



GRUPO - IV

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

ESQUEMA DE ALÍVIO DE CARGA POR SUBTENSÃO NA SE BOA VISTA PARA EVITAR PROBLEMAS DE ESTABILIDADE DE TENSÃO DECORRENTES DA CONTINGÊNCIA DO COMPENSADOR ESTÁTICO

**João Paulo Fernandes Lima (*)
ELETROBRAS ELETRONORTE**

RESUMO

A recente entrada em operação do Compensador Estático da SE Boa Vista proporcionou diversos benefícios para a operação do sistema elétrico de Roraima, destacando-se a possibilidade de se elevar o intercâmbio máximo com o sistema elétrico da Venezuela. Entretanto, nos cenários com elevada importação, a perda deste equipamento posiciona o sistema em uma região de instabilidade de tensão, resultando em níveis de tensão inaceitáveis.

Tendo em vista que o colapso de tensão decorrente dessa contingência é um fenômeno rápido, um esquema de alívio de carga por subtensão é requerido. A efetividade desse esquema é demonstrada por meio de simulações dinâmicas.

PALAVRAS-CHAVE

Roraima, estabilidade, estabilidade de tensão, colapso de tensão, compensador estático.

1.0 - INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de Roraima, atualmente suprido por uma conexão internacional denominada Interligação Brasil – Venezuela, possui característica de suprimento radial, possuindo cerca 700 km da UHE Macáguas, usina hidráulica mais próxima do sistema, até a SE Boa Vista, centro de carga do sistema Roraima, conforme apresentado no diagrama da Figura 1. Sistemas com esta topologia, caracterizados por baixos níveis de curto-circuito, são suscetíveis a problemas de estabilidade de tensão, os quais são potencializados pela elevação da carga no período seco com crescente número de aparelhos de ar condicionado.

A recente entrada em operação do Compensador Estático – CE, -20/+70 Mvar - 230kV, na SE Boa Vista proporcionou diversos benefícios para a operação do sistema elétrico de Roraima, destacando-se a possibilidade de se elevar o intercâmbio máximo com o Sistema da Venezuela de 95 MW até cerca de 160 MW, reduzindo a geração térmica complementar necessária por razões elétricas.

Entretanto, para elevar esse intercâmbio, é necessária uma significativa injeção de reativos pelo compensador estático. Nesse caso, a perda do CE pode levar o sistema para uma região de instabilidade de tensão, resultando em níveis de tensão inaceitáveis (colapso de tensão).

Visando evitar o colapso de tensão decorrente da perda do CE, torna-se necessário realizar corte de carga, reposicionando o sistema na região estável. Tendo em vista que o colapso de tensão resultante da perda do CE é um fenômeno rápido típico de estabilidade transitória de tensão, com escala de tempo inferior a um segundo, torna-se necessária a implantação um Sistema Especial de Proteção – SEP de alívio de carga por subtensão.

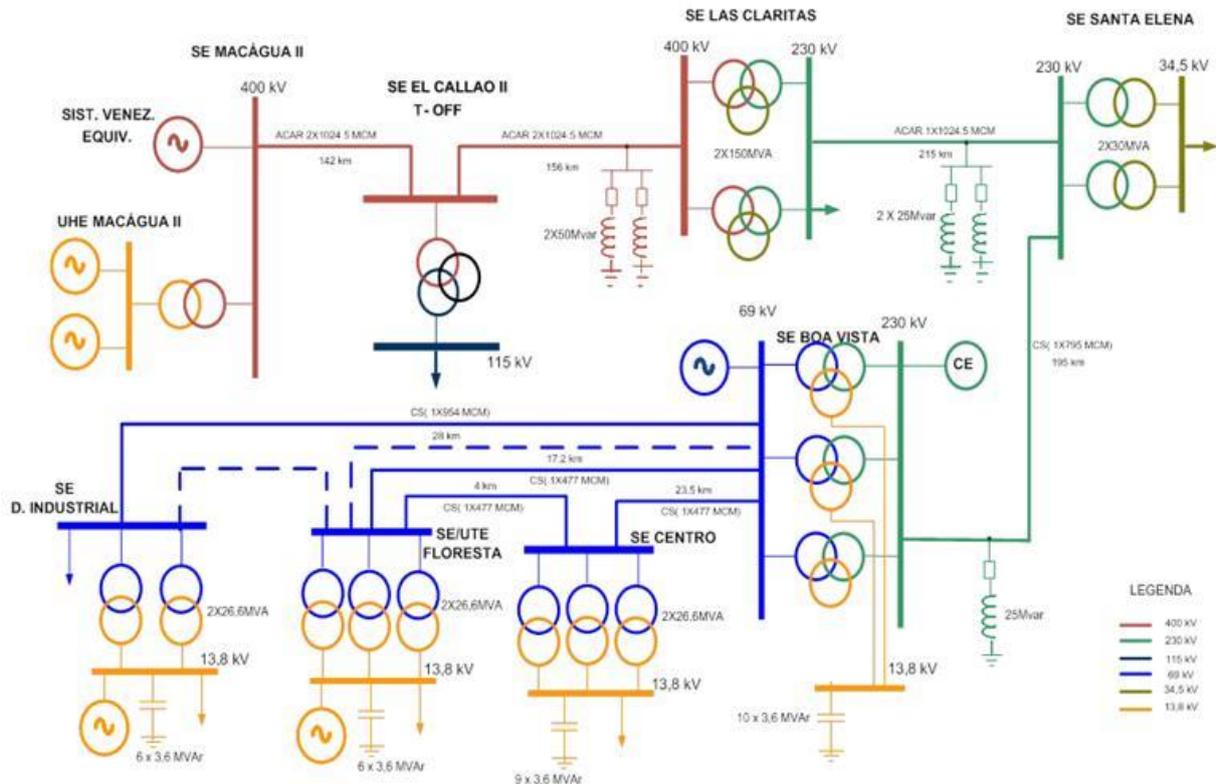


Figura 1 – Diagrama unifilar da interligação Brasil-Venezuela

2.0 - DESEMPENHO DINÂMICO PARA A CONTINGÊNCIA DO COMPENSADOR ESTÁTICO

Nesta seção, evidencia-se, por meio de simulações e registros de eventos reais, o desempenho dinâmico do Sistema Roraima para a contingência do Compensador Estático **sem considerar a atuação do esquema de alívio de carga proposto**.

2.1 Análise de eventos reais referentes a perda do Compensador Estático

Para ilustrar o desempenho do sistema Roraima para a perda do compensador estático, apresenta-se a análise da perturbação ocorrida em 02.03.2016 as 20h05, quando ocorreu o desligamento deste compensador resultando em colapso de tensão seguido de rejeição parcial das cargas supridas.

A configuração da SE Boa Vista 230/69/13,8 kV antes da perturbação era a seguinte:

- Fluxo na interligação Brasil - Venezuela: 127 MW;
- Tensão na barra de 230 kV: 1,04 pu;
- Injeção de reativos pelo compensador estático estimada entre +20 e +30 Mvar.

A Figura 2 mostra o registro oscilográfico do evento. A Tabela 1 mostra a sequência dos eventos com seus respectivos tempos e consequências para o sistema.

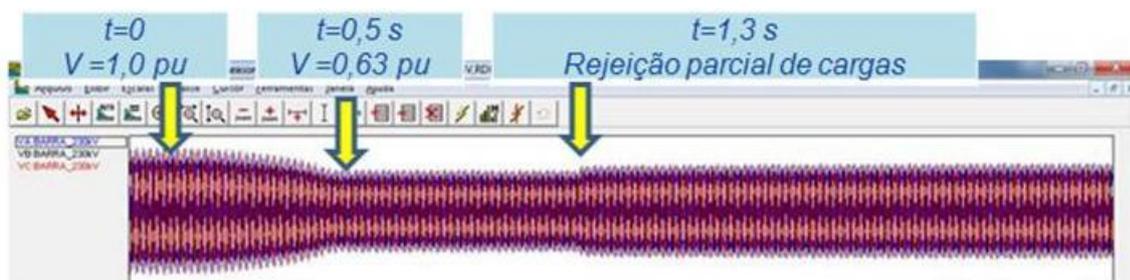


Figura 2 – Registro oscilográfico de colapso de tensão resultante da perda do CE – dia 02.03.2016 as 20h05

Tabela 1 – Sequência dos eventos para a perturbação do dia 02.03.2016 as 20h05

Evento	Tempo	Consequência
Desligamento automático do CE	t = 0	Esta contingência leva o sistema para a região instável, ocasionando rapidamente o colapso de tensão
Subtensão sustentada em 0,63 pu	t = 0,5 s	Saída das cargas mais sensíveis. Sobrecarga em motores de indução. Possível estol de alguns motores de indução
Rejeição parcial de cargas supridas pela SE Distrito Industrial	t = 1,3 s	A perda de cerca de 40% das cargas supridas pela SE Distrito Industrial (cerca de 15% da carga total do Sistema Roraima) contribui decisivamente para a recuperação da tensão, a qual se eleva de forma lenta, seguindo a característica dinâmica das cargas e a característica da rede com baixo nível de curto circuito
Abertura automática de bancos de capacitores por sobretensão na SE Boa Vista	t = 18 s	Reduz a tensão após a verificação de sobretensão acima de 110% na SE Boa Vista
Inserção automática do reator por sobretensão na SE Boa Vista	t = 23 s	Reduz a tensão após a verificação de sobretensão acima de 110% na SE Boa Vista
Regime permanente após a perda do CE	t = 60 s	Tensões na faixa operativa. Fluxo na interligação Brasil – Venezuela se estabiliza em cerca de 65 MW
Rápido crescimento da carga	t = 240 s	Fluxo na interligação Brasil – Venezuela se eleva para 90 MW (elevação de 38% em 3 minutos)

Nota-se, conforme a Figura 2, que a tensão na barra de 230 kV apresenta uma rápida redução, sustentando-se em valor em torno de 60% da tensão nominal cerca de 0,5 segundo após a perda do CE. Nos registros oscilográficos verificados para os demais eventos caracterizados pela perda do CE, observa-se o mesmo comportamento transitório da tensão, ou seja, o colapso ocorre com escala de tempo inferior a um segundo.

Decorridos 1,3 segundos após a perda do CE, ocorre a rejeição parcial de cargas supridas pela SE Distrito Industrial, da ordem de 15% da carga total do sistema, evento de fundamental importância para a recuperação da tensão no Sistema Roraima. Após esta redução das cargas supridas pela SE Distrito Industrial, inicia-se uma lenta recuperação da tensão, seguindo a dinâmica das cargas e a característica da rede com baixo nível de curto circuito. O lento retorno desta tensão configura-se como problema de qualidade de energia, favorecendo a saída de cargas mais sensíveis, bem como sobrecarga em motores de indução.

Dezoito segundos após a perda do CE, ocorre sobretensão sustentada na SE Boa Vista, decorrente da redução da carga suprida pela interligação Brasil–Venezuela, ocasionando desligamento automático dos bancos de capacitores da SE Boa Vista 13,8 kV. Verifica-se que esta sobretensão não é eliminada e após cinco segundos da saída dos bancos de capacitores, ocorre a inserção automática do reator.

Sessenta segundos após a saída do CE, verifica-se uma condição de regime permanente com tensões dentro da faixa operativa e fluxo na interligação Brasil-Venezuela em torno de 65 MW, ou seja, com redução de 50% no fluxo pela interligação, sendo a rejeição parcial de cargas decorrente da subtensão sistêmica que se estabelece como consequência da perda do CE.

Após a estabilização da tensão, o sistema apresenta rápido crescimento da carga e o fluxo na interligação atinge 90 MW cerca de 4 minutos após a perda do CE, ou seja, um crescimento de 25 MW neste período. Este crescimento pode acarretar novos colapsos de tensão, tendo em vista que o CE está fora de operação, o reator está energizado e os bancos de capacitores da SE Boa Vista que desligaram automaticamente por sobretensão ficam indisponíveis por cerca de 10 minutos. Verificou-se a ocorrência de novos colapsos de tensão após o colapso de tensão inicial resultante da perda do CE na perturbação do dia 04.02.2016, em que o colapso inicial decorrente da perda do CE ocorreu em 01h24, seguidos de novos colapsos em 01h28, 01h31 e 01h34, ou seja, com intervalo de tempo de 3 minutos entre eles. Este efeito pode ser relacionado ao rápido crescimento no carregamento do sistema após o colapso da tensão, o que gera um novo colapso como consequência, caracterizando um ciclo de repetição.

Na Tabela 2 são apresentadas algumas perturbações em que ocorreu o desligamento do compensador estático, observando-se que a redução no suprimento a partir da SE Boa Vista decorrente do colapso de tensão fica em torno de 35 a 50%. Para a perturbação do dia 17.04.16, ocorreu inicialmente uma redução de 43% no suprimento, entretanto, 2 minutos após, ocorreu rápido crescimento da carga culminando num segundo colapso sem recuperação da tensão, com consequente blecaute do Sistema Roraima pela atuação da proteção 51V dos transformadores da SE Boa Vista.

Tabela 2 – Algumas perturbações com desligamento automático do compensador estático seguido de colapso de tensão no Sistema Roraima

Data	Hora	Condição de regime permanente - Intercâmbio		Redução percentual no intercâmbio
		Pré-contingência	Pós-contingência	
02/03/16	21h06	122 MW	65 MW	47%
06/03/16	17h18	132 MW	79 MW	40%
09/03/16	05h57	123 MW	71 MW	42%
11/03/16	15h45	130 MW	86 MW	34%
13/03/16	08h23	107 MW	65 MW	39%
17/04/16	04h13	129 MW	73 MW e blecaute cerca de 3 minutos depois	43%

2.2 Simulações da perda do Compensador Estático

Nas simulações referentes à perda do CE, considerou-se um cenário operativo de referência, caracterizado pela seguinte condição de regime permanente pré-contingência:

- Fluxo na interligação Brasil – Venezuela (terminal Boa Vista): 120 MW – j 30 Mvar;
- Tensão SE Boa Vista 230 kV: 1,028 pu;
- Tensão SE Boa Vista 69 kV: 1,035 pu;
- CE fornecendo +13 Mvar;
- Geração térmica: 0 MW;
- 06 Bancos de capacitores 3,6 Mvar/13,8 kV energizados na SE Boa Vista;
- Reator +25 Mvar/230 kV da LT 230 kV Boa Vista – Santa Elena desenergizado.

2.2.1. Simulações de fluxo de potência

A Figura 3 apresenta a curva PxV do sistema obtida para o cenário operativo supracitado, tendo como referência a barra de 230 kV da SE Boa Vista, **porém com o CE fora de operação**. Observa-se que, para a configuração sem o compensador estático, o limite da transmissão para o cenário considerado (nariz da curva) é igual a 113 MW.

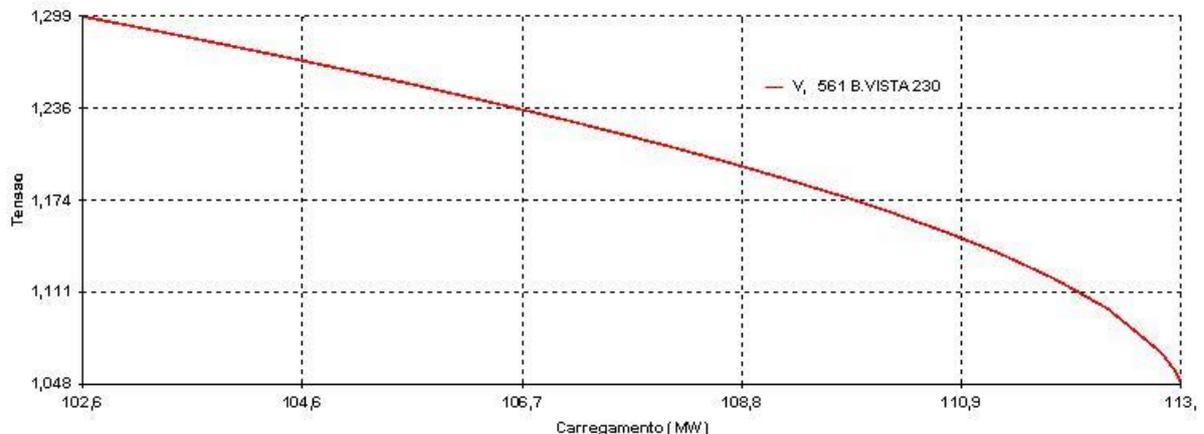


Figura 3 – Curva PxV para o cenário operativo considerado, CE fora de operação

Entretanto, no cenário operativo de referência considerado e com o CE em operação, o sistema opera com importação igual a 120 MW. Portanto, quando ocorre a perda do CE, o sistema não é capaz de suprir a potência de 120 MW, tendo em vista que seu carregamento máximo é igual a 113 MW, caracterizando a violação do limite de estabilidade de tensão.

2.2.2. Simulações dinâmicas

Conforme demonstrado nas simulações de fluxo de potência, a contingência do CE no cenário de referência ocasiona violação do limite de estabilidade de tensão do sistema, o que também será demonstrado nesta seção por meio de simulações dinâmicas.

A modelagem das cargas do Sistema Roraima foi realizada da seguinte maneira:

- 55%: carga estática (modelo ZIP), representando a parcela da carga com impedância constante;
- 45%: motores de indução, representando a parcela da carga com potência constante.

A modelagem dinâmica da carga foi ajustada a partir da resposta dinâmica do sistema registrada em eventos reais. A Figura 4 apresenta a característica torque x escorregamento dos motores de indução, em valores por unidade, para diversos valores de tensão. Para a curva de torque mecânico (carga), utilizou-se um modelo composto por uma parcela de torque constante e outra parcela de torque quadrático.

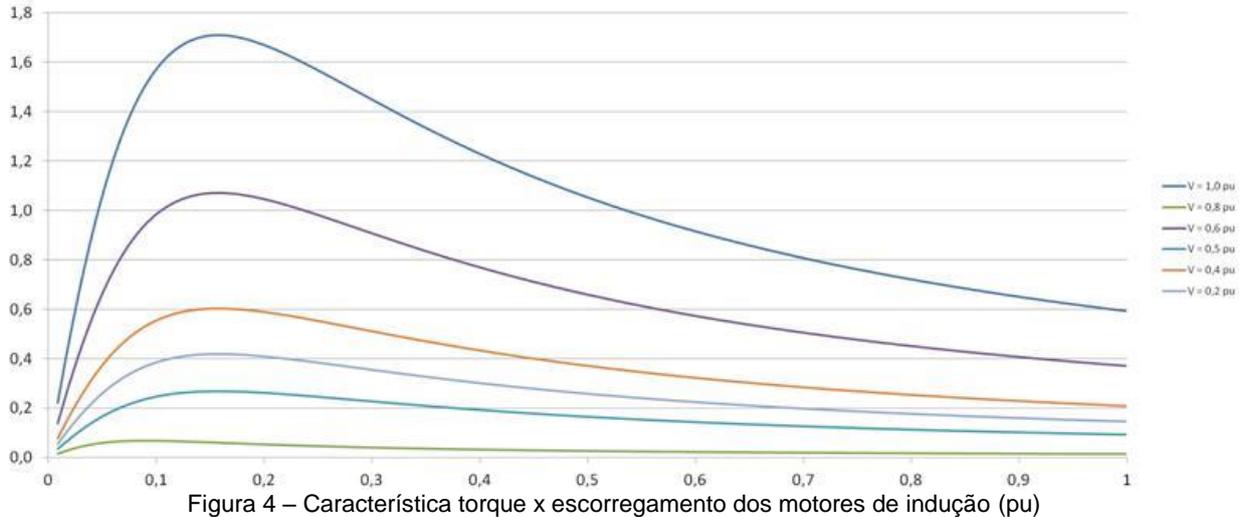


Figura 4 – Característica torque x escorregamento dos motores de indução (pu)

Para a simulação no programa Anatem, foram considerados os seguintes eventos:

- $t = 0,5 \text{ s}$ – desligamento do CE;
- $t = 5,0 \text{ s}$ – desligamento de cargas atendidas a partir da LD 69 kV Distrito Industrial – Mucajá, cerca de 18% das cargas do sistema.

A Figura 5 apresenta a tensão na SE Boa Vista 230 kV. Observa-se que após a saída do CE ($t=0,5 \text{ s}$) ocorre rápida redução na tensão, a qual estabiliza-se em valor próximo de 0,6 pu em tempo inferior a 1 segundo, caracterizando o colapso pela violação do limite de estabilidade do sistema, e compatível com os registros oscilográficos de eventos reais. Após o corte de 18% das cargas do sistema, quatro segundos e meio após o desligamento do CE, a tensão se eleva lentamente, atingindo valores dentro da faixa operativa cerca de 18 segundos após o corte de carga, também compatível com as oscilografias das perturbações. O lento retorno desta tensão configura-se como problema de qualidade de energia, favorecendo a saída das cargas mais sensíveis, bem como sobrecarga em motores de indução.

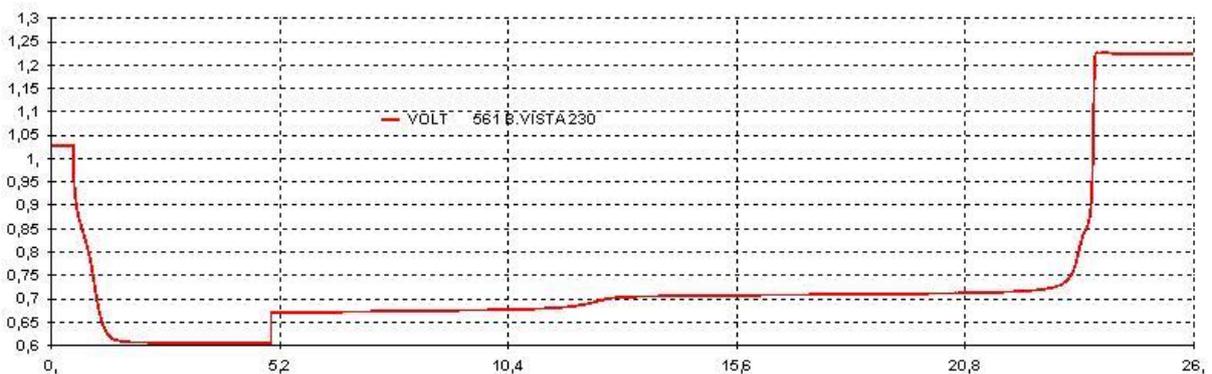


Figura 5 – Tensão na SE Boa Vista 230 kV (pu)

A sobretensão em torno de 1,20 pu verificada na simulação após a estabilização é decorrente da rejeição parcial das cargas e também está compatível com os registros oscilográficos, tendo em vista que, nas perturbações verificadas, ocorre atuação dos esquemas de sobretensão da SE Boa Vista (retirada de bancos de capacitores e inserção do reator) de 15 a 25 segundos após a abertura do CE.

A Figura 6 apresenta o escorregamento dos motores de indução conectados na SE Centro 13,8 kV. Observa-se a drástica redução de velocidade (elevação do escorregamento até 0,705) resultante do colapso de tensão. Após o corte de 18% das cargas do sistema, quatro segundos e meio após o desligamento do CE, a velocidade dos motores se eleva lentamente seguindo sua característica dinâmica. A lenta recuperação da velocidade dos motores está associada a lenta elevação da tensão verificada na Figura 5.

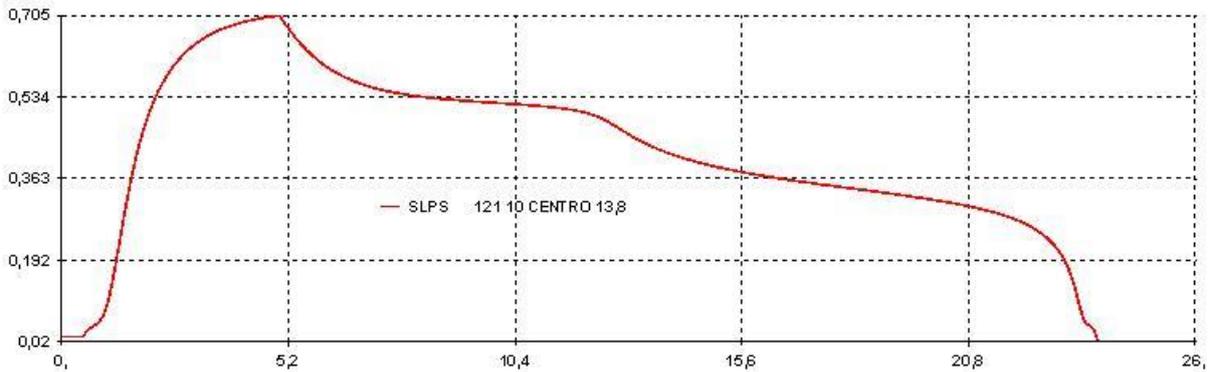


Figura 6 – Escorregamento dos motores de indução (pu)

A Figura 7 apresenta a corrente dos motores de indução da SE Centro, verificando-se sobrecarga sustentada associada a subtensão sistêmica, atingindo patamares de até 100%, o que pode danificar ou reduzir vida útil deste tipo de carga, evidenciando o problema de qualidade de energia. A sobrecarga é eliminada após o retorno da tensão para a faixa operativa normal, o que ocorre cerca de vinte e dois segundos após a saída do CE.

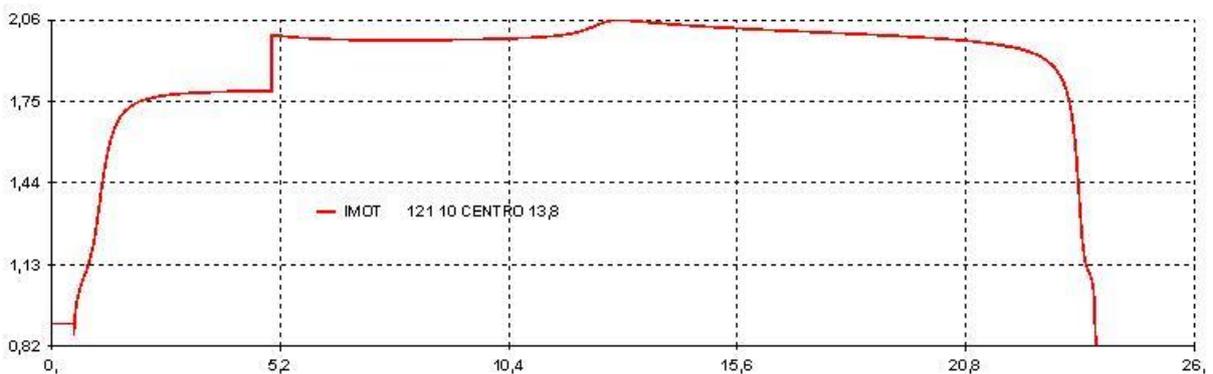


Figura 7 – Corrente dos motores de indução (pu)

3.0 - SISTEMA ESPECIAL DE PROTEÇÃO PROPOSTO

O Sistema Especial de Proteção - SEP proposto é um esquema de alívio de carga por subtensão que possui como objetivo eliminar as subtensões sustentadas no Sistema Roraima pela violação dos limites de estabilidade de tensão resultantes da perda do compensador estático da SE Boa Vista.

Na lógica de funcionamento desse SEP, a Linha de Distribuição - LD 69 kV Boa Vista – Distrito Industrial é automaticamente aberta quando:

- Ocorrer o comando de abertura do disjuntor do compensador estático por qualquer uma de suas proteções e;
- a tensão na SE Boa Vista 69 kV (monitoramento trifásico) atingir valor menor ou igual a 82% da tensão nominal, com temporização instantânea.

Portanto, o SEP proposto monitora a condição operativa do CE. Havendo trip por qualquer uma de suas proteções, e verificada subtensão abaixo de 0,82 pu na SE Boa Vista 69 kV, o SEP desliga automaticamente a LD 69 kV Boa Vista – Distrito Industrial visando evitar a incidência de subtensão sustentada em todo o sistema.

Além das cargas do sistema de distribuição, existem duas usinas termelétricas conectadas à SE Boa Vista por meio da LD 69 kV Boa Vista – Distrito Industrial, sendo que a carga cortada pelo SEP depende da combinação entre a carga suprida e a geração sincronizada na região de Distrito Industrial. Após avaliação dos cenários mais adotados em tempo real, concluiu-se que a carga dessa LD totaliza cerca de 25 a 50% da importação do sistema Venezuelano. Esse montante de corte de carga é suficiente para reposicionar o sistema na região estável em todos os cenários operativos.

4.0 - ANÁLISE DE DESEMPENHO APÓS A IMPLANTAÇÃO DO SEP

Para verificar o desempenho deste SEP, foi analisado o mesmo caso simulado na seção 2.2.2, ou seja, considerou-se o seguinte cenário para a condição de regime permanente pré-contingência:

- Tensão SE Boa Vista 230 kV = 1,028 pu;
- Tensão SE Boa Vista 69 kV = 1,035 pu;
- Fluxo na interligação Brasil – Venezuela (terminal Boa Vista) = 120 MW – j 30 Mvar;
- Fluxo na LD 69 kV Boa Vista – Distrito Industrial = 36 MW (30% da importação);
- Geração térmica = 0 MW;
- 06 Bancos de capacitores 3,6 Mvar/13,8 kV energizados na SE Boa Vista;
- CE fornecendo +13 Mvar;
- Reator de linha +25 Mvar/230 kV desenergizado.

Os eventos simulados (gráficos em vermelho nas Figuras 8 a 10) são descritos a seguir:

- t = 0,50 s – desligamento do CE;
- t = 0,95 s – desligamento, pelo SEP, da LD 69 kV Boa Vista - Distrito Industrial. O tempo referente a esse evento leva em consideração que, após a detecção da subtensão, ainda há o tempo referente à abertura do disjuntor;
- t = 1,30 s – desligamento automático de um grupo de 3 bancos de capacitores por sobretensão

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam um comparativo de desempenho entre a atuação do SEP (corte de carga rápido) e o corte de carga após 3 segundos do início da subtensão. Pode-se observar que a ação rápida do SEP favorece o imediato retorno da tensão, face à pequena redução de velocidade dos motores de indução. O retorno rápido da tensão também elimina a sobrecarga sustentada nestes motores, melhorando a qualidade de atendimento às cargas.

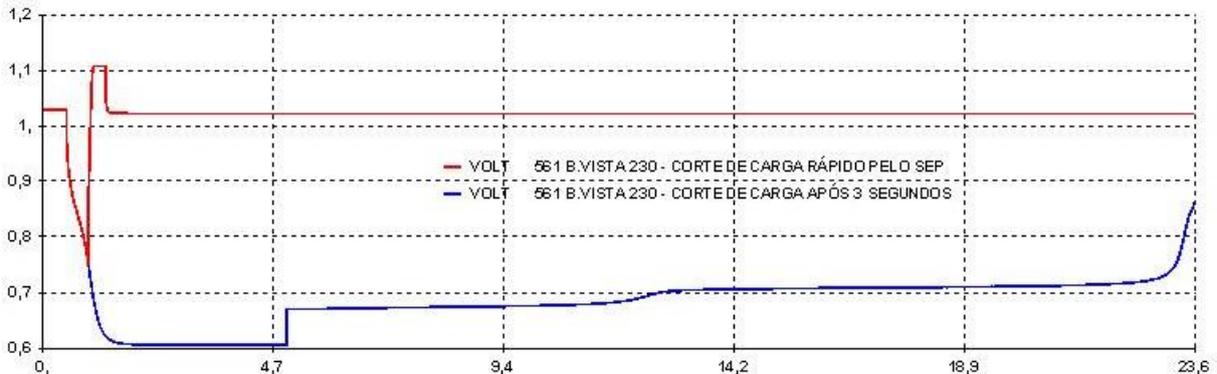


Figura 8 – Tensão na SE Boa Vista 230 kV

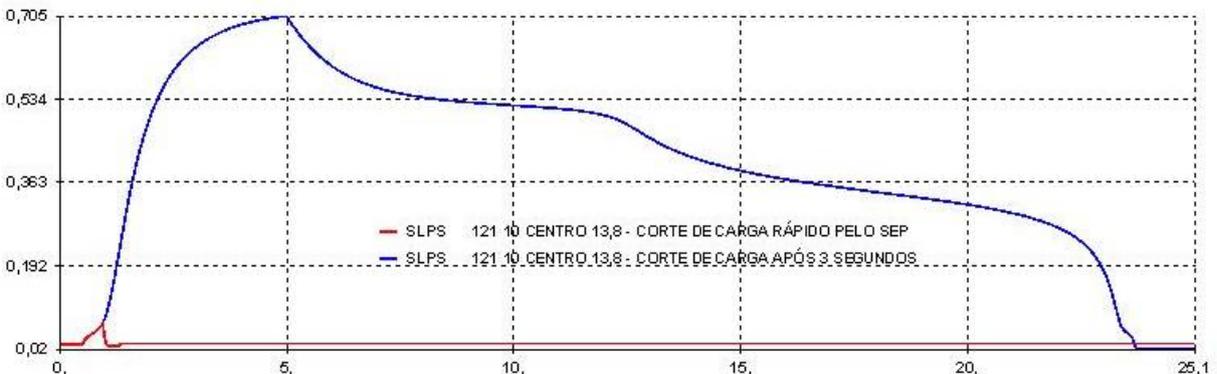


Figura 9 – Escorregamento dos motores de indução

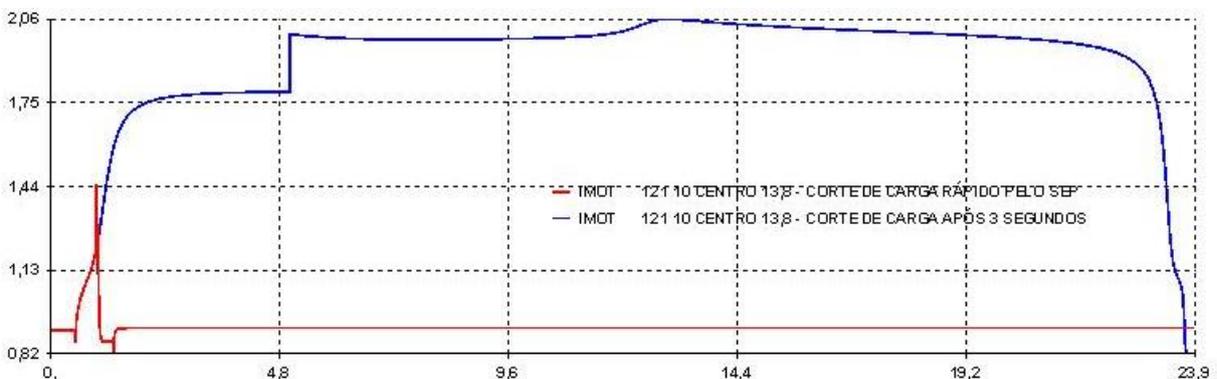


Figura 10 – Corrente dos motores de indução

Na simulação realizada, verificou-se que a sobretensão resultante do corte das cargas da SE Distrito Industrial foi mitigada com a abertura automática de apenas um grupo de bancos de capacitores na SE Boa Vista 13,8 kV, não havendo necessidade de inserção automática do reator.

A Figura 11 mostra a importação de potência ativa pela interligação Brasil-Venezuela (terminal SE Boa Vista), verificando-se que, com a atuação do SEP, ocorre redução em torno de 30% no valor da potência ativa, ou seja, montante inferior aos valores de redução de fluxo de até 50% verificados nas perturbações. Espera-se que, com a atuação do SEP, a rejeição de cargas por subtensão seja minimizada, sendo a redução na carga da interligação devida em sua maior parte ao corte intencional das cargas da SE Distrito Industrial.

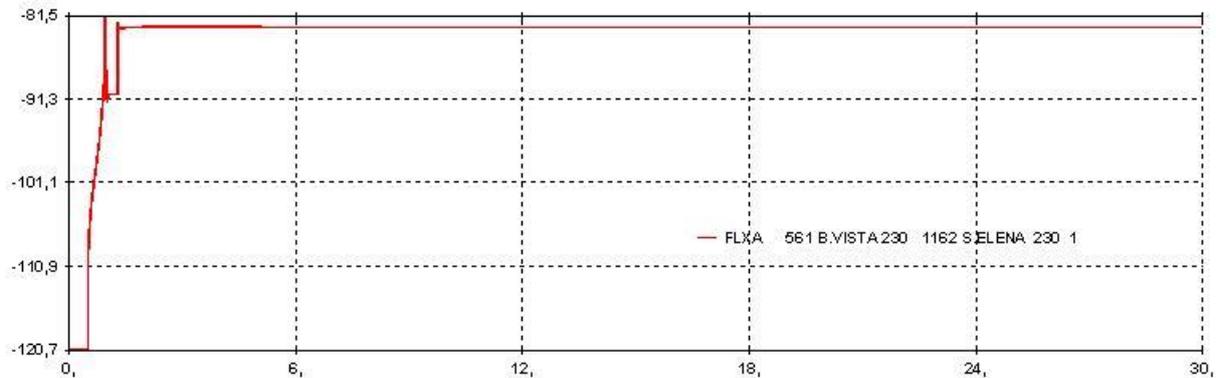


Figura 11 – Importação de potência ativa pela interligação Brasil-Venezuela (terminal SE Boa Vista) com a atuação do SEP

5.0 - CONCLUSÕES

As simulações dinâmicas realizadas demonstraram a efetividade do esquema de alívio de carga proposto, o qual evita o colapso de tensão decorrente da contingência do CE, reposicionando o sistema na região estável. Cabe ressaltar a boa representatividade das simulações efetuadas, todas consistidas com oscilogramas de eventos reais, destacando-se que foi adotada uma modelagem dinâmica para as cargas, cujos parâmetros também foram ajustados a partir de registros de perturbações.

Diversos benefícios sistêmicos resultam da implantação do SEP proposto. Espera-se que a ação rápida de corte de carga possa eliminar a subtensão sustentada no Sistema Roraima com lento retorno da tensão, da ordem de 10 a 20 segundos, como consequência da perda do CE, resultando em melhor qualidade de atendimento às cargas remanescentes (SEs Centro e Floresta), prevenindo-se o efeito de redução da velocidade e consequente sobrecarga em motores de indução, bem como minimizando a rejeição das cargas mais sensíveis por subtensão.

Outro benefício esperado é o maior controle na recomposição das cargas. Sem a atuação do SEP, observa-se rápido crescimento da demanda do sistema após o colapso de tensão, verificando-se crescimento do fluxo na interligação da ordem de 15 a 30 MW em 3 minutos, podendo resultar em novo colapso de tensão, conforme já observado nas perturbações. Com a atuação do SEP, espera-se que a perda de carga por subtensão nas SEs remanescentes (Floresta e Centro) seja minimizada, propiciando maior estabilidade no fluxo da interligação. Adicionalmente, a recomposição das cargas supridas pela SE Distrito Industrial será totalmente controlada pela operação local.

Em todos os cenários avaliados, houve apenas abertura de bancos de capacitores por sobretensão após o corte da LD 69 kV Boa Vista – Distrito Industrial, não havendo necessidade de inserção automática do reator. Na maioria das oscilografias de eventos referentes à perda do CE sem a atuação do SEP, ocorreu inserção deste reator, face à elevada redução no fluxo da interligação (resultante da rejeição de cargas por subtensão) associada à permanência dos bancos de capacitores no sistema de distribuição. A não entrada do reator facilita a recomposição das cargas, haja vista que a retirada deste reator só pode ser feita com o CE em operação ou em conjunto com 5 bancos de capacitores da SE Boa Vista por meio do esquema de manobra simultânea atualmente implantado.

Espera-se também que, após a implantação do SEP proposto, não ocorram blecautes pela atuação da proteção 51 V dos transformadores da SE Boa Vista por razões sistêmicas, ou seja, em situações de subtensão sustentada abaixo de 0,6 pu por violação do limite de estabilidade e sem curto circuito no sistema.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) P. M. Anderson and A. A Fouad. Power System Control and Stability. The Iowa State University Press, 1977.
- (2) C.W. Taylor, " Power System Voltage Stability" , Mc-Graw Hill, 1994.
- (3) AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The Continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. IEEE Transactions Power System, New York, v. 7, n. 1, p. 304-311, 1992.
- (4) R.B. Prada, E.G.C. Palomino, J.O.R. dos Santos, A. Bianco & L.A.S. Pilotto, "Voltage Stability Assessment for Real Time Operation", Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, Issue 2, March 2002, pp.175-180.
- (5) J.A. Passos Filho, L.C.A. Ferreira, N. Martins, A.C.Z. Souza, "Benefícios da Representação do Controle Automático e Discreto de Bancos de Capacitores/Reatores e de LTC Sistêmicos em Estudos de Segurança de Tensão", XVII SNPTEE, Uberlândia, MG, outubro 2003.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



João Paulo Fernandes Lima, natural de Goiânia-GO, graduou-se em engenharia elétrica em 2003 pela Universidade Federal de Goiás, tendo recebido o título de mestre pela mesma instituição em 2005. É engenheiro de operação da Eletrobras Eletronorte desde 2011, com atuação na área de estudos elétricos da operação de sistemas. Atualmente, desenvolve estudos operacionais e pré-operacionais para o sistema elétrico de Roraima, contemplando as análises de fluxo de potência, estabilidade eletromecânica, curto-circuito e transitórios eletromagnéticos.