp.br

1. INTRODUÇÃO

As usinas nucleares dependem da confiabilidade energética para evitar perdas econômicas e, principalmente, evitar cenários catastróficos de liberação de materiais químicos e radioativos (KHAN; ABBASI, 1998; HOLT; CAMPBELL; NIKITIN, 2021). O desastre nuclear ocorrido na Usina Nuclear de Fukushima é o maior evento histórico em que a indisponibilidade de energia ocasionou a significativa liberação de material radioativo para o meio ambiente (HOLT; CAMPBELL; NIKITIN, 2021).

As usinas nucleares geralmente possuem uma fonte principal e uma fonte reserva. No caso específico das centrais nucleares, a fonte principal provém da sua geração interna, e a reserva, de uma ligação com o sistema elétrico externo (IEEE, 2013a; U.S. NRC, 2021). A Figura 1 apresenta uma simplificação do sistema elétrico de uma usina nuclear.

A fonte reserva não garante o fornecimento seguro de energia se esta não for transferida para o barramento principal de forma segura e rápida. Assim, o sistema de transferência automática de barras (TAB) é altamente

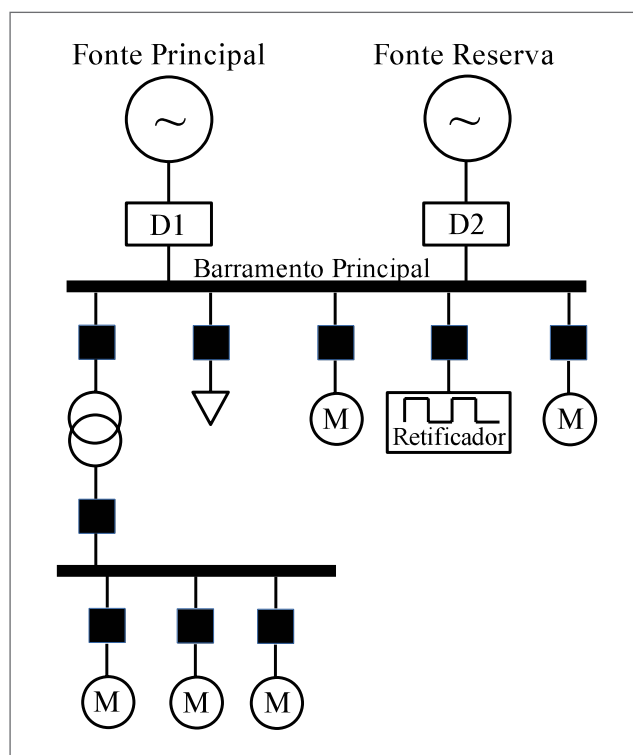


Figura 1. Representação simplificada de um sistema elétrico em uma usina nuclear.

recomendado para manter a segurança das usinas nucleares (IEEE, 2013a; IAEA, 2016) e seus sistemas de segurança em pleno funcionamento.

Após um evento de desligamento da fonte de alimentação principal, o sistema TAB atua para alternar a alimentação do barramento principal para a fonte reserva. Essa transferência garante o fornecimento de energia ininterrupta para cargas críticas de segurança. Além disso, a TAB supervisiona todo o processo para reduzir correntes e torques excessivos durante a transferência, pois transitórios elevados podem danificar diversos equipamentos essenciais à segurança da usina.

O termo TAB pode ser encontrado na literatura de diversas formas. Para indústrias nucleares, o TAB é comumente encontrado como: transferência automática (U.S. NRC, 1988), transferência de barras (U.S. NRC, 1988; CHANG, 2015), transferência automática de barras (IEEE, 2013b; IAEA, 2016). Em aplicações gerais, é encontrado como *Motor Bus Transfer* (PETTIGREW *et al.*, 1993; YALLA; BECKWITH, 2018). Os métodos de TAB são basicamente divididos em faixas de tempo de atuação. Dentre os diversos métodos de TAB, o foco deste trabalho é a transferência rápida de barras (TRB). Esses métodos têm 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.

O sistema TRB é projetado para fornecer fornecimento contínuo ao sistema em processos industriais críticos em usinas nucleares (IEEE, 2012; CHANG, 2015; ZAMANI; ZADEH; SIDHU, 2015). Ele contribui diretamente para evitar perdas econômicas associadas a interrupções de processos, bem como custos operacionais para reinício de processos. Além disso, contribui na proteção da indústria contra riscos de segurança, como interrupções repentinas de processos críticos e desligamento seguro de reatores nucleares (PRASAD; THEIVARAJAN, 2011; CHANG, 2015).

Após o acidente do *Station Blackout* da usina nuclear de Fukushima, as entidades de energia nuclear reafirmaram que as instalações elétricas de uma usina nuclear cumprem um papel de extrema importância na mitigação de acidentes nucleares. Dentre os diversos modos de falha que devem ser analisados no relatório de análise de segurança dessas usinas, a maioria deles envolve falhas no fornecimento de energia, conforme apresentado em U.S. NRC (2007). Uma falha na fonte principal de energia aciona o sistema TRB, na tentativa de transferir a

fonte principal para uma fonte reserva e evitar o desligamento do reator nuclear por falha no fornecimento elétrico. Se o reator for desligado, o processo de reinicialização pode levar cerca de 20 horas (CHANG, 2015). Por outro lado, se ocorrer o processo TRB, este evento pode levar cerca de 50-167ms (ou 3-10 ciclos de frequência do sistema elétrico), sem interrupção de energia e sem complicações de segurança nuclear.

RG 1.155 - *Station Blackout* (U.S. NRC, 1988) estabelece vários requisitos para a operação de uma usina nuclear. Dentre esses requisitos, o TRB é incluído na análise como forma de melhorar a disponibilidade da fonte externa de energia. Por exemplo, estatísticas para qualificar a segurança da rede externa requerem baixas taxas de perda de fonte externa por ano.

Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (DEI) que realizam TRB convencional verificam a diferença angular entre as fontes e a taxa V/f para enviar o comando ao circuito de transferência. Entretanto, isso não garante que a diferença de fase entre as fontes permaneça nessa faixa, pois o disjuntor pode demorar de 3 a 8 ciclos para fechar após receber o comando. Durante todo esse processo, a tensão no barramento do motor sofre uma queda de frequência. O Guia de Proteção de Motor CA IEEE Std C37.96-2000 (IEEE, 2013c) recomenda que o ângulo de fechamento do disjuntor não exceda 90° . O padrão IEEE Std 1547 (IEEE, 2009) para Interconexão e Interoperabilidade de Recursos de Energia Distribuída com Interfaces de Sistemas de Energia Elétrica Associados recomenda que a diferença de fase para realizar um sincronismo entre duas fontes não exceda 20° .

Atualmente, diversos dispositivos de transferência de barras utilizam valores estimados para casos genéricos de baixa, média e alta inércia do grupo de motores conectados ao sistema. Esses ajustes não servem para todos os casos, como visto em (U.S. NRC, 1991) — que apresenta o relato de falhas de TRB em usinas nucleares.

Os principais pontos de atenção retratados no estado da arte são: não existem normas/diretrizes na literatura que incluam critérios seguros para a realização do TRB. Os pesquisadores afirmam que métodos inteligentes e eficazes devem ser desenvolvidos para realizar o TRB com segurança. Além disso, as usinas de energia relatam mau funcionamento do sistema TRB, resultando em falhas de motores relacionadas à segurança nuclear. Por fim, os métodos atualmente utilizados na indústria não consideram o tempo de retardo do disjuntor e,

consequentemente, não garantem o cumprimento dos critérios adequados para evitar danos no processo.

Além disso, ainda há muito a contribuir com o TRB, principalmente no que diz respeito à elaboração de regras de repasse mais consistentes e métodos mais flexíveis que se adaptem a qualquer sistema, sem a necessidade de estudos complexos por parte da equipe de implantação.

Este trabalho tem como foco contribuir para o aprimoramento do TRB. Os principais objetivos são:

- propor um algoritmo preditivo para TRB considerando o tempo de fechamento do disjuntor;
- propor novos critérios adaptados ao sistema preditivo com base no conceito de raiz do erro médio quadrático;
- analisar os transitórios eletromagnéticos de corrente e torque pelos métodos convencional e preditivo;
- verificar a taxa de sucesso da transferência para ambos os métodos.

2. TRANSFERÊNCIA AUTOMÁTICA DE BARRAS

Uma transferência automática de barras (TAB) consiste em transferir automaticamente as cargas elétricas de uma fonte de energia principal para uma fonte reserva, através da utilização de relés e disjuntores. A implementação de cada categoria pode mudar de acordo com o fabricante do dispositivo de transferência. No entanto, o conceito básico e seus requisitos foram definidos pelo IEEE J9 Working Group of the Power System Relay Committee (IEEE, 2012).

A TRB ocorre se a transferência das fontes for feita em um tempo inferior a 10 ciclos da frequência fundamental do sistema (no caso de 60Hz, 167ms). É o preferido para garantir maior confiabilidade e evitar paradas bruscas da usina. Também pode ser caracterizado pelo modo de abertura do disjuntor da fonte principal e fechamento do disjuntor da fonte reserva, sendo sequencial ou simultâneo.

Na transferência simultânea, os dois disjuntores da fonte principal e reserva são acionados ao mesmo tempo. Pode ser potencialmente prejudicial para ambos os geradores, causando curtos-circuitos no barramento principal (PETTIGREW *et al.*, 1993). Este método não requer confirmação da abertura do disjuntor da fonte principal para iniciar a transferência, mitigando atrasos (CHANG, 2015).

Na transferência sequencial, o fechamento do disjuntor da fonte reserva requer a confirmação da abertura do disjuntor da fonte principal, sendo feito em sequência. É uma abordagem mais segura, o que evita a possibilidade de curtos-circuitos. A Figura 2 apresenta a implementação do modo sequencial TRB comumente adotado nos processos industriais ilustrados na Figura 1.

O processo de transferência sequencial ocorre de acordo com as seguintes etapas:

- No instante t_a a fonte principal falha e o comando de abertura é enviado ao disjuntor D1;
- Ao receber o comando de abertura, o disjuntor D1 leva Δt_{d1} para abrir, o que ocorre no instante t_b . Neste momento, a alimentação do barramento principal é interrompida;
- Um sinal de confirmação de abertura para o disjuntor D1 é enviado, recebido e processado durante um período de Δt_p pelo dispositivo TRB até que os critérios de transferência sejam atendidos. Com o cumprimento dos critérios, é comandado o fechamento do disjuntor D2 no instante t_c . O comando de fechamento do disjuntor D2 é realizado supervisionando os critérios TRB;
- Ao receber o comando de fechamento, o disjuntor D2 leva Δt_{d2} para fechar, o que ocorre no instante t_d . Neste momento, a alimentação do barramento principal é fornecida pela fonte reserva.

O tempo entre os instantes t_b e t_d corresponde ao tempo “Barra Morta”, no qual o barramento não recebe energia das

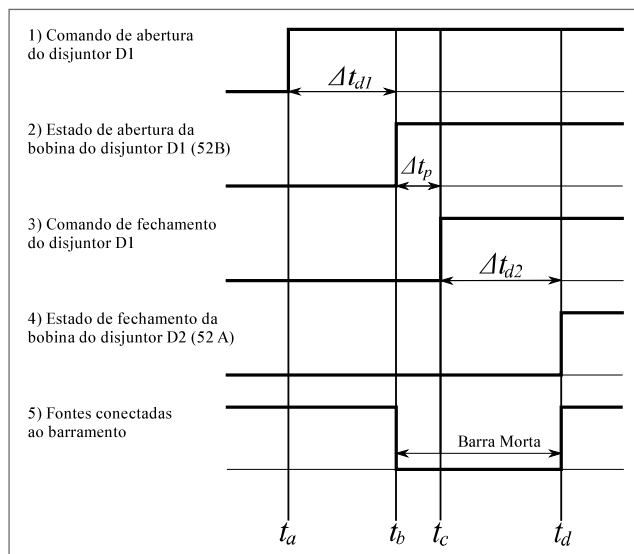


Figura 2. Diagrama TRB em Modo Sequencial.

fontes ativas (geradores ou rede externa). Este artigo foca na transferência rápida de barras no modo sequencial.

2.1. CRITÉRIOS NORMATIVOS

A NEMA/ANSI C50.41 — Motores Polifásicos de Indução para Estações Geradoras (ANSI/NEMA, 2012) define o TRB como a transferência que:

- a) Ocorre em um período inferior a 10 ciclos;
- b) Possui uma diferença angular de tensão entre o barramento principal e a fonte reserva que não pode ultrapassar 90°;
- c) A taxa V/f da tensão do barramento principal não excede 1,33 pu no momento da transferência.

Com relação ao item a) tempo de transferência, observa-se um consenso em adotar 10 ciclos para atuação do TRB (PETTIGREW *et al.*, 1993; IEEE, 2012; CHANG, 2015; IAEA, 2016). Algumas referências restringem o tempo mínimo de transferência, em razão do tempo de fechamento do disjuntor (PETTIGREW *et al.*, 1993; IEEE, 2012), entretanto o tempo máximo de 10 ciclos é mantido.

Quanto ao item b) diferença de ângulo, o IEEE Std C37.96 — Guia para Proteção de Motor CA (IEEE, 2013c) segue a recomendação de que o ângulo de fechamento do disjuntor não exceda 90° para o TRB.

A IEEE Std 1547 — Interconexão e Interoperabilidade de Recursos Energéticos Distribuídos com Interfaces de Sistemas Elétricos de Potência Associados (IEEE, 2009) trata da sincronização regular entre diferentes fontes. Nesta norma, recomenda-se limitar as variáveis controladas ao descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para sincronização das fontes de alimentação com o Sistema Elétrico de Potência.

Parâmetros	Valores		
Potência da Fonte (kVA)	0-500	500-1.500	> 1.500
Diferença de Frequência (Hz)	0,3	0,2	0,1
Diferença de Tensão (%)	10	5	3
Diferença de Fase (graus)	20	15	10

Fonte: IEEE (2009).

Na Tabela 1, o ângulo máximo permitido para sincronização entre as fontes é 20° e a diferença máxima de tensão é 10% para sincronização regular.

Com relação ao item c) o NEMA abandonou o critério da taxa V/f em sua versão de 2014, assumindo que não é suficientemente seguro (IEEE, 2017). Além disso, numerosos trabalhos apresentam uma análise do critério de taxa V/f , reafirmando essa incerteza no processo TRB (HORNAK; ZIPSE, 1991; NILSSON, 1999; PRASAD; THEIVARAJAN, 2011; CHANG, 2015).

Assim, nota-se que nenhuma das diretrizes e normas supracitadas garantem um critério definitivo para o TRB para ampla aplicação em qualquer sistema. Além disso, recomenda e exige das indústrias estudos complexos de seu sistema.

2.2. LIMITES DE CORRENTE E TORQUE NO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA RÁPIDA DE BARRAS

As correntes e torques desenvolvidos no processo TRB são consequências que ocorrem após o fechamento do disjuntor da fonte reserva. Assim, é muito complexo adotar critérios de transferência com base nessas medições, pois é difícil calcular essas quantidades com precisão após a transferência. NEMA/ANSI C50.41 (ANSI/NEMA, 2012) discute que as transferências de barras fora de fase podem atingir correntes e torques variando de 2 a 20 vezes os valores nominais. Este grau de magnitude é função das características elétricas do motor, tempo de comutação, inércia do sistema rotativo, condições de operação, constantes de torção elástica, número de motores no barramento etc.

O artigo (ARMAH, 2018) apresenta uma abordagem abrangente de análise de fadiga para determinar as dimensões iniciais de um eixo de transmissão de potência sob carga de fadiga com base nos códigos da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME). Para tal cálculo, é necessário determinar o fator de segurança (FS) do projeto do eixo. Este fator é multiplicado pelo torque no projeto do eixo, conforme Tong (2014) e Budynas (2016). O FS pode variar de 1,3 a 6, dependendo da confiabilidade e criticidade da aplicação. Para este caso de projeto, o eixo suporta de 3,5 a 6 vezes o torque desenvolvido.

Com relação aos limites de corrente, o IEEE Std 620 — Guia para Apresentação de Curvas de Limite Térmico para Máquinas de Indução em Gaiola (IEEE, 1996) menciona

que em condições de rotor travado, a corrente no enrolamento de motores de indução é de 4 a 8 vezes a nominal corrente em plena carga. A corrente pode ser mantida nesses valores altos por breves períodos ou até que as temperaturas do enrolamento atinjam um valor limite para a ocorrência de danos no isolamento e/ou no enrolamento. Portanto, a cada sobrecarga térmica no motor, sua vida útil é degradada. O IEEE Std 242 — Prática Recomendada para Proteção e Coordenação de Sistemas de Potência Industrial e Comercial (IEEE Buff Book) (IEEE, 2001) apresenta uma tabela de características típicas de motores de indução com corrente de rotor travado de 6 a 10 vezes a corrente nominal, dependendo da classe do motor.

Além disso, o artigo (MURALIMANO HAR *et al.*, 2016) afirma que a literatura não apresenta uma restrição clara quanto ao limite de torque para motores. Neste trabalho, o limite máximo de torque é assumido como 6 pu e o limite máximo de corrente é 8 pu, ambos baseados no máximo absoluto visto na literatura.

3. MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA RÁPIDA DE BARRAS CONVENCIONAL

Para fins de comparação de resultados, foi modelado um sistema Transferência Rápida de barras Convencional (TRBC). Tal sistema considerou o DEI modelo SIPROTEC 7VU683 do fabricante Siemens (SIEMENS, 2019) no modo sequencial.

Para realizar a análise, modelou-se três sistemas elétricos com diferentes características de inércia. Esses sistemas foram submetidos a diferentes cenários de simulação, alterando as principais condições iniciais, com foco no TRB sequencial.

A Figura 3 apresenta a configuração dos sistemas elétricos simulados. Esta configuração tem duas fontes de alimentação AC. A Fonte Principal é normalmente conectada através do disjuntor D_p (normalmente fechado) e a Fonte Reserva é mantida em espera para assumir as cargas do sistema através do D_r (normalmente aberto). O DEI de transferência monitora a tensão do Barramento Principal V_b e a tensão da Fonte Reserva V_r . Além disso, comanda o fechamento do disjuntor D_r durante a transferência.

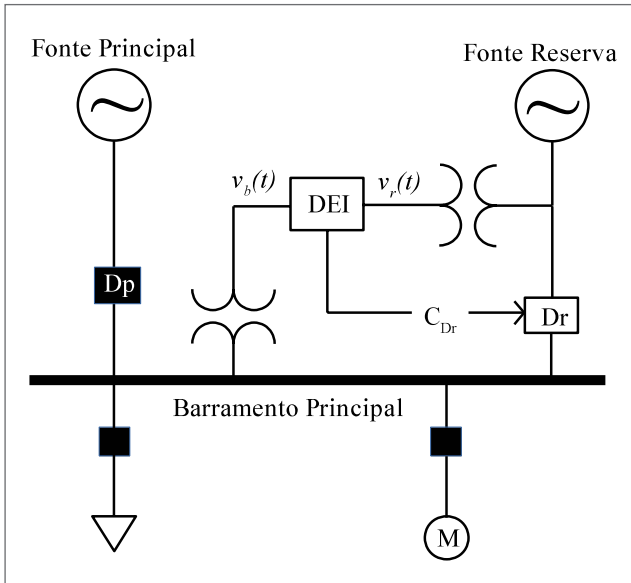


Figura 3. Arquitetura do sistema elétrico simulado.

De acordo com o manual do DEI SIPROTEC 7VU683 (SIEMENS, 2019), o algoritmo implementado no DEI utiliza os seguintes critérios para realizar a transferência rápida:

- Taxa V/f entre a tensão do barramento principal e a tensão da fonte reserva;
- Diferença do ângulo de fase entre a tensão do barramento principal e a tensão da fonte reserva;
- Módulo de tensão do barramento principal;
- Tempo de transferência inferior a 10 ciclos da frequência nominal do sistema.

A NEMA/ANSI C50.41 (ANSI/NEMA, 2012) define a taxa V/f como a diferença vetorial entre: E_M - o quociente de tensão por frequência medida no barramento principal e E_G - o quociente de tensão por frequência medida na fonte reserva, conforme representado pelo diagrama vetorial da Figura 4 e Equação 1.

$$E_R = \sqrt{E_G^2 + E_M^2 - 2 E_G E_M \cos\theta} \quad (1)$$

Em que:

E_M = o valor absoluto do quociente de tensão por frequência no barramento principal, ambos em pu;

E_G = o valor absoluto do quociente tensão/frequência na fonte reserva, ambos em pu;

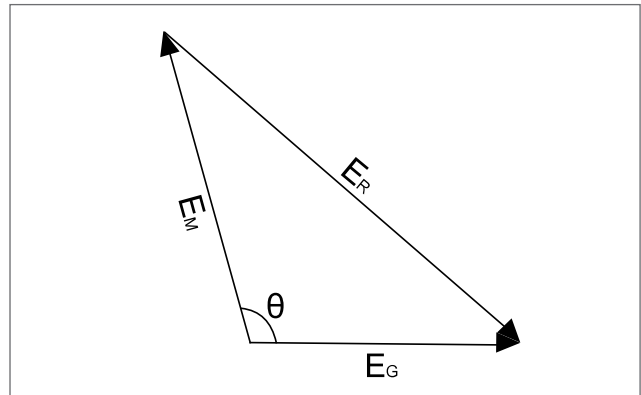


Figura 4. Diagrama vetorial da taxa V/f apresentado pela ANSI C50.41.

θ = o ângulo de fase entre as tensões na fonte reserva e no barramento principal em graus.

A Figura 5 apresenta o DEI simulado com seus respectivos blocos:

- amostragem do sinal;
- cálculo dos parâmetros elétricos;
- verificação dos critérios.

Para tal transferência, o DEI monitora a tensão no barramento principal $V_b(t)$ e na fonte reserva $V_r(t)$ (conforme Figura 5). Esses sinais são filtrados por um filtro anti-aliasing e amostrados, resultando nos respectivos sinais discretos $V_b[k]$ e $V_r[k]$.

Através dos sinais discretos $V_b[k]$ e $V_r[k]$, esses dispositivos processam e calculam as seguintes grandezas:

- O_{vf} , a taxa V/f entre o barramento principal e a fonte reserva. Para calcular O_{vf} é necessário calcular a frequência. Isso é calculado por cruzamento em zero, conforme apresentado em (LIAO, 2011);
- O_{fase} , a diferença de fase entre as duas tensões;
- O_{amp} , o módulo de tensão no barramento dos motores.

4. MÉTODO SEGURO DE TRANSFERÊNCIA RÁPIDA DE BARRAS

Atualmente, as técnicas TRBC adotam critérios que desconsideram o tempo de fechamento do disjuntor. Assim, o

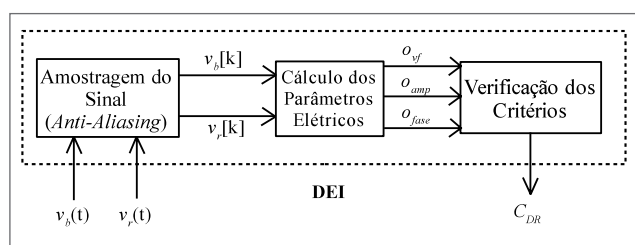


Figura 5. Implementação do TRBC no DEI.

TRB convencional não garante que as condições para a realização da transferência serão mantidas no momento do efetivo fechamento do disjuntor. Este fato pode levar o sistema a uma situação de torque e corrente indesejáveis.

Uma nova metodologia é apresentada para ajustar corretamente o tempo de fechamento do disjuntor prevendo a tensão da barra principal e a tensão da fonte reserva para um período maior que o tempo de atraso do disjuntor da fonte reserva. Esta transferência rápida de barras preditiva (TRBP) atua na amostragem e processamento do sinal e introduz novos critérios para fechar o disjuntor. O critério principal é baseado na Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) em razão de sua efetividade e simplicidade de implementação. Os sinais preditos atendem aos critérios para receber o comando com o avanço necessário para minimizar o excesso de corrente e torque no ponto de fechamento. O algoritmo é apresentado na Figura 6.

Conforme visto na Figura 6, os passos para implementar os métodos propostos são:

- Predição Autorregressiva (AR);
- Cálculo dos parâmetros elétricos;
- Critérios de transferência baseados na Raiz do Quadrado Médio do Erro (REQM).

4.1. PREDIÇÃO AR

Um modelo AR é usado para prever os sinais do barramento principal e da fonte reserva. Este modelo é utilizado para descrever processos variantes no tempo, destacando-se pela simplicidade de implementação por equações de diferenças.

No modelo AR, a variável de saída depende linearmente das amostras anteriores e de termos estocásticos, formando, assim, uma função de transferência. Em geral, para modelar uma série temporal y , pode-se usar a Equação 2, de Yule-Walker (KAY, 1999):

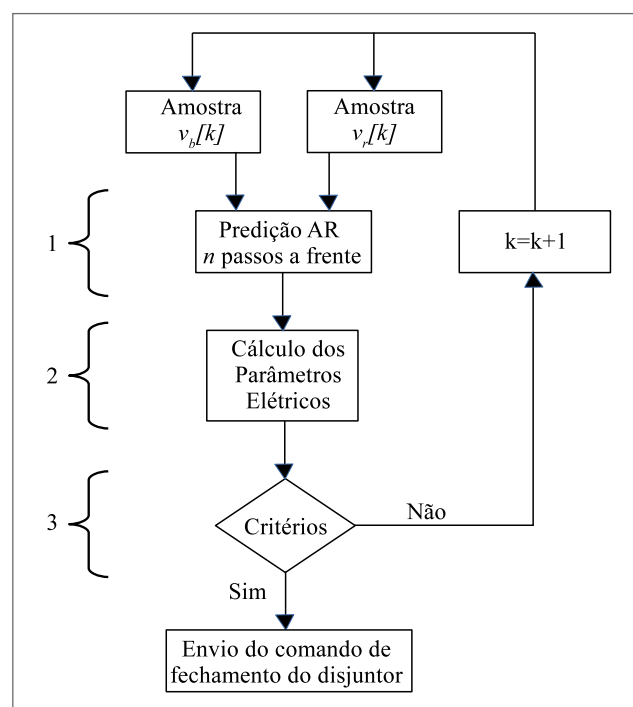


Figura 6. Diagrama da metodologia TRBP proposta.

$$y[k] = a_1[k]y[k-1] + \dots + a_p[k]y[k-p] + e[k] \quad (2)$$

Em que:

$y[k]$ = a k-ésima amostra da série temporal y ;

$e[k]$ = o ruído branco no instante k ;

p = o número de coeficientes AR;

$a_p[k]$ = o coeficiente p do modelo AR calculado no instante k .

A Equação 2 pode ser representada em uma matriz por um modelo AR computacional discreto em Equação 3:

$$\hat{B}[k] = \hat{Y}[k-1]\phi[k] + e[k] \quad (3)$$

Em que:

$B[k]$ = a matriz de saída do modelo AR no instante k com dimensão $m \times 1$;

$\phi[k]$ = a matriz de coeficientes AR calculada no instante k com dimensão $p \times 1$;

$Y[k-1]$ = a matriz precursora de y com dimensão $m \times p$;

m = o número de saídas.

Para obter o modelo AR para os sinais, deve-se obter a matriz com os parâmetros AR $\phi[k]$. Neste artigo, é utilizada uma

solução iterativa de pseudoinversão da matriz (GREVILLE, 1959), a Equação 4:

$$\phi[k] = (Y[k-1]^T Y[k-1])^{-1} Y[k-1]^T B[k] \quad (4)$$

Com este método, o sinal pode ser predito em n passos, conforme desejado. Observe que a matriz B[k] é composta por valores estimados e amostrados de y; assim, para calcular o valor de y[k+2], é necessário calcular o valor de y[k+1]. A precisão da estimativa diminui com o maior número de passos à frente.

Na aplicação em questão, podemos calcular o valor ideal de n através da Equação 5, pois equivale ao tempo médio que o disjuntor leva para fechar após um comando de fechamento.

$$n = (T_{bc} + 1/f) F_s \quad (5)$$

Em que:

T_{bc} = o tempo estimado de fechamento do disjuntor;

f = a frequência nominal do sistema (geralmente 60Hz para o sistema elétrico brasileiro);

F_s = a frequência de amostragem do sistema.

Observe que o tempo de oscilação de f (ou seja, 1/f) foi adicionado no cálculo da previsão do sinal, pois os cálculos de valor efetivo, fase, entre outros, são feitos por janelamentos que apresentam atrasos de um ciclo. Em outras palavras, os valores calculados pelo janelamento no instante k correspondem ao estado do sistema no instante $k - F_s/f$. Com essas considerações, as estimativas mais precisas do estado real do sistema são obtidas.

Num processo dinâmico, a cada nova amostra do sinal y[k], calcula-se a matriz de coeficientes AR $\phi[k]$. Dado $\phi[k]$, a previsão do sinal n passos à frente é calculada de acordo com a Equação 3. Ao final da previsão AR, temos uma matriz com as amostras futuras de y dadas as amostras anteriores a k.

Conforme apresentado na Figura 6, na aplicação em questão, são obtidos dois modelos AR, um para a tensão V_b e outro para V_r . Da mesma forma, obtém-se duas matrizes de coeficientes $\phi[k]$, no instante k, com $\phi_b[k]$ e $\phi_r[k]$ correspondendo a cada um dos as tensões mencionadas. Então, duas matrizes de previsão são obtidas $\hat{B}_b[k]$ e $\hat{B}_r[k]$ n passos adiante, respectivamente.

4.2. RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO

Os sistemas mais comuns de sincronização regular de fontes consideram 4 critérios básicos:

- sequência de fases;
- diferença de amplitude de tensão;
- diferença de fase entre as fontes;
- frequência nominal.

O sincronismo entre fontes busca a maior semelhança entre os sinais de tensão das fontes. Este fato sugere que, quanto mais próximos estiverem os sinais de tensão, menos transitórios altos aparecem no sistema. Assim, os novos critérios utilizados no TRBP buscam uma métrica de similaridade entre ambos os sinais.

O novo critério proposto para o TRBP é baseado no *Root Mean Square Error* (RMSE), em português, Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), utilizado para avaliar a similaridade entre os dois sinais. O REQM foi escolhido por sua simplicidade de implementação e sua proximidade com o algoritmo RMS já presente em DEIs comuns.

O REQM é uma medida frequentemente utilizada para quantificar a diferença entre sinais estimados por um modelo e seus valores observados. O REQM representa a diferença média quadrática de duas variáveis, conforme apresentado na Equação 6 (WILLMOTT; MATSUURA, 2006; PONTIUS; THONTTEH; CHEN, 2007):

$$O_{rms}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k (v_r[i] - v_b[i])^2} \quad (6)$$

Em que:

$V_r[i]$ = a i-ésima amostra de tensão da fonte reserva;

$V_b[i]$ = a i-ésima amostra de tensão da fonte principal;

N = a janela REQM média;

$O_{rms}[k]$ = o residual ou REQM calculado no instante k.

A variável O_{rms} é sempre um valor positivo e, quanto mais próxima de zero, maior 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 Equação 7:

$$N = \frac{F_s}{2f} \quad (7)$$

Em que:

F_s = a frequência de amostragem;

f = a frequência fundamental do sistema.

Essa metodologia denominada transferência rápida de barras preditiva (TRBP) visa encontrar o ponto mínimo do REQ_M predito e enviar o comando com antecedência necessário para fechar o disjuntor da fonte reserva no mínimo REQ_M estimado. As etapas de implementação desta metodologia são descritas conforme apresentado na Figura 6.

4.3. CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS

Nesta etapa, amostras de $k + T_{bc}Fs + 1$ a $k + n$ das matrizes de previsão $\hat{B}_b[k]$ e $\hat{B}_r[k]$ são obtidas, que são as amostras no último ciclo de f Hz do sinal predito (Equação 8):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_r[k + T_{bc}Fs + 1] \\ \hat{v}_r[k + T_{bc}Fs + 2] \\ \vdots \\ \hat{v}_r[k + n] \end{bmatrix}}_{\hat{B}_r[k]} \quad e \quad \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_b[k + T_{bc}Fs + 1] \\ \hat{v}_b[k + T_{bc}Fs + 2] \\ \vdots \\ \hat{v}_b[k + n] \end{bmatrix}}_{\hat{B}_b[k]} \quad (8)$$

De posse das amostras previstas das matrizes \hat{B}_{rm} e \hat{B}_{bm} , calculam-se as grandezas elétricas estimadas: diferença de fase (\hat{O}_{fase}), amplitude de tensão no barramento (\hat{O}_{amp}) e relação V/f (\hat{O}_{vf}). Deve-se notar que as variáveis calculadas (\hat{O}_{fase} , \hat{O}_{amp} e \hat{O}_{vf}) são previsões do estado do sistema em um tempo de T_{bc} à frente. Além disso, o instante de amostra no qual o comando de *trip* do disjuntor da fonte principal, K_{trip} , é armazenado. Usando as matrizes de previsão $\hat{B}_b[k]$ e $\hat{B}_r[k]$, o REQ_M (\hat{O}_{rms}) é estimado por meio da Equação 6 e, ao final, teremos a matriz REQ_M da Equação 9.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{o}_{rms}[k + 1] \\ \hat{o}_{rms}[k + 2] \\ \vdots \\ \hat{o}_{rms}[k + n] \end{bmatrix}}_{REQM[k]} \quad (9)$$

O instante de amostra no qual o comando *trip* do disjuntor da fonte principal é recebido, K_{trip} , também é armazenado.

Os critérios do Método de TRBP são os seguintes:

- $(K_{trip} + K_{estab}) < K < (K + 10Fs/f)$ — limita a duração máxima da transferência (10 ciclos de f) e adiciona K_{estab} amostras de atraso para inicializar a atuação do método em função do tempo necessário para o modelo AR se estabilizar após o disparo.

- $\hat{O}_{rms}[K + T_{bc}Fs/f] < th_{REQM}$ — valor REQ_M no fechamento do disjuntor menor que o limite REQ_M padrão.

Em que:

th_{RMSE} = o limite máximo de REQ_M.

Se esses critérios forem atendidos, um comando de fechamento é enviado ao disjuntor para executar o TRBP. Caso contrário, uma nova amostra de V_b e V_r é recebida para calcular uma nova previsão para a próxima etapa de tempo $k = k + 1$, conforme apresentado na Figura 6.

4.3.1. Ajuste do TRB preditivo

Para calcular os coeficientes dos modelos AR ($\hat{\phi}_r[k]$ e $\hat{\phi}_b[k]$) para 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, foi considerado que um sinal senoidal pode ser modelado com $p = 2$ como $y[K+1] = a_1 y[K] + a_2 y[K-1]$, de acordo com a Equação 10:

$$\text{sen}[wT(k+1)] = a_1 \text{sen}[wT(k)] + a_2 \text{sen}[wT(k-1)] \quad (10)$$

Em que:

w = a frequência do sinal senoidal;

T = o período de amostragem;

k = o instante de amostragem.

Aplicando transformações trigonométricas, obtemos a Equação 11:

$$(1 - a_2) \text{sen}[wTk] \cos[wT] + (1 + a_2) \text{sen}[wT] \cos[wTk] = a_1 \text{sen}[wTk] \quad (11)$$

Por fim, obtemos que $a_1 = 2 \cos(wT)$ e $a_2 = -1$, ou seja, um sinal senoidal pode ser perfeitamente representado por apenas dois coeficientes AR. Assim, $p = 2$ é adotado tanto para o modelo AR de tensões de barra como para a tensão na fonte reserva. Quanto ao número de precursores de AR, usou-se $m = 2p$.

Cabe ressaltar que o sinal V_b não é puramente senoidal, porém, os valores dos coeficientes AR são atualizados a cada nova amostra k . Isso permite uma adaptação dinâmica dos parâmetros de previsão e baixo custo computacional.

5. ESTUDO DE CASO

Para realizar a análise e comparações dos métodos, modelou-se três sistemas elétricos com diferentes características de inércia. Esses foram submetidos a diferentes casos de simulação, variando as principais condições iniciais, focadas na TRB sequencial.

O sistema elétrico simulado é uma simplificação de um sistema industrial de 440 V com uma frequência nominal de 60 Hz. Esses sistemas possuem, cada um, uma carga equivalente e um motor equivalente, conforme apresentado na Figura 3. Os sistemas diferem por sua característica de inércia com valores sugeridos pelo J9 IEEE Working Group (IEEE, 2012) e também (PETTIGREW *et al.*, 1993), conforme apresentado na Tabela 2.

- Modelagem das Cargas e Motores: para a modelagem das cargas e motores, utilizou-se uma carga de 16 kW e motor de indução equivalente com as características mostradas na Tabela 3;
- 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 fabricantes, como apresentado em (SCHNEIDER ELECTRIC, 2020);

Tabela 2. Características de Inércia dos sistemas simulados.

Sistema	Queda de Frequência (Hz/s)
Baixa Inércia	31
Média Inércia	20
Alta Inércia	8,33

Fonte: Pettigrew *et al.* (1993) e IEEE, (2012).

Tabela 3. Características do motor.

Dados	Valor
Potência no eixo	100 HP
Rotação	1760 RPM
Corrente de pico I_p/I_n	7,8
Faixa de tensão de operação	440 V
Corrente nominal de operação	97 A
Momento de inércia	10 kg.m ²

- Variáveis monitoradas: de modo a verificar os critérios normalmente utilizados nos processos de TRB, monitorar-se a tensão na barra principal $V_b(t)$ e da fonte reserva $V_r(t)$. Esses sinais são filtrados por um 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 $V_r[K]$. Além dessas, foram monitoradas: Corrente de pico: valor absoluto da corrente máxima desenvolvida nos bornes do motor após o fechamento do disjuntor da fonte reserva; Torque pico a pico: diferença entre os picos positivos e negativos do torque desenvolvido no motor após o fechamento do disjuntor da fonte reserva;
- Condições iniciais: para obter diversidade nos casos de simulação, variou-se as seguintes condições iniciais: O ângulo da fonte reserva θ_R ; Potência da carga conectada a barra de motores P_C ; Ângulo de abertura do disjuntor da fonte principal θ_d .

6. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados ajustes do método TRBP e os resultados comparativos entre o método TRBP e TRBC.

6.1. AJUSTE DO MÉTODO DE TRBP

No intuito de determinar o valor do th_{REQM} para o método TRBP, foram realizadas simulações não supervisionadas (ou seja, sem nenhum critério pré-definido) no sistema apresentado. Variaram-se as seguintes condições iniciais:

- Ângulo da fonte reserva θ_R de -180° a 180° com intervalos 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 de 0,5 a 10 ciclos de 60 Hz, com intervalos de 0,5 ciclos, ou seja, por meio do *trip* da fonte principal, o disjuntor é fechado com intervalos de 8,33 ms;
- Três tipos de sistemas com inércias de acordo com a Tabela 2. Deste modo, foram realizadas todas as combinações desses parâmetros totalizando 4.320 simulações.

Para o TRBP, também é necessário calcular o número de passos à frente para os modelos AR. Para tanto, o retardo de

atuação do disjuntor é considerado $T_{bc} = 50$ ms conforme folha de dados do fabricante em (SCHNEIDER ELECTRIC, 2020). Assim, conforme a Equação 5, obtém-se $n = 128$, ou seja, 4 ciclos de 60 Hz.

O Guia de Aplicação IEEE para IEEE Std 1547 (IEEE, 2009) recomenda que a diferença de fase para realizar uma sincronização entre duas fontes não exceda 20° . Portanto, a Figura 7 mostra a região em que essa recomendação é atendida.

Na Figura 7, para atender às recomendações IEEE Std 1547, o REQ_M deve ser limitado a $th_{REQM} = 0,25$ pu. A Figura 8 apresenta a região onde o REQ_M é limitado a 0,25 pu.

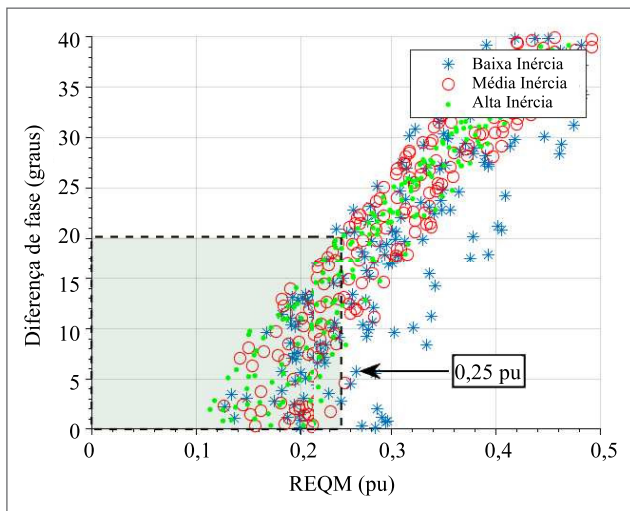


Figura 7. Relação entre REQ_M e diferença de fase: definição do novo critério.

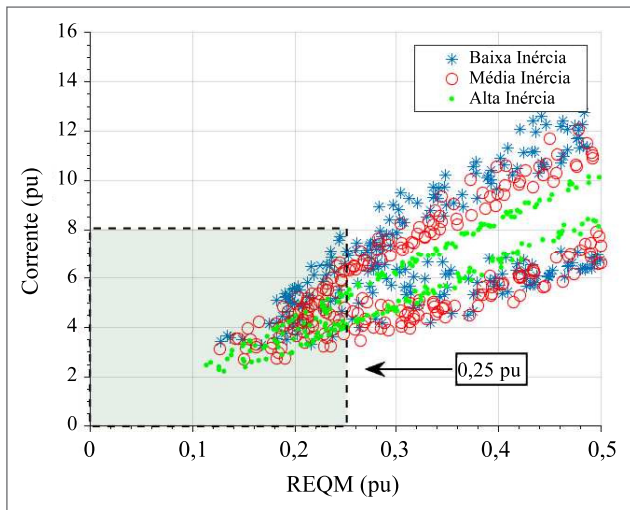


Figura 8. Relação entre REQ_M e corrente de pico: definição de novo critério.

Na Figura 8, ao limitar o REQ_M a 0,25 pu, obtém-se uma corrente de pico de 8 pu. Isso está em conformidade com IEEE Std 620 (IEEE, 1996), que afirma que, sob condições de rotor travado, a corrente no enrolamento pode desenvolver 4 a 8 vezes a corrente nominal em plena carga. Desta forma, os motores são projetados para suportar tal nível de corrente.

A Figura 9 mostra a região onde o REQ_M é limitado a 0,25 pu e o torque pico a pico desenvolvido nas simulações.

Nota-se na Figura 9 que o máximo torque pico a pico desenvolvido é 6 pu, para o limite adotado. A norma (IEEE, 2001) menciona que o torque máximo que uma máquina pode atingir em seu trabalho é 3 pu. Além disso, considera-se o valor conservador de $FS = 2$ para o projeto da máquina (TONG, 2014; BUDYNAS, 2016). Conclui-se que 6 pu (torque máximo \times FS) é um valor aceitável para tal suposição.

Por fim, para este novo critério, adota-se um limite máximo de $th_{REQM} = 0,25$ pu para REQ_M, pois permite que o TRB ocorra em limites aceitáveis de corrente e torque. Ademais, entende-se que, para aplicações específicas, o valor dos limites REQ_M pode ser modificado para obter resultados mais ou menos restritivos.

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

- $K_{estab} = 32$ samples (1 ciclo de 60 Hz);
- $th_{REQM} = 0,25$ pu.

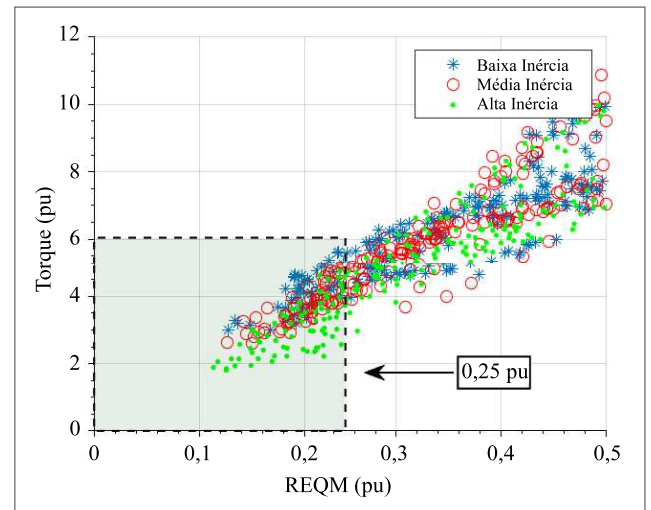


Figura 9. Relação entre REQ_M e torque pico a pico: definição de novo critério.

6.2. RESULTADOS DO MÉTODO TRBP

A validação da metodologia foi realizada por meio dos casos de simulações com condições iniciais diferentes das estipuladas para o ajuste do método, de forma a evitar padronizações nos resultados. As condições iniciais usadas foram:

- Ângulo da fonte reserva \varnothing_R de -180° a 180° com passos de 2° ;
- A potência da carga conectada a barra de motores P_C de 75 e 100% do valor nominal;
- Ângulo de abertura do disjuntor da fonte principal \varnothing_d sendo 0° , 45° e 90° .

Assim, todas as combinações desses parâmetros foram realizadas, totalizando 3.240 simulações.

As figuras de mérito analisadas neste trabalho são: o total de acionamentos bem-sucedidos de cada método; as formas de onda durante um determinado exemplo de atuação de cada método; e a comparação do ângulo de fechamento e torque/corrente para cada método com seus respectivos valores máximos.

Caso exemplo: para exemplificar a aplicação do método TRBP e TRBP, utilizou-se o caso do sistema de alta inércia com as seguintes condições iniciais: $\varnothing_R = -82^\circ$, $P_C = 100\%$ e $\varnothing_d = 90^\circ$

Conforme apresentado na Figura 10, o disparo da fonte principal ocorre em $t_{trip} = 75$ ms. No instante $t_{comando} = 163$ ms, os critérios de transferência são atendidos com uma taxa V/f de $O_{vf} = 0,34$ pu e uma diferença de fase entre a tensão do barramento principal e a tensão da fonte reserva de $O_{fase} = 16^\circ$. Quando o disjuntor fecha em $t_{fechamento}$, a taxa V/f de $O_{vf} = 0,79$ pu permanece na faixa determinada pelo critério TRBC (taxa V/f < 1,33 pu). No entanto, a diferença angular de $O_{fase} = -53^\circ$ excede os valores predeterminados ($|O_{fase}| < 20^\circ$). Imediatamente após o fechamento do disjuntor, a corrente de pico atinge um valor de 15 pu e o torque pico a pico desenvolvido é de 7 pu. Embora os critérios sejam atendidos no momento do envio do comando ($t_{comando}$), eles não são atendidos no momento do fechamento efetivo do disjuntor ($t_{fechamento}$).

A Figura 11 apresenta os sinais de tensão do barramento (V_b), corrente do motor, torque do motor, taxa V/f (O_{vf}) e diferença de fase entre o barramento principal e a fonte reserva (O_{fase}) para o TRBP.

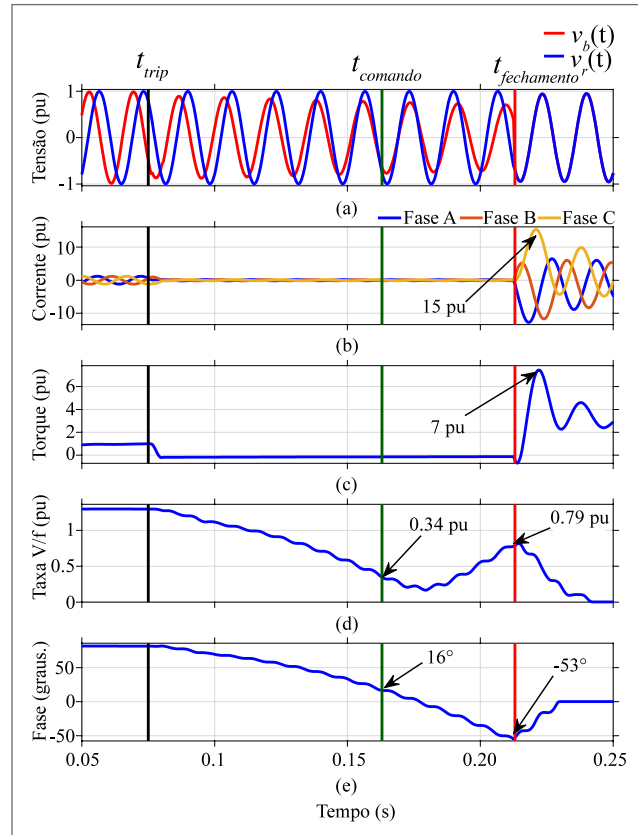


Figura 10. Exemplo de TRBC bem-sucedido. (A) tensão da barra principal (V_b) e tensão da fonte reserva (V_r); (B) corrente do motor; (C) torque do motor; (D) Taxa V/f (O_{vf}); (E) diferença de fase entre a barra principal e a fonte reserva (O_{fase}).

Na Figura 11, o *trip* da fonte principal ocorre em $t_{trip} = 75$ ms, no instante $t_{command} = 127$ ms os critérios de transferência são atendidos. Observe que o valor predito de $REQM$ é $\hat{O}_{REQM} = 0,18$ pu. Quando o disjuntor fecha ($t_{fechamento} = 177$ ms), percebe-se que o $REQM$ é igual ao predito $O_{REQM} = 0,18$ pu, permanecendo no intervalo predeterminado, ou seja, $O_{REQM} < 0,25$ pu. Depois que o disjuntor fecha, a corrente de pico atinge um valor de 4,96 pu e o torque pico a pico desenvolvido 3,91 pu. Para o mesmo caso, aplicando o TRBC, obtve-se pico de corrente cerca de 3 vezes maior (15 pu) e pico de torque 2 vezes maior (7 pu).

Além disso, nota-se que, após o disparo, há instabilidade na previsão da fase $REQM$. No entanto, isso não afeta o resultado, pois foi considerado um tempo de estabilização de 1 ciclo de 60 Hz, $K_{estab} = 32$ amostras.

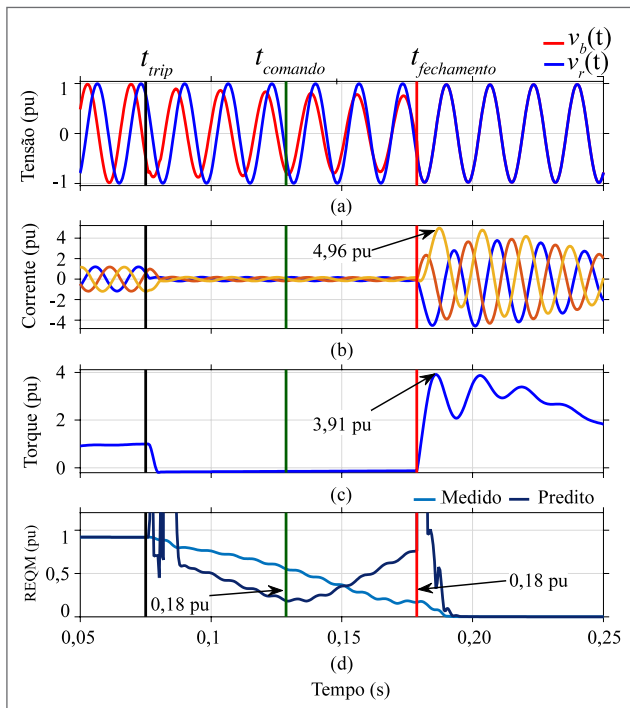


Figura 11. Exemplo de TRBP bem-sucedido. (A) tensão da barra principal (V_b) e tensão da fonte reserva (V_r); (B) corrente do motor; (C) torque do motor; (D) Raiz do erro quadrático médio.

6.3. RESULTADOS GERAIS

Dos 3.240 casos simulados, 1771 casos atenderam os critérios para realizar o TRBP, enquanto 1.414 casos atenderam os critérios para o TRBC, um aumento de cerca de 20%. Embora o controle atue e o TRB ocorra, os limites máximos para as variáveis monitoradas podem ser ultrapassados. Assim, um caso é considerado bem-sucedido quando permanece em uma corrente de pico máxima de 8 pu e um torque pico a pico máximo de 6 pu. A Tabela 4 apresenta o número de acionamentos bem-sucedidos para ambos os métodos.

Na Tabela 4 observa-se que o número de casos de sucesso foi maior no TRBP e 99,25% dos casos realizados ficaram nos limites adotados. Apenas 40% dos casos do método TRBC permaneceram no limite adotado para transferência com sucesso. Há um aumento de cerca de 60% dos casos de sucesso.

A Figura 12 mostra os valores de corrente para cada ângulo de fechamento. São calculados para os sistemas de

Tabela 4. Casos bem-sucedidos dentre os casos efetuados.

Sistema/Método	TRBC	TRBP
Baixa Inércia	98/597	616/627
Média Inércia	174/503	558/558
Alta Inércia	298/314	288/288
Total	570/1414	1462/1473

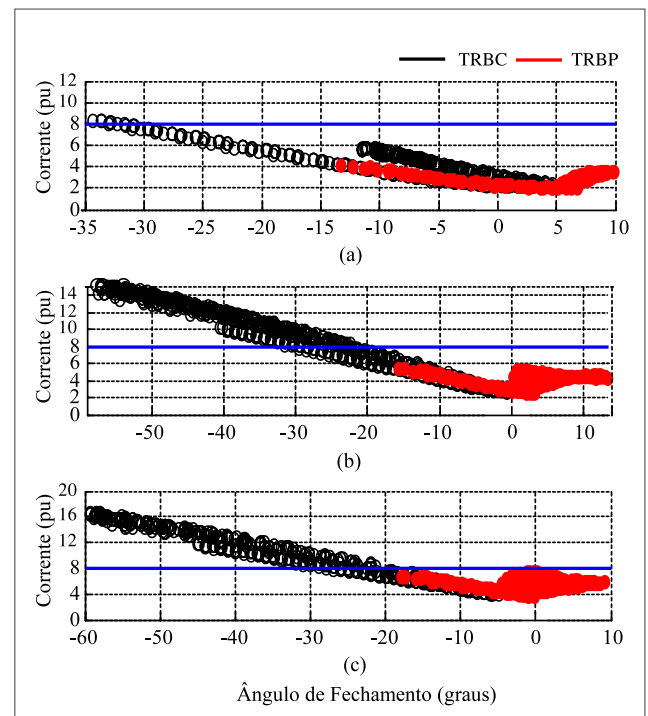


Figura 12. Valores de corrente para ambos os métodos: (A) alta inércia; (B) média inércia; (C) baixa inércia.

alta, média e baixa inércia. A linha azul expressa o limite de 8 pu, considerado o valor máximo seguro para esta variável.

Conforme observado na Figura 12, embora o ângulo de comando seja definido na faixa -20° a 20° , o ângulo de fechamento efetivo vai além desta faixa. Assim, a corrente supera em muito o limite estabelecido de 8 pu. Deve-se ressaltar que este valor máximo é o máximo absoluto encontrado na literatura, causando danos elevados ao maquinário se ultrapassado. O valor máximo para o TRBC é de 16 pu no sistema de baixa inércia; e para o método TRBP, é de 6 pu no sistema de baixa inércia.

A Figura 13 mostra os valores de torque para cada ângulo de fechamento. São calculados para os sistemas de alta, média e baixa inércia. A linha azul expressa o limite de 6 pu, considerado o valor máximo seguro para esta variável.

Conforme observado na Figura 13, embora o ângulo de comando seja definido na faixa -20° a 20° , o ângulo de fechamento efetivo vai além desta faixa. Assim, o torque ultrapassa o limite estabelecido de 6 pu. O valor máximo para o TRBC é de 7,9 pu no sistema de baixa inércia; e para o método TRBP, é de 4,7 pu no sistema de baixa inércia.

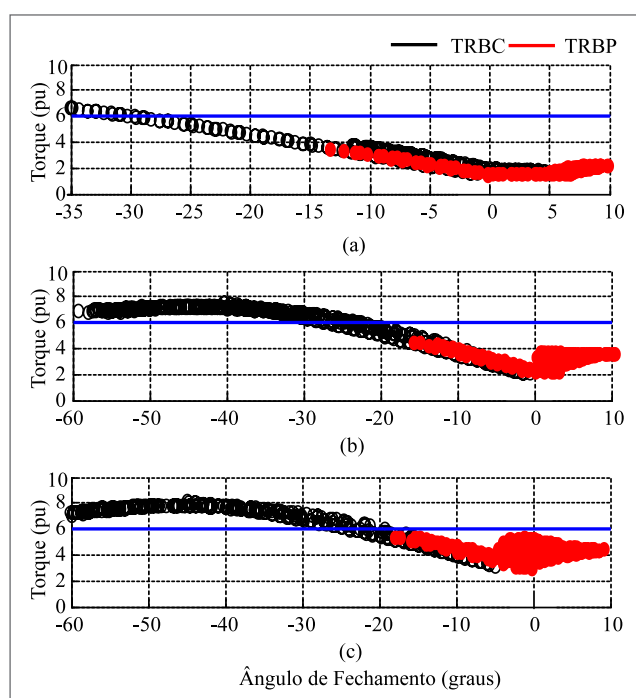


Figura 13. Valores de torque para ambos os métodos: (A) alta inércia; (B) média inércia; (C) baixa inércia.

7. CONCLUSÃO

Motivado pelas lacunas em diversos aspectos do método TRBC, este trabalho apresenta um método seguro para a TRB: a Transferência Rápida de Barras Preditiva (TRBP), que considera a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) para critérios de fechamento. O algoritmo prevê os sinais de tensão do barramento por um tempo equivalente ao tempo de atraso do disjuntor, para garantir que os critérios sejam atendidos no ponto de fechamento.

Calculou-se o número de transferências efetuadas para cada método, porém, essas não são consideradas como bem-sucedidas, visto que em alguns casos as correntes e torques são elevados e podem causar danos ao sistema elétrico. Deste modo, levando em consideração as principais orientações normativas e de projeto de máquinas elétricas, definiu-se os limites de corrente de pico máxima e torque pico a pico para os casos bem-sucedidos são de 8 e 6 pu, respectivamente.

Na comparação do TRBP com a TRBC, a corrente de pico alcançada pelo método TRBP é 3 vezes menor que o método TRBC, garantindo uma corrente máxima de 6 pu. Este valor está nos limites de corrente de rotor bloqueado do projeto do motor. Quanto ao torque pico a pico, o TRBP apresentou valores de 1,6 vezes menor que o método TRBC, garantindo um torque pico a pico máximo de 4,7 pu.

Os métodos TRBC e TRBP obtiveram, respectivamente, 40 e 99,25% de sucesso nas transferências. O TRBP apresenta resultados promissores que efetivamente reduzem as correntes transitórias em cerca de 3 vezes, obtendo um aumento de até 60% na chance de transferências bem-sucedidas e baixo custo computacional. Esse fato ressalta a segurança do método, visto que garante limites aceitáveis de transitórios de corrente e torque nos motores.

REFERÊNCIAS

ANSI/NEMA. *ANSI/NEMA C50.41-2012: Polyphase induction motors for power generating stations*. [S.l.: s.n.], 2012.

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. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.227.244>

BUDYNAS, R. G. *Elementos de maquinas de shigley*. Brasil: McGraw-Hill Brasil, 2016.

CHANG, C.-K. A new MV bus transfer scheme for nuclear power plants. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, v. 1, p. 12, 2015. <https://doi.org/10.1051/epjn/e2015-50003-1>

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, jan. 1959.

HOLT, M.; CAMPBELL, R.; NIKITIN, M. *Fukushima nuclear disaster*. Estados Unidos: Congressional Research Service, 2021. 15 p.

- HORNAK, D. L.; ZIPSE, D. W. Automated bus transfer control for critical industrial processes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 27, n. 5, p. 862-871, 1991. <https://doi.org/10.1109/28.90340>
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *IEEE Std 242-001*: IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems (IEEE buff book). IEEE, 2001.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *IEEE Std 620-1996*: IEEE guide for the presentation of thermal limit curves for squirrel cage induction machines. IEEE, 1996.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *IEEE Std 741-2017*: IEEE standard for criteria for the protection of class 1e power systems and equipment in nuclear power generating stations. IEEE, 2017.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *Std 1547.2*: IEEE application guide for IEEE Std 1547, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. IEEE, 2009.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). *No. SSG-34*: design of electrical power systems for nuclear power plants. Viena: International Atomic Energy Agency, 2016.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *PES-TR54*: Motor bus transfer applications issues and considerations. Power System Relaying and Control Committee, 2012.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *Std 308-2012*: IEEE standard criteria for class 1e power systems for nuclear power generating stations. IEEE, 2013a.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *Std 765-2012*: IEEE standard for preferred power supply (pps) for nuclear power generating stations (npgs). IEEE, 2013b.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *Std C37.96-2012*: IEEE guide for ac motor protection. IEEE, 2013c.
- KAY, S. M. *Modern spectral estimation: theory and application*. 1999.
- KHAN, F. I.; ABBASI, S. A. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 11, n. 4, p. 261-277, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(97\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(97)00051-X)
- LIAO, Y. *Phase and frequency estimation: high-accuracy and low-complexity techniques*. Digital WPI, 2011.
- MURALIMANOVAR, P.; HAAS, D.; MCCLANAHAN, J. R.; JAGADURI, R. T.; SINGLETARY, S. Implementation of a microprocessor-based motor bus transfer scheme. In: IEEE PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 2016, Filadélfia. *Anais [...]*. IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/PCICON.2016.7589248>
- NILSSON, N. *Report on the working group to revise ansi c50.41*. IEEE Power Engineering Society, 1999.
- PETTIGREW, R. D.; POWELL, P.; BURNWORTH, J.; HAAS, R.; GILL-BERLINCHES, J.; WAUDBY, P.; MOZINA, C.; PIERCE, A.; TAJADDODI, F.; BECKWITH, R.; FENNELL, E.C.; REBBAPRAGADA, V.; NAIL, G.; GARDELL, J.; MAZUMDAR, S.; CHHAK, S.; BECKWITH, T. Motor bus transfer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 4, p. 1747-1758, 1993. <https://doi.org/10.1109/61.248282>
- 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*, v. 15, n. 2, p. 111-142, 30 out. 2007. <https://doi.org/10.1007/s10651-007-0043-y>
- PRASAD, M.; THEIVARAJAN, N. Normal power supply system of a nuclear power plant — Modelling and simulation studies for fast bus transfer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS, 1., 2011, Chennai, Tamilnadu, India. *Anais [...]*. IEEE, 2011.
- SCHNEIDER ELECTRIC. *Selecting masterpact mtz1 circuit breakers*. Schneider Electric, 2020.
- SIEMENS. *Multi-function high speed motor bus transfer 7vu683*. Siemens, 2019.
- TONG, W. *Mechanical design of electric motors*. [S. l.]: CRC Press, 2014. *E-book*.
- U.S. NRC. *1155*: station blackout. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1988.
- U.S. NRC. *Appendix A to part 50*: general design criteria for nuclear power plants. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2021.
- U.S. NRC. *Information notice no. 91-57*: operational experience on bus transfer. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1991.
- U.S. NRC. *Nureg-0800*: standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007.
- 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*, v. 20, n. 1, p. 89-102, jan. 2006. <https://doi.org/10.1080/13658810500286976>
- 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. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2834877>
- ZAMANI, M. A.; ZADEH, M. R. D.; SIDHU, T. S. A compensated dft-based phase-angle estimation for fast motor-bus transfer applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 30, n. 2, p. 569-577, 2015. <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2367041>