



GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

OS DILEMAS DO PLANEJAMENTO DECORRENTES DO RELIGAMENTO MONOPOLAR NA EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO

SÉRGIO FELIPE FALCÃO LIMA(1); DANIEL JOSÉ TAVARES DE SOUZA(1); FABIANO SCHMIDT(1); JOSE MARCOS BRESSANE(1); DOURIVAL CARVALHO(1)
EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA - EPE(1)

RESUMO

Um recurso adotado na operação de sistemas elétricos no Brasil e no mundo é o religamento automático monopolar de linhas de transmissão aéreas. O planejamento da transmissão, como premissa básica, procura dotar todas as soluções planejadas com esse recurso. Contudo, conforme será discutido, existem algumas situações, inerentes às soluções concebidas, que suscitam dilemas envolvendo a viabilidade de implementação do referido recurso. Ainda assim, em casos que envolvem restrições, ou mesmo inviabilidade no religamento monopolar, observa-se que as obras planejadas se mantêm tecnicamente adequadas, em termos de desempenho sistêmico, considerando estudos e/ou investigações adicionais sobre a rede planejada e existente.

PALAVRAS-CHAVE: religamento automático, religamento monopolar, planejamento da transmissão, manobras em linhas de transmissão, transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Religamento Monopolar (RM) é um recurso adotado na operação de Linhas de Transmissão (LT) aéreas para aumentar as margens de estabilidade dos sistemas de potência quando da ocorrência de faltas monofásicas temporárias, as quais são as mais frequentes nesse tipo instalação. Segundo [1], o RM é o tipo de religamento menos severo sob o ponto de vista dinâmico e em relação aos esforços nas unidades geradoras e sobretensões dinâmicas associadas. Em relação aos tempos mortos necessários, como referência, devem ser considerados os estudos de transitórios eletromagnéticos para o RM e de estabilidade eletromecânica para o Religamento Tripolar (RT).

Embora o RM, em princípio, resulte em uma operação mais robusta, para que ele seja considerado viável devem ser observados os critérios e premissas atualmente adotados para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Basicamente, pode-se afirmar que RM é viável se houver alta probabilidade de extinção do arco secundário em um tempo morto predefinido. Essa probabilidade deve ser verificada, com base em método aproximado [1], mas tradicional no país, através do par de valores de tensão e corrente no ponto de falta. O sucesso da manobra depende, essencialmente, de variáveis associadas à condição operativa e à LT em si, com destaque para: tensão dos terminais, fluxo de potência, grau de compensação em derivação, silhueta e comprimento.

O grau de compensação da LT é definido, geralmente, por estudos de sistema como os de energização e rejeição de carga. Contudo, o reator em derivação escolhido pode estar numa faixa de valores proibitiva para o sucesso da manobra de RM, mesmo com o emprego de medidas mitigatórias como o Reator de Neutro (RN). A depender das características da LT, com o aumento de sua extensão, observa-se significativo incremento na corrente de arco secundário. Esses e outros aspectos acabam resultando em dilemas de planejamento, detalhados na seção 4 do presente artigo, os quais configuram-se como uma das tarefas desafiadoras do planejamento da expansão do SIN. Na fase de planejamento, não obstante a maior parte das LT recomendadas apresentarem alta probabilidade de sucesso para o RM, observam-se algumas situações que apresentam uma maior dificuldade como, por exemplo, LT em circuito duplo e/ou com *Surge Impedance Loading* (SIL) elevado. A adoção de LT em circuito duplo tem sido cada vez mais justificada por conta de restrições socioambientais, enquanto a recomendação de LT de SIL elevado tem sido motivada como alternativa econômica para permitir a transmissão de potências elevadas, eventualmente evitando-se o uso de compensação série.

Este trabalho irá apresentar e discutir exemplos de alternativas de expansão nas quais foram avaliadas e promovidas ações visando a viabilização do RM, incluindo-se a flexibilização de premissas e critérios vigentes e a avaliação do impacto da sua não habilitação. Em conclusão, será apresentado um quadro resumo das situações nas quais os benefícios prováveis da previsão de RM para algumas LT planejadas aparentam ser menos preponderantes que os desafios técnicos e econômicos associados. Embora não seja objetivo do trabalho detalhar as premissas e critérios de avaliação vigentes no Brasil, caberá sugerir uma discussão para adoção de novos métodos e critérios de análise que permitam uma avaliação mais flexível, mas ainda segura.

2.0 - O PANORAMA DO RELIGAMENTO AUTOMÁTICO NO SIN

O RM é um dos requisitos técnicos geralmente impostos pelos editais dos leilões de LT da Rede Básica (RB). Portanto, a princípio, qualquer LT nova da RB deveria dispor desse recurso operativo, ainda que não seja utilizado na operação futura. De fato, na prática, observa-se que em várias LT existentes esse recurso estaria desabilitado ou sendo utilizado como uma estratégia secundária em relação ao RT. Essas observações decorrem de uma inspeção realizada a partir de documentos públicos, nos Manuais de Procedimentos da Operação (MPO), que estão no sítio eletrônico do ONS [2]. Este trabalho não visa, contudo, realizar juízo de valor sobre a adoção ou não desse recurso pela operação, mas fazer um panorama geral do seu uso.

As informações podem ser encontradas em pelo menos 03 (três) categorias de documentação: (i) cadastros de informações operacionais de dados de equipamentos – operação em regime normal, (ii) instruções de operação – operação em regime de contingência; e (iii) instruções de operação – preparação de manobras. No caso deste trabalho, a pesquisa registrou, na Figura 1, dados sobre o panorama atual do religamento automático apenas para as 02 (duas) primeiras situações: em condição normal (à esquerda); e em contingência (à direita). Os resultados estão separados por níveis de tensão, iguais e acima de 230 kV.

2.1 - Situação em regime normal

O RT é o recurso mais utilizado no total, quando há religamento automático. Do total de 1280 LT observadas, 1053 LT possuem religamento automático habilitado. Destas, para 119 LT consta a possibilidade de utilizar apenas RM, 869 apenas RT e 40 com ambos os tipos disponíveis e ligados. Também há casos em que, embora conste a possibilidade dos dois tipos, somente um deles está efetivamente disponível para a operação. Nestes casos, para 25 LT, apenas o RT está ligado, enquanto em 6 LT apenas o RM está ligado.

Do total de 227 LT com religamento desligado, identificou-se que 16 constavam como bloqueados, 101 constavam como não existentes, 74 como não informados e as 36 restantes constavam com RM e/ou RT desligados. Adicionalmente, para estes últimos casos, 5 LT contam com RM desligado, 26 LT contam com RT desligado, e 3 LT contam tanto com RM quanto RT desligados.

2.2 - Situação em regime de contingência e/ou rede degradada

Por outro lado, em situações de contingência e/ou rede degradada, do total de 1282 LT observadas, 1077 LT possuem religamento automático habilitado. Destas, 115 possuem apenas RM, 756 apenas RT, 52 ambos os tipos ligados e, quanto ao restante, embora conste que a LT possui dois tipos de religamento, apenas um deles está disponível para a operação. Adicionalmente, observa-se: (i) um pequeno crescimento no uso do RM quando em situações de contingência, com uma diminuição do uso do RT; e (ii) para alguns casos, a própria desabilitação do religamento automático e, conseqüentemente, do RT, evidenciando, inclusive, mudança na estratégia de operação.

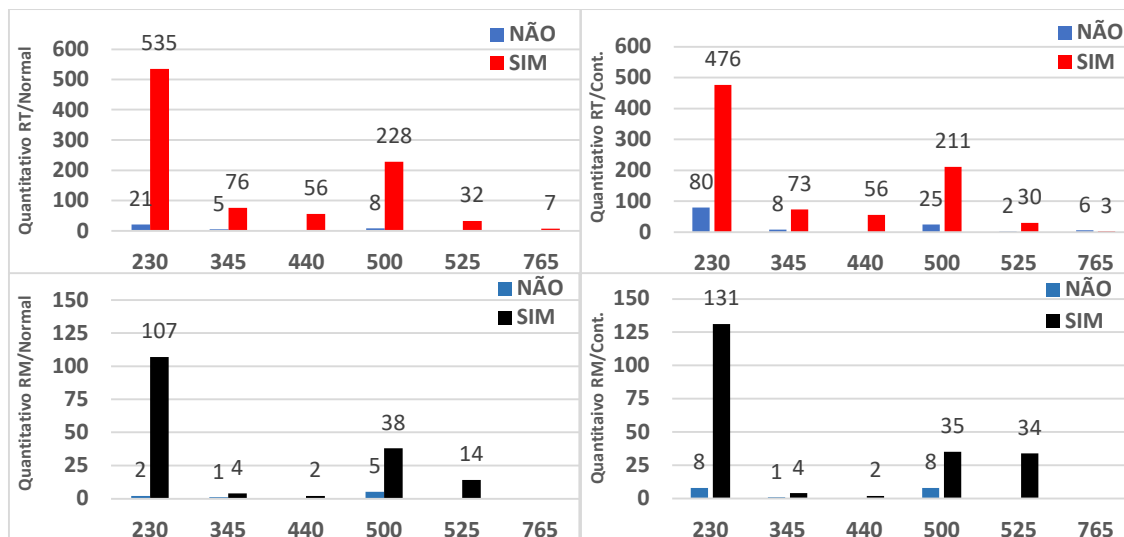


Figura 1 – Quantitativo absoluto de religamentos previstos nas LT, separados por nível de tensão e status (Sim – Ligado e Não – Desligado). Condição normal (quadrantes à esquerda) e contingência (quadrantes à direita).

É possível fazer um diagnóstico percentual por região. Nesta forma de apresentação, também se observa um aumento do percentual de RM implementados como estratégia de operação, quando da ocorrência de contingências, nas regiões Sul, Norte e Centro Oeste. Em outras regiões, observa-se o contrário, mas, nestes casos, observou-se na pesquisa um uso reduzido do RM. Cumpre notar que sempre que há regiões entre barras (símbolo "/"), refere-se à LT de interligação entre regiões, conforme apresentado na Figura 2.

Algumas LT possuem tanto o RM quanto o RT ligados, conforme apresentado na Figura 3. As barras em cinza são LT com apenas RT habilitados. Barras em preto são LT com RM habilitado. Barras com metade preta e metade cinza são LT com ambos (destaque para as regiões Sul e Centro Oeste). Os espaços em branco são as LT que não

possuem religamento ligado em situação normal, seja por: inexistência, falta de informação, desabilitados para uso e/ou desligados por razões que fogem ao escopo deste trabalho.

Embora não esteja disponível nos MPO uma quantidade amostral expressiva de tempos mortos, apresentam-se os dados da Figura 4. Nessa análise, não se pode afirmar o que tem motivado a definição de tempos mortos tão elevados para o RT. No caso do RM, supõe-se que visa garantir uma maior probabilidade de extinção do arco. De qualquer forma, pode-se inferir que, a despeito de tempos elevados, a estabilidade dinâmica do sistema seria mantida, inclusive para aberturas tripolares, considerando a robustez de algumas redes.

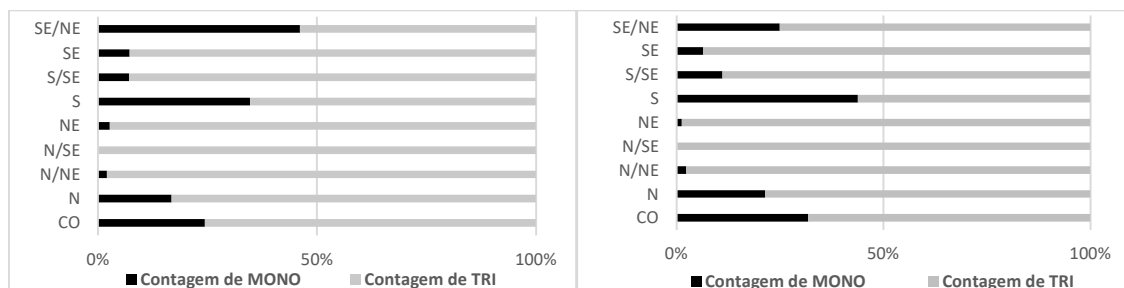


Figura 2 - Quantidade percentual de religamentos previstos, separados por região. Condição normal (à esquerda) e contingência (à direita).

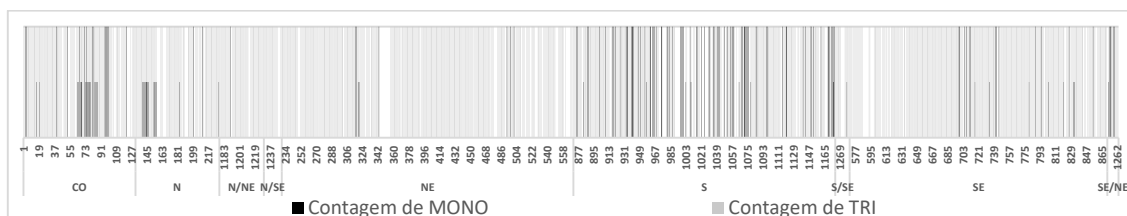


Figura 3 - Tipos de religamentos habilitados em cada LT. Barras totalmente em cinza são RT, em preto RM e com metade em preto e metade em cinza ambos. Espaços em branco são LT sem religamento automático habilitado.

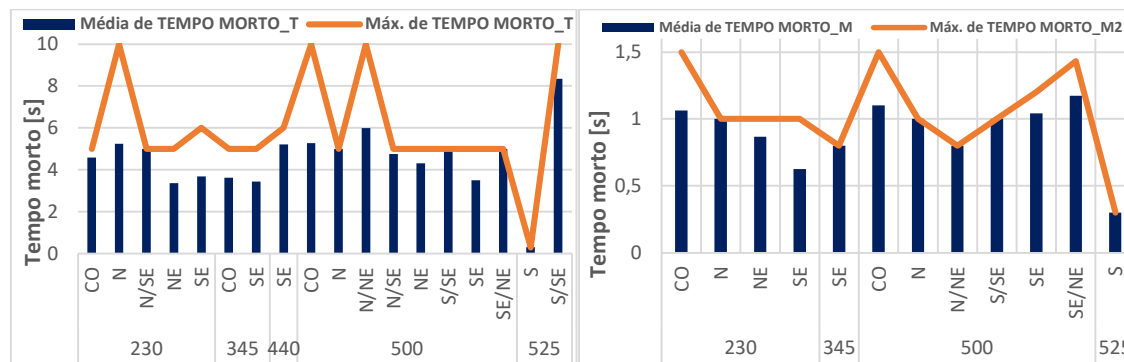


Figura 4 - Tempos mortos em segundos. À esquerda RT e à direita RM.

3.0 - OS DILEMAS DECORRENTES DA ADOÇÃO DO RM NA FASE DE PLANEJAMENTO

No planejamento, a análise de viabilidade do RM é feita em duas etapas: no relatório R1 (mais simplificada) e no relatório R2 (mais detalhada). Esta última só é realizada em alguns casos, mas a primeira é sempre realizada quando há compensação reativa *shunt* nas LT. É importante salientar que a avaliação detalhada também é realizada no projeto básico, posteriormente à licitação da LT, com informações mais atualizadas.

A análise endereçada no relatório R1 é dita simplificada porque não analisa os comportamentos transitórios do arco secundário e da tensão de fase aberta, bem como os efeitos da rede completa e suas não-linearidades. Nela verifica-se, basicamente, o par de valores de tensão e corrente sob abertura monopolar, no ponto de falta, em regime permanente, na faixa de frequência de 56 a 66 Hz [1] e [3]. Além disso, consideram-se as devidas modelagens trifásicas, transposições e configuração da LT, impondo-se fluxos e tensões conservadores, com equivalentes de *Thévenin* conectados nos terminais da LT. Portanto, essa abordagem permite obter conclusões preliminares importantes sobre a viabilidade da manobra. A viabilidade é considerada alcançada se: (i) a corrente de arco secundário não ultrapassar 80 A [1]; e (ii) a tensão induzida na fase aberta não for superior à tensão máxima de operação da instalação.

Além de itens associados à condição operativa, o sucesso da extinção do arco depende de variáveis associadas à LT em si, em destaque: grau de compensação em derivação, silhueta e comprimento. Portanto, a silhueta de referência da LT, bem como reatores em derivação concebidos no relatório R1, são elementos importantes para essa análise de viabilidade.

Quando os critérios de viabilidade não são alcançados, em geral, tem-se duas soluções: (i) alteração marginal da potência do reator da LT – marginal porque os reatores são definidos por estudos de sistema, como energização e rejeição de carga, não sendo uma boa prática alterá-los significativamente; e (ii) inclusão de RN conectado ao neutro dos reatores em derivação, a qual é considerada uma medida mitigatória. No caso do critério de tensão de fase aberta, ambas as soluções se mostram efetivas, sendo a primeira opção mais robusta, em termos de confiabilidade, e utilizada pelo planejamento sempre que possível. No caso da corrente de arco, a segunda opção é aquela mais efetiva e recomendada para a redução desta variável.

Considerando-se o uso de RN observa-se que, quanto maior a potência dos reatores em derivação, menores são as magnitudes das correntes de arco secundário. Por outro lado, aumentar a potência dos reatores em derivação pode prejudicar o desempenho do sistema, em termos de controle de tensão, e/ou resultar em ressonância na tensão de fase aberta na faixa de frequência avaliada. Portanto, há conflito entre os critérios de tensão e corrente e, em alguns casos, é esperado dificuldade na viabilização do RM. Adicionalmente, para cada caso, considera-se um limite superior para o valor de impedância do RN, situação na qual não seria mais observado um benefício efetivo dessa redução de corrente. Além disso, o limite do valor de impedância do RN – desconhecido a priori – é imposto também por outras manobras, como a rejeição de carga com falta fase-terra, na qual os valores de energias dissipadas em para-raios de óxido metálico poderiam ser proibitivos, devido ao fenômeno de deslocamento de neutro. Inclusive, nestes casos podem ser observadas solicitações de tensão no neutro dos reatores em derivação bastante elevadas, podendo ocasionar avarias nos mesmos ou necessidade de especificação de isolamento especial. Nessas situações, por conta desses fatores limitantes, não é possível o atendimento ao critério de corrente para toda a faixa de frequência, dentro de uma solução técnico-economicamente razoável.

Diante do exposto, algumas situações apresentam uma maior dificuldade para se atestar a sua viabilidade como, por exemplo, linhas longas, LT em circuito duplo e/ou com SIL elevado, conforme já exposto em [4]. Nesses casos, surgem os seguintes dilemas:

- (i) Ajustar a compensação reativa em derivação a despeito de outras necessidades e restrições sistêmicas?
- (ii) Reduzir o comprimento da LT aumentando, porém, o investimento com equipamentos e subestações seccionadoras?
- (iii) Flexibilizar premissas e critérios de avaliação, em princípio, reduzindo-se a probabilidade de extinção do arco secundário?
- (iv) Prescindir do recurso de RM, em princípio, reduzindo-se a margem de estabilidade do sistema?
- (v) Alguma combinação entre os itens anteriores?

Quanto ao dilema iv, por mais que a redução de margem de estabilidade teoricamente exista, o planejamento, por vezes, também se questiona se em algumas partes do sistema o RM não seria preponderante. Nas seções posteriores serão apresentados casos reais enfrentados pelo planejamento e algumas soluções encontradas, considerando uma visão de mínimo arrependimento e benefícios técnicos e econômicos.

4.0 - FLEXIBILIZAÇÃO DE CRITÉRIOS E ANÁLISES ADICIONAIS

Conforme já apresentado, de forma geral, observa-se que as situações com maiores dificuldades ao pleno atendimento das premissas e critérios do estudo de viabilidade do RM estão associadas a situações de: (i) LT de SIL elevado¹; (ii) baixos níveis de curto-circuito nos terminais da LT, considerando inclusive condições de rede degradada; (iii) LT extensas; e/ou (iv) LT em circuito duplo.

Caso as medidas mitigatórias citadas anteriormente não sejam efetivas numa análise de viabilidade de RM, buscam-se alternativas que envolvam alterações mais expressivas na concepção da solução preliminar, como exemplo, aumentar os níveis de curto-circuito através da expansão da rede de transmissão e/ou diminuir os comprimentos da LT, com a inclusão de subestações intermediárias, quando possível. Contudo, essas soluções podem tornar economicamente pouco competitiva aquela alternativa de expansão em análise e, ainda assim, não serem tão efetivas quando se consideram as incertezas associadas à configuração futura de planejamento e operação (como, por exemplo, seccionamentos decorrentes do mercado livre). Nesse contexto, há de ser observado o compromisso entre ser mantida a modicidade tarifária e os ganhos efetivos para o desempenho da rede quando são incluídos recursos que possam ser utilizados em todas as condições operativas.

Portanto, em situações nas quais a viabilização do RM não é plenamente atendida, antes de indicar uma possível expansão de rede, uma restrição ou mesmo inviabilidade técnica, considera-se adequado reavaliar as premissas e critérios adotados nas simulações, além da realização de análises adicionais.

4.1 - Flexibilização de critérios

De acordo com [1], as avaliações de extinção de arco secundário e ressonância devem considerar:

- (i) avaliações de regime permanente, visando definir as correntes de arco secundário e a tensão na fase aberta em todas as condições operativas (faixa de frequência de 56 a 66 Hz), com o objetivo de identificar possíveis condições de ressonância na fase aberta e confirmar o atendimento dos critérios relativos à magnitude da corrente de arco secundário; e
- (ii) avaliações de transitórios eletromagnéticos envolvendo manobras de extinção do arco secundário (obtenção das curvas de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) e corrente de arco secundário). Para avaliar a viabilidade do RM com um tempo morto de até 500 ms, o sucesso da extinção do arco secundário é caracterizado pelo valor eficaz do último pico da corrente do arco secundário (I_a) e pelo valor do primeiro pico da tensão de restabelecimento transitória (V_p) através do canal do arco extinto. Caso o par de valores (V_p , I_a) esteja localizado no interior de uma região que caracterize a zona de alta probabilidade de extinção do arco secundário, considera-se que o RM é viável, conforme curva definida em [5]. Por outro lado, normalmente nos casos críticos supracitados, observa-

¹ Alguns fundamentos para recomendações deste tipo de LT podem ser encontradas em [4].

se o não atendimento desse critério. Logo, é necessário um tempo morto maior, associado apenas a uma corrente de arco secundário maior, limitada a 80 A. Estes tempos são regidos pela curva expressa em [6], obtida a partir de testes de laboratório realizados para situações específicas, cuja equação matemática é dada por:

$$t = 0,25 (0,1 \cdot I_{sec} + 1) \quad (1)$$

t : tempo morto em segundos I_{sec} : corrente de arco secundário

Portanto, no caso da avaliação de extinção de arco secundário, deve-se observar, para toda a faixa de frequência (56 a 66 Hz), uma corrente menor ou igual a 80 A, considerando um tempo morto adequado. Uma possível flexibilização de critérios envolve o não atendimento da corrente de arco em toda essa faixa de frequência. Embora a observância desse critério seja algo a ser perseguido pelo planejamento, a probabilidade de ocorrência de situações operativas entre 58 e 63 Hz, por exemplo, parece ser maior que aquelas associadas às faixas remanescentes, superior e inferior. A discussão sobre o atendimento de uma faixa mais restrita, considerando análises adicionais e as características da rede adjacente às LT, poderia evitar que o RM fosse desabilitado ou prescindido.

4.2 - Análises adicionais

No âmbito da análise de viabilidade do RM, também cabe encaminhar uma discussão de como análises do ponto de vista dinâmico, considerando múltiplas contingências e rede degradada, poderiam gerar subsídios à tomada de decisão sobre a robustez de determinada flexibilização de critérios ou mesmo a própria não habilitação do recurso de RM, ainda que de forma temporária.

No exemplo a seguir, concluiu-se que a não habilitação do RM não faria uma diferença importante no desempenho dinâmico da rede, mesmo com a ocorrência de contingência dupla de elementos, para condições severas – nas quais as LT encontravam-se mais carregadas. Essa análise ajudou a subsidiar a tomada de decisões quando foram observadas dificuldades importantes para o pleno atendimento aos critérios de RM para as LT 500 kV Morro do Chapéu II – Poções III (cerca de 356 km) e Poções III - Medeiros Neto II – João Neiva 2 (cerca de 611 km), em silhueta de SIL elevado, conforme discutido na seção 6.

Na primeira simulação foi analisado o desempenho do sistema, onde foi aplicado um curto-circuito monofásico na SE Poções III e, ao eliminar a falta, foram abertas a LT 500 kV Morro do Chapéu II – Sapeaçu C1 e a LT 500 kV Morro do Chapéu II – Poções III C1 (lado direito da Figura 5). A segunda simulação de perda dupla refere-se ao desligamento de um dos circuitos da LT 500 kV Poções III – Padre Paraíso 2, que são paralelos ao eixo citado anteriormente, em conjunto com a LT 500 kV Poções III – Medeiros Neto II C1, com sistemática de avaliação similar à anterior, recomendada no estudo em análise (lado esquerdo da Figura 5).

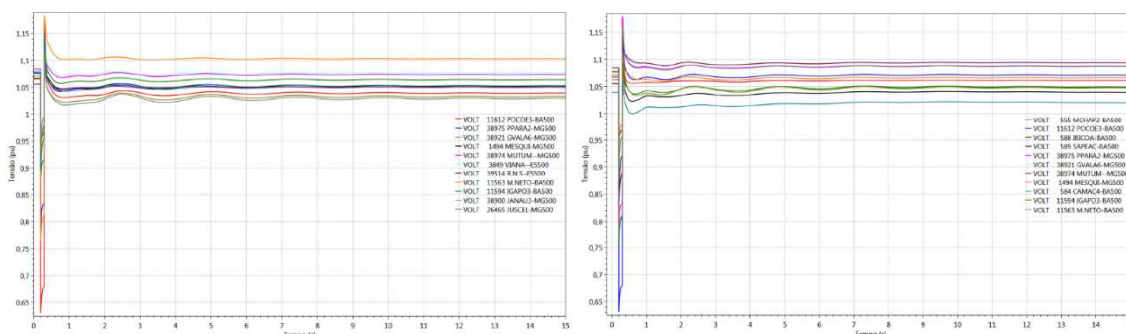


Figura 5 - Curto-circuito monofásico em Poções III com abertura das LT 500 kV Morro do Chapéu II – Sapeaçu e Morro do Chapéu II – Poções III (À direita). Curto-circuito monofásico em Poções III com abertura da LT 500 kV Poções III – Padre Paraíso 2 e Poções III – Medeiros Neto II (À esquerda).

Ressalta-se que não foi implementada nenhuma medida operativa ou esquema especial e, ainda assim, o sistema suportou a perturbação de forma segura e satisfatória. Além disso, também não foram observados desvios significantes na frequência das máquinas do SIN e as oscilações foram bem amortecidas com nenhum critério de desempenho elétrico dinâmico violado. Portanto, para o eixo analisado, a despeito de situações de contingências duplas, o sistema permanece seguro do ponto de vista de estabilidade transitória, mesmo sem a presença do RM. Outro aspecto que pode ser observado, no âmbito dessa análise, é que seria possível aceitar um risco (frente a eventos de baixa probabilidade) de não implantação preliminar de RM até que a evolução natural do sistema resultasse em maior robustez às instalações e, assim, permitisse assim uma habilitação futura desse recurso, a critério do operador e eventual necessidade sistêmica.

5.0 - EXEMPLOS DE CASOS

No âmbito de estudos que envolvem transitórios eletromagnéticos de manobra em LT, sobretensões máximas resultantes de manobras não têm sido uma questão expressiva no contexto de viabilidade do RM. Por outro lado, resultados de energias elevadas em para-raios – em decorrência de sobretensões sustentadas não reduzidas, potencializadas por RN –, tem sido um aspecto importante no âmbito de viabilidade do RM. A princípio, não é tecnicamente inviável utilizar múltiplas colunas. Contudo, conforme [7], devido às disparidades nas curvas

características, uma coluna pode absorver mais energia que as demais do conjunto e, portanto, para uma aplicação segura deve-se atentar ao fato de que a capacidade de absorção total do conjunto é menor que a soma das capacidades de cada coluna. Portanto, do ponto de vista prático, ponderando-se todos os fatores envolvidos, usualmente define-se um número máximo de colunas aceitável. Embora não seja um critério consagrado, no planejamento tem sido comumente utilizado 03 (três) colunas como esse número máximo de colunas.

Nesse contexto, em alguns casos pontuais de estudos de planejamento, observou-se a necessidade de uso de para-raios com mais de três colunas, especialmente na condição de rejeição de carga, que é uma manobra intempestiva e não há medidas mitigatórias usuais. Em parte destas situações, concluiu-se que o aterramento sólido dos reatores em derivação resultava em substancial redução no número de colunas necessárias, conforme será mostrado ao longo desta seção. Como o *by-pass* nos RN acaba por inviabilizar o RM, de forma temporária ou permanente, é fundamental identificar essas situações ainda no âmbito do planejamento, através dos estudos de R2, para a devida elaboração dos editais de licitação. Ou seja, é bastante clara a relação entre: (i) a presença de RN (para viabilizar o RM) conectado ao neutro dos reatores em derivação inicialmente propostos; e (ii) seu impacto na severidade das sobretensões sustentadas e energia nos para-raios de óxido metálico nas manobras (em especial, a rejeição de carga). Adicionalmente, eventuais alterações na própria compensação em derivação (também visando a viabilidade do RM) podem impactar o desempenho da LT, inclusive em regime permanente em condição normal e emergência. A seguir, são descritos alguns estudos de caso cuja análise de viabilidade do RM, ocorridos na fase de planejamento apresentou a necessidade de tratativas especiais. A Tabela 1 mostra um resumo do SIL e comprimentos das LT que compõe os exemplos de casos a serem observados.

Tabela 1 - SIL e comprimentos das LT considerados nos exemplos de casos

Caso(s)	SIL LT [MW]	Comprimento [km]
5.1	1200	380
5.2	1681	443 e 415
5.3	1200	230 e 214
5.4	1681	356
5.5	1681	329 e 282
5.6	1681	291 e 307
5.7	1681	247
5.8	1681	352

5.1 - LT 500 kV Tucuruí 2 – Marituba, C1

Em [8] verificou-se que, para compensação em derivação de 33 %, com reator em derivação somente no terminal Marituba, identificada como suficiente nos estudos de fluxo de potência, não haveria solução com RN que viabilizaria o RM. A princípio, a solução técnica mais atrativa seria instalar um reator em derivação no terminal Tucuruí 2. No entanto, como este equipamento deveria ser do tipo fixo, concluiu-se que isso prejudicaria o desempenho do sistema, especialmente porque iria consumir reativos da UHE Tucuruí de forma permanente. Além disso, essa LT possui uma rota que segue em paralelo à 03 (três) circuitos existentes, LT 500 kV Tucuruí – Vila do Conde C1, C2 e C3. Nenhum desses circuitos possui o RM habilitado, estando previsto apenas o recurso de RT. Assim, a importância do recurso de RM no novo circuito foi identificada como secundária, considerando-se a existência de circuitos em paralelo com um nível de confiabilidade razoável.

5.2 - LT 500 kV Xingu – Serra Pelada, C1 e C2, e Serra Pelada - Miracema, C1 e C2

Em [9] verificou-se que, para condições de rejeição seriam necessárias de 5 a 7 colunas para absorver as maiores energias absorvidas impostas aos para-raios de óxido metálico, situação não requerida para a segurança da operação. Assim, investigou-se outras situações, como o aterramento do neutro dos reatores em derivação com *by-pass* no RN, resultando em valores de energia mais reduzidos, demandando de 2 a 3 colunas. Além disso, verificou-se que, considerando RN de 800 Ω , para atender aos critérios de extinção de arco secundário para toda a faixa de frequência adotada, os carregamentos deveriam ser menores que o SIL das LT. Portanto, este estudo recomendou que a função de RM fosse implementada, mas que inicialmente ficasse desabilitada, com o neutro dos reatores em derivação solidamente aterrados até que a evolução da rede permitisse a habilitação da manobra removendo-se futuramente o *by-pass* nos RN.

5.3 - LT 500 kV Campos 2 – Mutum, C1 e C2, e Terminal Rio - Lagos, C1 e C2

Em [10] verificou-se que, para evitar ressonância paralela na condição em que 01 (um) circuito está aberto e não aterrado nos terminais, seria necessário reduzir as compensações para cerca de 30 % em ambas as LT. Cumpre ressaltar que neste estudo optou-se por não utilizar RN para mitigar as tensões sustentadas observadas. Como consequência, devido aos elevados valores de corrente de arco secundário, o RM se mostrou viável somente considerando ambos os circuitos em operação.

5.4 - LT 500 kV Morro do Chapéu II – Poções III, C1

Em [11] verificou-se previamente que, para compensação em derivação de 50 %, identificada como suficiente nos estudos de fluxo de potência, não haveria solução com RN que viabilizaria a manobra de RM. Em princípio, seria necessário aumentar consideravelmente a compensação em derivação para 80 %. Além de prejudicar o desempenho do sistema, poderia surgir ressonância na tensão de fase aberta, próxima à frequência fundamental do sistema. Muito embora os RN, em ambos os terminais, fossem capazes de mitigar este fenômeno, compreendeu-se que esta não

seria a solução mais robusta, já que uma eventual perda de um dos RN poderia expor os demais equipamentos terminais a solicitações acima de seus limites. Tendo em vista que os estudos de estabilidade dinâmica mostraram que o sistema é estável, sob diferentes condições topológicas de rede degradada, concluiu-se no relatório R1 que a LT poderia prescindir do RM.

5.5 - LT 500 kV Poções III – Medeiros Neto II, C1, e Medeiros Neto II – João Neiva 2 C1

Em [12], inicialmente, verificou-se que, para limitar o tempo morto do RM em 2 s seriam necessários RN de impedância elevada, respectivamente de 1400 e 1300 Ω , não atendendo a toda a faixa de frequência a partir de 63,5 Hz. Adicionalmente, verificou-se que esse critério só seria atendido em toda a faixa de frequência, considerando-se carregamentos da ordem da metade do SIL, abaixo daqueles observados nos estudos de fluxo de potência. Além disso, para a energização sob falta verificou-se que para absorver as maiores energias absorvidas impostas aos para-raios de óxido metálico seriam necessárias de 3 a 6 colunas, quantidade de colunas que é uma situação não requerida para a segurança da operação e, ao se aterrar solidamente o neutro dos reatores em derivação com *by-pass* no RN, os valores de energia seriam reduzidos substancialmente, tornando-se compatíveis com apenas 1 coluna. Este estudo recomendou que a função de RM fosse implementada, mas que inicialmente ficasse desabilitada, com o neutro dos reatores em derivação solidamente aterrados até que a evolução da rede permitisse a habilitação da manobra removendo-se o *by-pass* nos reatores de neutro.

5.6 - LT 500 kV Paracatu 4 – Nova Ponte 3, C1, e Nova Ponte 3 – Araraquara 2 C1

Em [13] e [14] inicialmente verificou-se que, para limitar o tempo morto do RM em 2 s (tempo considerado elevado para os critérios expostos em [1]) seriam necessários RN de impedância elevada, de 1000 Ω , não atendendo a toda a faixa de frequência a partir de 63 Hz. Adicionalmente, verificou-se o impacto de redução do fluxo, considerando-se carregamentos inferiores ao SIL, não foi muito expressivo, caracterizando, de fato, possíveis restrições para operações que envolvam frequências superiores a 63 Hz, cuja probabilidade pode ser considerada reduzida.

5.7 - LT 500 kV Janaúba 6 – Capelinha 3, C1 e C2

Em [15] verificou-se que, para limitar o tempo morto do RM em 2 s (tempo considerado elevado para os critérios expostos em [1]) seriam necessários RN de 800 Ω , para atender uma faixa até 64 Hz, e que a utilização de RN de impedâncias acima desse valor não atenderia a toda a faixa de frequência e poderiam ocasionar outras questões impactantes às demais manobras, conforme discutido nos primeiros exemplos.

5.8 - LT 500 kV Buritizeiro 3 – São Gonçalo do Pará, C1

Em [16] verificou-se que seriam necessários RN de 800 Ω , para atender uma faixa de até 63 Hz. Similarmente, verificou-se que a aplicação de RN com impedâncias mais elevadas não atenderia a toda a faixa de frequência e poderiam ocasionar outras questões impactantes às demais manobras, conforme discutido nos primeiros exemplos.

5.9 - Encaminhamentos de estudos e anexos técnicos de leilões

Nota-se que os encaminhamentos de estudos de planejamento para implementação do RM foram diversos. Em alguns casos, ocorreu uma flexibilização dos critérios de análise. Em outros, recomendou-se implementar o RM, mas inicialmente desabilitado, até que a evolução da rede permitisse a habilitação da manobra. Ainda, houve casos em que o RM prescindido, baseando-se em características da rede existente e/ou em avaliações adicionais. Por outro lado, para os leilões associados às LT analisadas, os encaminhamentos ocorreram conforme *Tabela 2*.

Tabela 2 - Encaminhamentos de anexos técnicos específicos em relação à implantação de RM

Caso(s)	Encaminhamento anexo técnico específico	Leilão
5.1	Dispensada implantação de RM	lote 15 do edital 02/2018
5.2	Implantação de RM solicitada, mesmo que não seja prevista a utilização imediata	lote 3 do edital 02/2017
5.3	A despeito de condicionantes de estudo, uma vez que existem configurações nas quais a viabilidade de arco secundário foi comprovada, o RM não foi dispensado	lote 2 do edital 04/2018
5.4	Implantação de RM solicitada, mesmo que não seja prevista a utilização imediata	lote 2 do edital 01/2020
5.5	A despeito de condicionantes de estudo, uma vez que existem configurações nas quais a viabilidade de arco secundário foi comprovada, o RM não foi dispensado	lote 2 do edital 01/2020
5.6; 5.7; 5.8	A despeito de condicionantes de estudo, uma vez que existem configurações nas quais a viabilidade de arco secundário foi comprovada, o RM não foi dispensado	Obras ainda não leiloadas

6.0 - A PROEMINÊNCIA DO RM

Conforme mencionado no início deste trabalho, o planejamento da transmissão, como premissa fundamental busca, desde as fases preliminares da concepção de qualquer LT, a viabilidade do RM segundo os critérios e premissas vigentes. Ou seja, de forma geral, esse é um recurso importante e a sua implementação deve ser sempre buscada. No entanto, existem algumas situações específicas nas quais o desempenho do sistema pode ser prejudicado – vide exemplos da seção 6 caso se queira ajustar as compensações *shunt* e propor medidas mitigatórias (como RN) para atender todos os critérios e premissas que envolvem a viabilidade do RM (situações com sinal “-” na Tabela 3). Por outro lado, é possível observar algumas possíveis situações nas quais a proeminência do RM pode ser mais pronunciada (situações com sinal “+” na Tabela 3), considerando prováveis benefícios ao desempenho da operação, frente aos desafios técnicos que envolvem o desempenho da LT e os desafios econômicos que envolvem a plena viabilidade do RM. A Tabela 3 apresenta estas situações. Nota-se que é possível uma combinação entre as situações. É importante destacar também que essa tabela apresenta não apenas um panorama obtido a partir da experiência

do planejamento da expansão, mas também reflete a implementação e utilização do RM na operação do SIN, considerando os dados da pesquisa apresentada na seção 3.

Tabela 3 – Situações usuais versus prováveis benefícios do RM considerando desafios

Situação	Prováveis benefícios do RM em relação aos desafios técnicos e econômicos
LT inseridas em redes fracas ²	++
LT em condições de rede degradada	+
LT em paralelo a troncos ou LT que não possuam RM habilitado	-
LT inseridas em redes fortes	--

No caso de situações de LT inseridas em redes fracas, com baixos níveis de curto-circuito nos terminais, cita-se o exemplo de LT ou troncos de LT conectadas por meio de eixos radiais, inclusive em situação de rede completa. É intuitivo imaginar que em situações de faltas monofásicas, por exemplo, o desligamento de O3 (três) fases, considerando o RT, poderia ser mais severo para a manutenção da estabilidade sistêmica que o desligamento de apenas uma fase, denotando uma maior importância para o RM habilitado nessas situações. De forma similar, LT ou troncos de LT operando em condições de rede degradada, ocasionando inclusive menores níveis de curto-circuito da rede, observa-se, em tese, uma maior importância para o RM habilitado nessas situações.

Finalmente, a função de RM cairia nas demais situações, não porque esse recurso não aumente a margem de estabilidade, mas porque esse aumento não justificaria eventuais alterações expressivas na solução de planejamento, que poderiam ocasionar custos mais elevados e/ou piora no desempenho técnico da solução, do ponto de vista de controle de tensão e demais manobras, considerando, inclusive, a presença do recurso de RT e a rede existente.

7.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi ratificada a importância do RM como um recurso operativo, muito embora o percentual de LT com RM habilitado não seja tão elevado em relação ao RT. Essa importância cresce, segundo a pesquisa realizada, em situações de contingência e/ou rede degradada. Ocorre um acréscimo de cerca de 25 % da quantidade total de RM habilitados, enquanto ocorre uma diminuição de cerca de 10 % para RT.

De todo modo, em uma rede cada vez mais malhada, observa-se que, para a maioria dos casos – tanto em situação normal quanto em contingência –, o RT é o recurso mais utilizado no total de LT, quando há religamento automático habilitado. Quando comparado ao quantitativo de RM, há cerca de seis vezes mais RT habilitados no sistema em condições normais e cerca de quatro vezes mais em contingência. Também se notam tempos mortos elevados, especialmente para o RT, da ordem de segundos, a partir do que se pode inferir que a estabilidade dinâmica do sistema seria mantida, inclusive para aberturas tripolares, considerando a robustez de algumas redes. Esse panorama apresenta uma possível indicação de que a operação do sistema prescinde do RM em algumas situações, a despeito da sua função essencial em outras.

Por fim, o planejamento da transmissão, como premissa básica, procura dotar todas as soluções de RB planejadas com o recurso de RM. Porém, existem algumas situações específicas nas quais surgem dilemas sobre alterações mais expressivas em características da rede em planejamento, visando atender de forma plena e para todas as situações operativas o estudo de viabilidade do RM. Nesses casos, o planejamento tem buscado utilizar medidas mitigatórias e, quando não suficientes, tem procurado flexibilizar algumas premissas e critérios do estudo e/ou realizado análises adicionais para mostrar que, mesmo que o RM não possa ser utilizado para todas as condições operativas e, eventualmente nos anos iniciais da expansão – sem considerar todas as expansões da rede –, a robustez técnica da solução é atendida, observando a modicidade tarifária no contexto de mínimo arrependimento em investimentos na expansão da rede.

8.0 - REFERÊNCIAS

- [1] ONS. Procedimentos de Rede – Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos. 2021.
- [2] ONS. Manuais de Procedimentos da Operação. <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/mpo>, acessado em 31/08/2021 às 21:00.
- [3] Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão: Estudos elétricos, especificação das instalações, de equipamentos e de linhas de transmissão. ONS. 2013.
- [4] Almeida, J. H. M.; Jr. Carvalho, D. S.; Bressane, J.M; Mello, R. T. A; Lima, S. F F; Aplicação de Linhas de Transmissão em 500 kV de SIL Elevado: Desafios no Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico Brasileiro, XIV SEPOPE, Recife, Brasil, setembro de 2018.
- [5] Balossi, A., Malaguti, M., Ostano, P., Laboratory full-scale tests for determination of the secondary arc extinction time in high-speed reclosing, IEEE Summer Power Meeting, New Orleans, July 10-15, 1966.
- [6] Haubrich, H.-J., Hosemann, G., Thomas, R., Single-phase auto-reclosing in EHV Systems, CIGRE 1974, paper 31-09, Paris, 1974.

² Embora existam várias definições na literatura, neste trabalho, define-se redes fracas como redes de transmissão que possuem nível de curto-circuito reduzido e/ou que não tendem a formar malhas. O contrário dessa definição seria associado a redes fortes.

- [7] J. S. Kresge, S. R. Lambert, E. C. Sakshaug and J. W. Porter, "Some effects of temperature on multiple column metal oxide devices," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1276-1284, July 1995, doi: 10.1109/61.400907.
- [8] TD1191-ES-RE-0001-R1 – MARTE Engenharia. Detalhamento da Alternativa de Referência Relatório R2: LT 500 kV Tucuruí 2 – Marituba C1. Dezembro de 2017.
- [9] EPE-DEE-NT-066/2017-rev0 – Recomendação de Reforços Para Mitigar Atrasos de Instalações de Transmissão Concedidas – Avaliação de Transitórios Eletromagnéticos de Manobra. Setembro de 2017.
- [10] EPE-DEE-RE-050/2018-rev0 – Relatório R2: Expansão do sistema de transmissão para escoamento do potencial termelétrico dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Julho de 2018.
- [11] EPE-DEE-RE-053/2019-rev0 – Estudo de Escoamento na Área Sul da Região NE. Setembro de 2019.
- [12] RT 1300/001-20 – GSI Engenharia e Consultoria LTDA. Detalhamento da Alternativa de Referência Relatório R2: LT 500 kV Morro do Chapéu II – Poções III – Medeiros Neto II - João Neiva 2. Abril de 2020.
- [13] POWERCONSULT e STATEGRID. Detalhamento da Alternativa de Referência Relatório R2: LT 500 kV NOVA PONTE 3 - ARARAQUARA 2, C1. Junho de 2021.
- [14] POWERCONSULT e STATEGRID. Detalhamento da Alternativa de Referência Relatório R2: LT 500 kV NOVA PONTE 3 – PARACATU 4, C1. Junho de 2021.
- [15] TD-5115-PE-CAP-G-RE-0001 – MARTE Engenharia. Detalhamento da Alternativa de Referência Relatório R2: LT 500 KV JANAÚBA 6 – CAPELINHA 3 C1/C2. Julho de 2021.
- [16] TD-5115-PE-BUR-G-RE – MARTE Engenharia. Detalhamento da Alternativa de Referência Relatório R2: 0002 LT 500 KV BURITIZEIRO 3 – SÃO GONÇALO DO PARÁ C1. Julho de 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará em 2012. Mestre pelo Programa de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ingressou no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em 2013, onde atuou em estudos de ampliações e reforços no Sistema Interligado Nacional (SIN). Desde 2015, é Analista de Pesquisa Energética na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e tem trabalhado com estudos de planejamento da transmissão do SIN, com ênfase em estudos de transitórios eletromagnéticos e linhas de transmissão.

(2) DANIEL JOSÉ TAVARES DE SOUZA

Daniel José Tavares de Souza graduou-se Engenheiro Eletricista pelo CEFET/RJ (2005) e é mestre em Sistemas de Potência pela COPPE/UFRJ (2011). Trabalhou em empresas como Eletrobrás, Furnas e ONS. Atualmente exerce a função de Consultor Técnico na Empresa de Pesquisa Energética – EPE, onde coordena os grupos de estudos de expansão da transmissão dos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, além do grupo de estudos especiais de transitórios eletromagnéticos e de projetos de linhas de transmissão. Integra a equipe da superintendência de transmissão de energia da EPE desde 2007.

(3) DOURIVAL CARVALHO

Dourival de Souza Carvalho Junior, engenheiro eletricista formado pela PUC-Rio em 1976; mestre em ciências em engenharia elétrica pela Coppe/UFRJ em 1980; Academic Visitor no Imperial College of Science and Technology (Londres, Inglaterra), por um ano, em 1987; mestre em administração de empresas pela PUC-Rio em 1995. É analista na Superintendência de Transmissão de Energia na EPE desde 2007. Experiência de mais de 30 anos em planejamento, consultoria, ensino, pesquisa e estudos de sistemas elétricos de potência, atuando em empresas como Ptel, Promon, Marte, Cepel e PA Consulting.

(4) FABIANO SCHMIDT

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFMT em 2010. Possui mestrado e doutorado pela UNICAMP em 2013 e 2017, respectivamente, onde realizou pesquisas em modelagem matemática/computacional na área de estimação de estado em sistemas de energia elétrica. É analista na Superintendência de Transmissão de Energia da EPE desde 2015. Nesse período tem trabalhado com estudos elétricos para o planejamento da expansão da transmissão.

(5) JOSE MARCOS BRESSANE

José Marcos Bressane Graduado em engenharia elétrica pela Escola Politécnica da USP, com mestrado em sistemas elétricos de potência pela Washington State University, USA. Funcionário da Empresa de Pesquisa Energética há 16 anos, hoje é o Superintendente de Transmissão de Energia e anteriormente foi Assessor da Diretoria de Estudos de Energia Elétrica, exercendo atividades de coordenação executiva do Plano Decenal de Energia – PDE e de análise de viabilidade técnico-econômica de projetos de expansão da geração/transmissão. Antes da EPE, atuou na engenharia consultiva, nas áreas de concepção, dimensionamento e viabilidade de projetos integrados de geração-transmissão e termelétricidade-gasodutos.

