



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

**ESTUDOS PRÉ-OPERACIONAIS PARA A ENTRADA EM OPERAÇÃO DA INTERLIGAÇÃO ACRE-
RONDÔNIA – VALIDAÇÃO ATRAVÉS DE MEDIÇÕES EM CAMPO**

**JOÃO FERREIRA
DE LIMA FILHO ***
Potência
Engenharia

**NUNO HENRIQUE MOURA
NUNES BRITO**
Eletronorte

**MÔNICA BRAGA
TEIXEIRA**
Eletronorte

**RICARDO MARCELO
TEIXEIRA**
Eletronorte

RESUMO

Com a entrada em operação da Interligação Acre-Rondônia, em Novembro 2002, o sistema Rondônia, operado pelas Empresas Eletronorte e Ceron, passou a se interligar ao sistema Acre, anteriormente isolado e operado pelas Empresas Eletronorte e Eletoacre, através das LTs Porto Velho-Abunã 230 kV, Abunã-Rio Branco 230 kV, Rio Branco-Tangará 69 kV e Rio Branco-São Francisco 69 kV, com atendimento a Guajará Mirim em 138 kV derivado de Abunã.

O atendimento ao Sistema Acre passa a ser totalmente dependente do Sistema Rondônia, uma vez que as unidades térmicas não mais operam em paralelo com Sistema Interligado.

A interligação em 230 kV liga Porto Velho a Rio Branco através de um circuito simples com cerca de 490 km, composto de dois trechos; Porto Velho-Abunã 230 kV com 188 km e Abunã-Rio Branco 230 kV com 302 km, com uma SE intermediária 230/138/13.8 kV-55/55/18 MVA em Abunã, escoando energia para o Sistema Acre através da SE 230/69/13.8 kV-100/100/33 MVA em Rio Branco, conforme Figura 1.

Estudos pré-operacionais de regime permanente e de transitórios eletromagnéticos foram desenvolvidos para permitir a operação segura e recomposição com sucesso, sem risco de danos aos equipamentos envolvidos.

Por se tratar de sistema com trechos eminentemente radiais, a recomposição é caracterizada por baixo amortecimento, podendo implicar em elevadas tensões e riscos de atuação das proteções de sobretensão e diferencial do transformador 230/69/13.8 kV-100/100/33 MVA a ser energizado em Rio Branco.

Problemas de sobretensões sustentadas devidas à rejeição de carga foram identificados, implicando em necessidade de implementação de esquemas de controle de emergência para desligamento

automático de bancos de capacitores e/ou inserção automática de reatores

Desta forma, o presente informe técnico apresenta os aspectos mais importantes relativos aos estudos pré-operacionais de regime permanente e de transitórios eletromagnéticos de energização e rejeição de carga.

Também é discutida validação dos estudos através de medições em campo.

PALAVRAS-CHAVE:

Regime Permanente, Energização, Rejeição de Carga, Validação de Modelos e Testes em Campo.

1.0 - INTRODUÇÃO

Com a entrada em operação da Interligação Acre-Rondônia, o sistema Acre, anteriormente isolado, passou a receber energia do Sistema Rondônia, através da UHE Samuel (Eletronorte) e UTE Termo Norte (Produtor Independente).

Na SE Rio Branco, através do TF 230/69/13.8 kV-100 MVA, esta energia é escoada pelo sistema de subtransmissão em 69 kV e, nas SEs Tangará e São Francisco, é distribuída em 13.8 kV (Figura 1).

**2.0 - ESTUDOS DE REGIME PERMANENTE E
MEDIÇÕES**

Foram realizados estudos pré-operacionais em condição normal e em contingência para atendimento às condições de carga mostradas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Condições de Carga

Carga	Rondônia	Acre	Total
Máxima	277 MW	75 MW	352 MW
Média	221 MW	60 MW	281 MW
Mínima	139 MW	37 MW	176 MW

Observa-se, na Figura 1, as características eminentemente radiais dos trechos Samuel – Ji Paraná 230 kV e Porto Velho – Rio Branco 230 kV, exigindo várias manobras de bancos de capacitores de 3.6 Mvar e 1.8 Mvar-13.8 kV ao longo da jornada diária na Interligação Acre-Rondônia (Tabela 2-2)

Tabela 2-2 Configuração de Bancos de Capacitores Necessários em Regime Permanente

Local	Máxima	Média	Mínima
Areal 13.8 kV	8 x 3.6 Mvar	7 x 3.6 Mvar	1 x 3.6 Mvar
Alfa Ville 13.8 kV	9 x 3.6 Mvar	8 x 3.6 Mvar	1 x 3.6 Mvar
Ji Paraná 230 kV	1 x 18.5 Mvar	1 x 18.5 Mvar	1 x 18.5 Mvar
Rolim de Moura 13.8 kV	3 x 3.6 Mvar	3 x 3.6 Mvar	-
Guajará Mirim 13.8 kV	1 x 1.8 Mvar	1 x 1.8 Mvar	-
São Francisco 13.8 kv	3 x 3.6 Mvar	2 x 3.6 Mvar	-
Tangará 13.8 kV	3 x 3.6 Mvar	2 x 3.6 Mvar	-

No dia 15/11/02 se iniciou o processo de energização da LT Abunã-Rio Branco 230 kV 302 km e tomada de carga e, a partir daí, foi feito acompanhamento em campo para validação dos estudos.

A Tabela 2-3 apresenta tensões medidas e simuladas, em regime permanente, antes e após a energização em vazio das LTs Porto Velho-Abunã 230 kV e Abunã-Rio Branco 230 kV.

De acordo com esta Tabela 2-3, a diferença em kV da tensão simulada no terminal remoto com relação ao terminal energizado para a LT Porto Velho-Abunã 230 kV foi de - 0.46 kV, enquanto esta diferença medida foi de - 0.92 kV, discrepância esta de 0.46 kV, dentro da precisão de 1 % (2.3 kV) dos transdutores associados aos instrumentos de medição.

De acordo ainda com a Tabela 2-3, a diferença em kV da tensão simulada do terminal remoto com relação ao terminal energizado para a LT Abunã-Rio Branco 230 kV foi de - 6.67 kV, enquanto esta diferença medida foi de - 6.44 kV, discrepância esta de 0.23 kV, dentro da precisão de 1 % (2.3 kV) dos transdutores associados aos instrumentos de medição.

Estes resultados de simulação e medição validam o parâmetros de regime permanente das LTs Porto Velho-Abunã 230 kV e Abunã-Rio Branco 230 kV.

Os estudos de regime permanente destacam as seguintes conclusões:

- Para atendimento aos critérios de recomposição e tomada de carga, há necessidade de se usar o

segundo reator manobrável de 30 Mvar/230 kV em Rio Branco I para energização da LT Abunã-Rio Branco I 230 kV e obtenção de 1.05 pu de tensão nesta SE quando da energização do TF 230/69/13.8 kV-100/100/33 MVA e subsequente tomada de carga.

- Até que se tome carga que corresponda a um fluxo da ordem de pelo menos 20 MW na LT Abunã-Rio Branco I 230 kV, medido em Rio Branco I, o reator manobrável 30 Mvar/230 kV nesta SE não deve ser desligado. No sentido inverso, caso este fluxo em regime permanente retorne a valores inferiores a 20 MW, esse referido reator deve ser reconectado no sistema.

- Há carência de reativos para melhoria dos níveis de tensão em Rolim de Moura e Ji-Paraná.

- O impacto de manobra de banco de capacitores da Interligação Acre-Rondônia se situa entre 1.3 % e 8.5 %.

3.0 - ESTUDOS TRANSITÓRIOS DE ENERGIZAÇÃO E REJEIÇÃO DE CARGA E MEDIÇÕES

Não foram identificados, nos estudos transitórios, problemas para energização da LTS Porto Velho-Abunã 230 kV 188 km e Abunã-Rio Branco 230 kV 302 km nem do TF 230/69/13.8 kV-100 MVA de Rio Branco, na configuração normal de energização, com um reator de 30 Mvar para a LT Porto Velho-Abunã 230 kV e três reatores de 30 Mvar cada para a LT Abunã-Rio Branco 230 kV.

Observe-se que após a energização do TF 230/69/13.8 kV-100 MVA de Rio Branco e tomada de carga da ordem de 20 MW, o reator manobrável desta SE é desligado, operando-se normalmente com apenas três reatores 30 Mvar-230 kV cada no trecho Abunã-Rio Branco 230 kV.

Em todas simulações de energização, seja das LTs Porto Velho- Abunã 230 kV e Abunã-Rio Branco 230 kV ou do TF 230/69/13.8 kV-100 MVA de Rio Branco, suportável pelo sistema, foi observado que a energia nos pára-raios em Rio Branco 230 kV não atingiu valores preocupantes, o que ocorreu também com a corrente de energização ('inrush') que apresentou máximo valor de pico de 467 A (1.315 pu), máximo valor de pico médio de 229 A (0.645 pu) em 200 milissegundos (medido como média dos valores absolutos de dois picos adjacentes neste instante) e máximo de 187 A de pico médio (0.527 pu) em 1 segundo.

As Figuras 3-1 e 3-2 apresentam os resultados de simulação da energização do TF 230/69/13.8 kV-100/10033 MVA de Rio Branco, com tensão de pré-energização de 1.05 pu (241.5 kV, necessitando para isso se conectar o segundo reator 30 Mvar de Rio Branco 230 kV.

No dia 15/11/02 a LT Abunã-Rio Branco 230 kV foi energizada pela primeira vez, através do sistema Rondônia, uma vez que a LT Porto Velho-Abunã 230 kV já se encontrava em operação para atendimento a Guajará Mirim.

Neste mesmo dia foi energizado, também pela primeira vez, o transformador 230/69/13.8 kV -100 MVA de Rio Branco.

Foram realizadas 2 manobras de energização, como a seguir descrito:

MANOBRA 1

Energização da LT Abunã-Rio Branco 230 kV, com tensão de pré-energização de 1.025 pu (235.8 kV), às 16 horas e 6 minutos.

MANOBRA 2

Energização do TF 230/69/13.8 kV-100 MVA de Rio Branco, com tensão de pré-energização de 0.993 pu (228.4 kV), às 17 horas e 19 minutos.

Estas duas manobras foram bem sucedidas, não tendo havido necessidade de repetição em campo e nem tendo provocado atuação da proteção de sobretensão no sistema de transmissão ou da proteção diferencial no transformador.

A Figura 3-1 mostra a tensão simulada referente à energização do TF 230/69/13.8 kV –100 MVA de Rio Branco, onde se observa que o máximo valor de pico simulado foi de 1.466 pu (275.3 kVp) em Rio Branco 230 kV e sem risco de atuação da proteção de sobretensão, uma vez que, em 200 ms após a energização a tensão de pico médio se encontra em níveis inferiores a 1.25 pu (287.5 kV).

As Figura 3-2 mostra a corrente simulada referente à energização do TF 230/69/13.8 kV-100 MVA de Rio Branco, onde se observa que o máximo valor de pico de energização ("inrush") simulado foi de 467 Ap (1.315 pu) com relação à corrente nominal do TF de 355 Ap no 230 kV, reduzindo seu valor para 0.645 pu (229 Apm) de pico médio em 200 milissegundos, alcançando 0.527 pu (187 Apm) de pico médio em 1 segundo.

A Tabela 2-3, como já foi dito, apresenta tensões medidas e simuladas, em regime permanente, antes e após a energização em vazio das LTs Porto Velho-Abunã 230 kV e Abunã-Rio Branco 230 kV, onde se observa impacto em regime permanente na tensão em Porto Velho, após energização da LT Porto Velho-Abunã 230 kV, com relação à tensão de pré-energização, de 2.94 % simulado contra 1.29 % medido.

Esta discrepância se deve à diferença de configuração utilizada na simulação e a encontrada em campo, principalmente devida à configuração de unidades geradoras em Samuel e Termo Norte.

Pela Tabela 2-3 se observa também impacto em regime permanente na tensão em Abunã, após energização da LT Abunã-Rio Branco 230 kV, com relação à tensão de pré-energização, de -0.87 % simulado contra -0.10 % medido.

Esta discrepância se deve à diferença de configuração utilizada na simulação e encontrada em campo, principalmente devida à configuração de unidades geradoras em Samuel e Termo Norte.

Até a elaboração deste Informe Técnico, não se tinha disponíveis os registros transitórios de tensão e corrente de "inrush" associados à energização do TF 230/69/13.8 kV –100 MVA de Rio Branco.

Os estudos transitórios de energização destacam as seguintes conclusões:

- A LT Abunã-Rio Branco 230 kV poderia ser energizada com tensão de pré-energização de até 1.05 pu (242 kV, eficaz fase-fase), a partir de Abunã 230 kV com um reator 30 Mvar em cada

terminal, sob o ponto de vista de suportabilidade transitória dos equipamentos, pois a máxima tensão simulada foi de 2.22 pu (413 kV de pico) no terminal remoto da LT energizada. No entanto, devido a restrições de sobretensão em regime permanente, a energização desta linha deve ser efetivada obedecendo-se à configuração mínima de um reator 30 Mvar/230 kV em Abunã, saída Porto Velho, um outro reator 30 Mvar/230 kV em Abunã, saída Rio Branco e dois últimos reatores 30 Mvar/230 kV em Rio Branco, com tensão de pré-energização de até 1.05 pu (242 kV), com mínimo de duas unidades geradoras em Samuel e uma unidade geradora na Termo Norte ou três unidades em Samuel com a Termo Norte fora de operação, com ou sem carga em Abunã e com ou sem a LT Abunã-Guajará Mirim 138 kV previamente energizada

- As LTs Rio Branco-São Francisco 69 kV e Rio Branco-Tangará 69 kV podem ser energizadas com tensão de pré-energização de até 1.05 pu (72 kV, eficaz fase-fase), a partir de Rio Branco 69 kV, com ou sem carga em Rio Branco, obedecendo-se à configuração mínima de reatores, com mínimo de duas unidades geradoras em Samuel e uma unidade geradora na Termo Norte ou três unidades em Samuel com a Termo Norte fora de operação.

4.0 - ESTUDOS TRANSITÓRIOS DE REJEIÇÃO DE

CARGA

Os estudos transitórios de rejeição de carga recomendaram a imediata implementação de um esquema de controle de emergência na SE Ji-Paraná, para desligamento automático por sobretensão do banco de capacitores 18.5 MVAR/230 kV desta SE, quando a tensão no 230 kV desta mesma SE excedesse 1.10 pu (253 kV), com temporização de 1.1 segundos, atuando antes da inserção do reator 20 MVAR/230 kV por sobretensão nesta mesma SE, esquema este já em operação, com recomendação de ajuste de 1.10 pu (253 kV) e temporização de 1.5 segundos.

Estes estudos recomendaram, também, a imediata implementação de um esquema de controle de emergência na SE Rio Branco, para inserção automática por sobretensão do reator 30 Mvar/230 kV desta SE, quando a tensão no 230 kV excedesse 1.10 pu (253 kV) com temporização de 1.1 segundos, coordenado com a proteção de sobretensão temporizada.

Os estudos transitórios de rejeição de carga destacam as seguintes conclusões:

- Na rejeição total de carga em Rio Branco I, simulada pela abertura da carga equivalente à do Sistema Acre no 69 kV do TF 230/69/13.8 kV – 100/100/33 MVA nesta SE, com valor de 78 MW + j 9 MVAR, observa-se máxima sobretensão de 70.47 kV (1.251 pu) em Rio Branco I 69 kV, reduzindo-se para 62.95 kV (1.117 pu) após 200 milissegundos.
- A rejeição total de carga em Ji-Paraná, simulada pela abertura da carga equivalente à desta SE no 230 kV, com valor de 91 MW + j 22 MVAR, mantendo-se conectado no sistema remanescente o banco de capacitores 18.5 MVAR/230 kV em Ji-Paraná após a rejeição desta carga, observando-se máxima sobretensão de 292.64 kV (1.558 pu),

reduzindo-se para 214.92 (1.144 pu) após 200 milissegundos.

- Estes resultados se apresentam suportáveis pelos equipamentos do sistema por períodos de tempo da ordem de segundos, porém não deve sensibilizar a proteção de sobretensão temporizada, confirmando a necessidade de desligamento automático do banco de capacitores 18.5 MVar/230 kV de Ji-Paraná por sobretensão.

5.0 – METODOLOGIA COMPARATIVA DE SIMULAÇÃO X CAMPO DE TENSÕES E CORRENTES DEVIDAS A ENERGIZAÇÃO ESTATÍSTICA

A grande dificuldade, ao se tentar fazer análise comparativa simulação versus campo de tensões e correntes, devidas à energização de linhas e transformadores, é a característica estatística do fenômeno, causada pela dispersão nos instantes de fechamento dos polos dos disjuntores e do magnetismo residual no transformador.

Enquanto que na simulação a característica estatística pode ser simulada através de amostragem (normalmente entre 50 e 200 amostras) nos instantes de fechamento dos polos dos disjuntores e parametrização do magnetismo residual, no campo não é operacionalmente recomendável a execução de várias manobras com mesma configuração de energização, com intuito de se conseguir amostragem estatística adequada.

O mais importante na validação dos modelos dos equipamentos e elementos do sistema, com maior envolvimento no processo da energização, é a verificação da conformidade da forma de onda e amortecimento das tensões e correntes transitórias associadas.

Desta forma, não há necessidade de se fazer várias manobras em campo para obtenção de registros de tensões e correntes para efeito de comparação com simulações, desde que se proceda análise comparativa adequada. Registros com valores máximos inferiores aos simulados permitem a execução de tal análise.

A metodologia, aqui sugerida e apresentada, para análise comparativa simulação versus campo entre tensões e correntes transitórias, devidas à energização de linhas e transformadores, consiste dos seguintes passos:

- Identificar valor máximo da grandeza registrada
- Buscar na simulação estatística, o caso (amostra) cuja polaridade da grandeza em análise seja a mesma e cujo valor máximo seja o mais próximo do valor máximo registrado
- Reprocessar este caso com tempo total de simulação compatível com o registro obtido em campo, obtendo-se curva com polaridade coincidente e praticamente o mesmo pico
- Fazer análise comparativa, observando-se forma de onda (espectro harmônico, se necessário) e amortecimento

À título de ilustração em 2001, um transformador de mesma potência e relação de tensão que o TF 230/69/13.8 kV –100/100/33 MVA de Rio Branco, foi energizado pela primeira vez quando da entrada em

operação da Interligação Brasil-Venezuela, descrita na Referência [1], na SE Boa Vista.

Com a Interligação Brasil-Venezuela, o sistema Boa Vista, anteriormente isolado e operado pelas Empresas Eletronorte, Bovesa e Cer, passou a receber energia do Sistema da Venezuela, através da UHE Macagua, distante cerca de 700 km da SE Boa Vista, sendo cerca de 300 km em 400 kV e cerca de 400 km em 230 kV.

Na SE Boa Vista, através de dois TFs 230/69/13.8 kV-100 MVA, esta energia é escoada pelo sistema de subtransmissão em 69 kV e, nas SEs Centro e Floresta, é distribuída em 13.8 kV.

As Figuras 3-3 e 3-4 mostram as correntes de “inrush”, simulada e medida em campo respectivamente, associadas à energização do TF 230/69/13.8 kV –100/100/33 MVA de Boa Vista, onde se aplicou a metodologia comparativa de simulação x campo de tensões e correntes devidas a energização estatística, observando-se boa conformidade quanto a forma de onda e amortecimento.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Lima F. J.; Brito, N. H. M.; Teixeira, M e Teixeira, M. – Estudos Pré-Operacionais para a Entrada em Operação da Interligação Brasil-Venezuela, VIII SEPOPE, 19 a 23/05/02, Brasília-DF

7.0 - CONCLUSÕES

Os estudos realizados de regime permanente foram validados em campo através de medições realizadas quando da primeira energização da Interligação Acre-Rondônia.

A metodologia comparativa sugerida de simulação x campo de tensões e correntes devidas a energização estatística consiste dos seguintes passos:

- Identificar valor máximo da grandeza registrada
- Buscar na simulação estatística, o caso (amostra) cuja polaridade e cujo valor máximo da grandeza em análise seja o mais próximo do valor máximo registrado
- Reprocessar este caso com tempo total de simulação compatível com o registro obtido em campo, obtendo-se curva com polaridade coincidente e praticamente o mesmo pico
- Fazer análise comparativa, observando-se forma de onda (espectro harmônico, se necessário) e amortecimento

Esta metodologia tem se mostrado satisfatória, em função de experiência de sua aplicação em campo.

É de fundamental importância, para as áreas de estudos elétricos, a análise comparativa simulação x campo associada a novas obras no sistema e deve ser efetivada quando da primeira energização e tomada de carga.

INTERLIGAÇÃO ACRE RONDÔNIA DEZ/2002

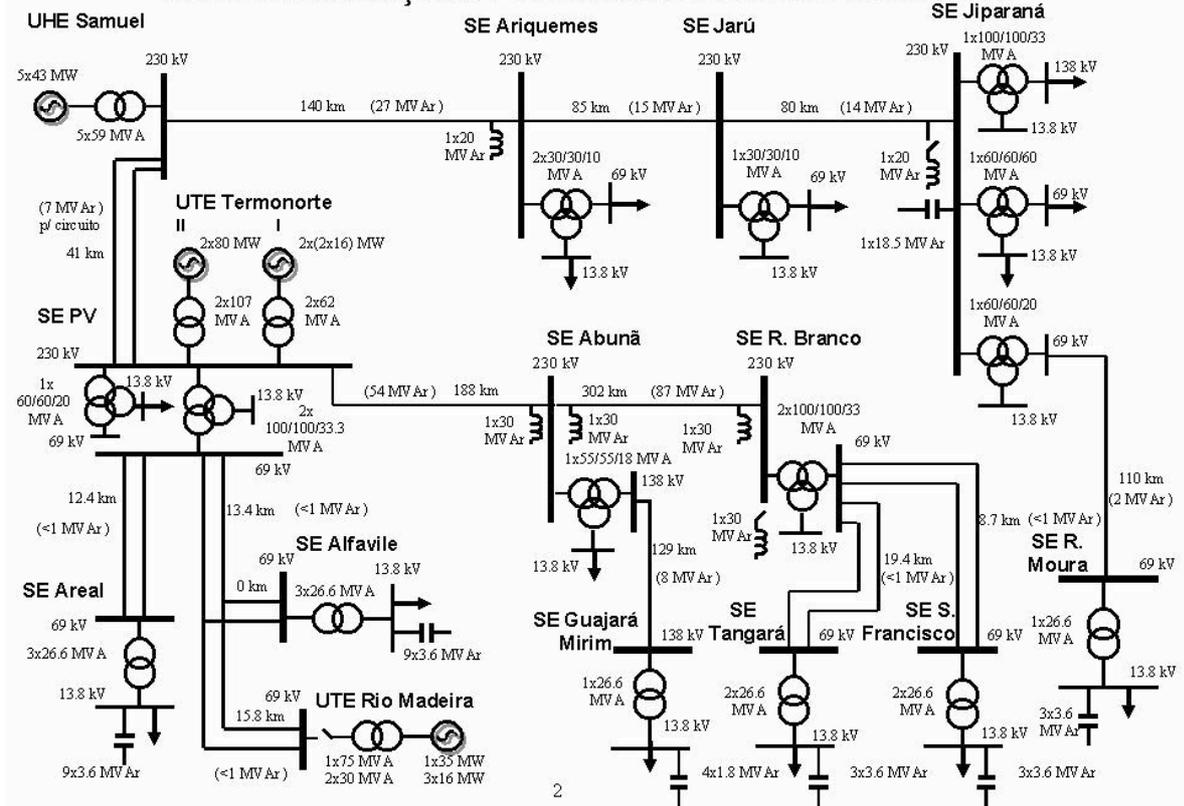


Figura 1 - Interligação Acre-Rondônia

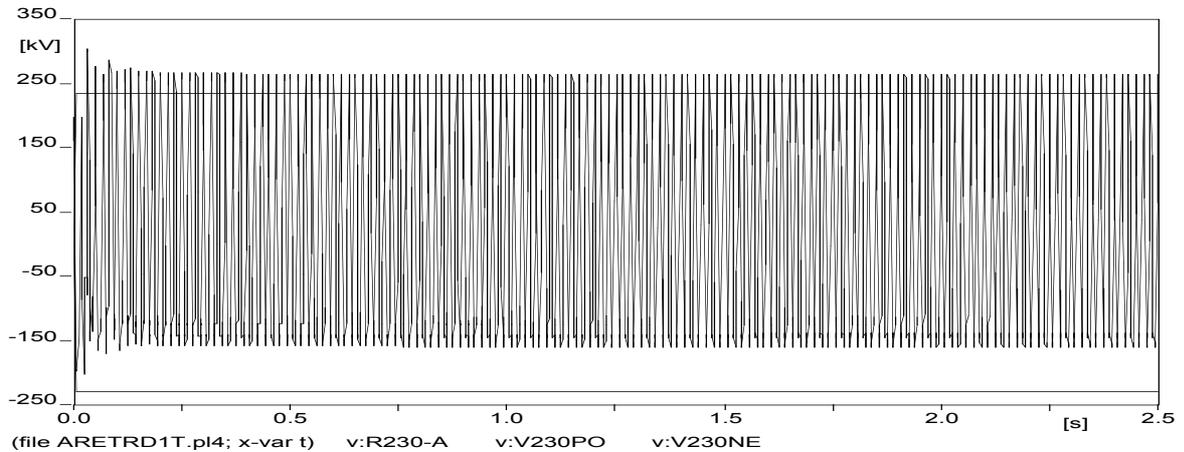


Figura 3-1 Tensão Simulada em Rio Branco 230 kV quando da energização do TF 230/69/13.8 kV-100/100/33 MVA desta SE em Volts x Segundos

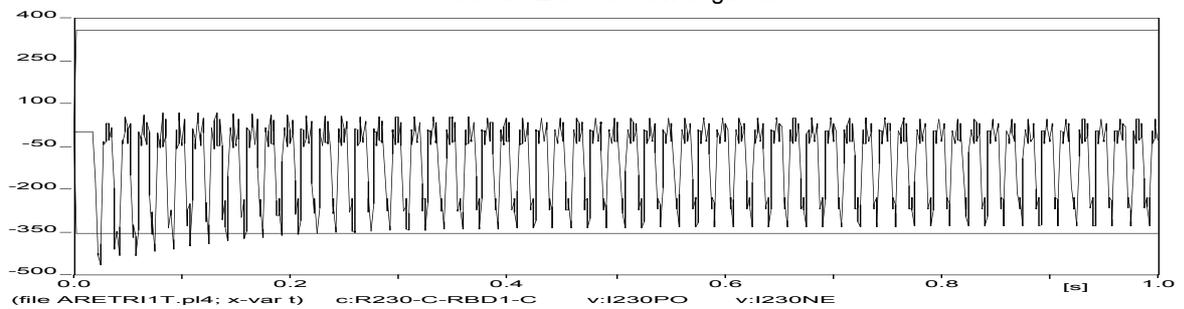


Figura 3-2 Corrente Simulada de Energização no TF 230/69/13.8 kV-100/100/33 MVA de Rio Branco em Ampères x Segundos

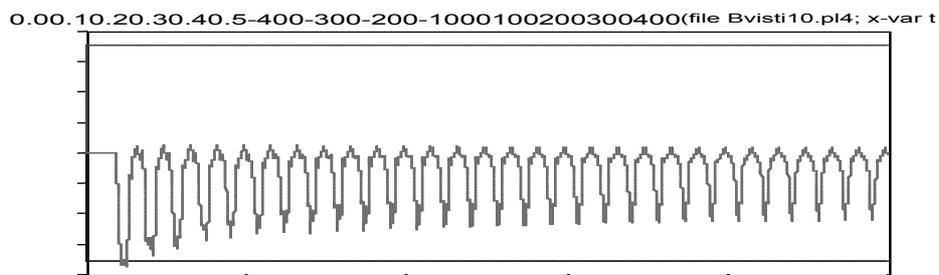


Figura 3-3 Corrente de "Inrush" Simulada em Boa Vista 230 kV quando da energização do TF 230/69/13.8 kV-100/100/33 MVA desta SE em Volts x Segundos

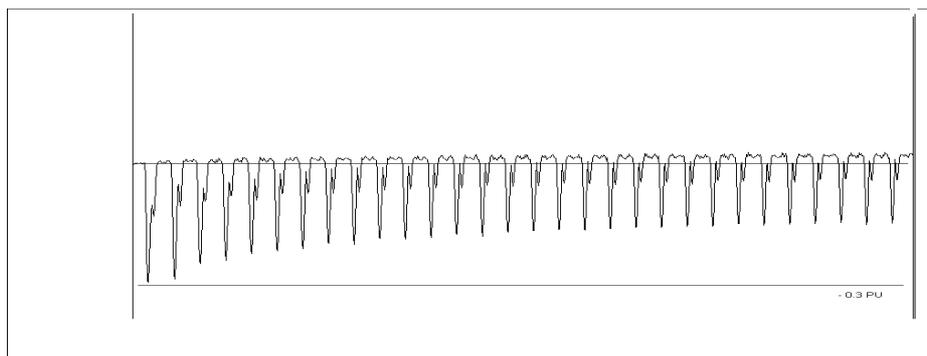


Figura 3-4 Corrente de "Inrush" Medida em Boa Vista 230 kV quando da energização do TF 230/69/13.8 kV-100/100/33 MVA desta SE em Volts x Segundos

Tabela 2-3 - Energização em Vazio em Regime Permanente das LTs Porto Velho-Abunã 230 kV e Abunã-Rio Branco 230 kV

LINHA DE TRANSMISSÃO	CONFIGURAÇÃO DE MÁQUINAS	REATOR NO TERMINAL ENERGI-ZADO	REATOR NO TERMINAL REMOTO	"LINE CHARGING"	TENSÃO PRÉ-ENERGI-ZAÇÃO pu/kV	TENSÃO PÓS-ENERGI-ZAÇÃO EM REGIME NO TERMINAL CONECTADO pu/kV	TENSÃO PÓS-ENERGI-ZAÇÃO EM REGIME NO TERMINAL REMOTO pu/kV
SIMULAÇÃO LT PORTO VELHO- ABUNÃ 230 kV	3 UNID SAM 1 UNID TN I SEM TN II	-	30 Mvar	54 Mvar	1.020 234.6	1.050 241.5	1.048 241.0
MEDIÇÃO 15/11/02 LT PORTO VELHO- ABUNÃ 230 kV	2 UNID SAM SEM TN I 2 UNID TN II	-	30 Mvar	54 Mvar	1.009 232.0	1.022 235.0	1.018 234.1
SIMULAÇÃO LT ABUNÃ-RIO BRANCO 230 kV	2 UNID SAM 1 UNID TN I 1 UNID TN II	30 Mvar	60 Mvar	87 Mvar	1.031 237.1	1.022 235.1	0.993 228.4
MEDIÇÃO 15/11/02 LT ABUNÃ-RIO BRANCO 230 kV	2 UNID SAM SEM TN I 2 UNID TN II	30 Mvar	60 Mvar	87 Mvar	1.025 235.8	1.024 235.5	0.996 229.1