



**SEMINÁRIO DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA EM LINHAS DE MEIA ONDA
CAMPINAS, 26 e 27 de NOVEMBRO de 2013**



REQUISITOS DE TRT IMPOSTOS AO DISJUNTOR DE SERRA DA MESA DURANTE A MANOBRA DE ABERTURA DO ELO CA TESTE

Autores:

JOÃO BOSCO GERTRUDES (UEFS)

ELSON COSTA (ITAI)

MARIA CRISTINA TAVARES (UNICAMP)

Moderador:

ENG. CAMILO MACHADO Jr. (Eletronorte)

Introdução

- **Motivação:** O disjuntor em Serra da Mesa (**DSM**) foi dimensionado para condições de operação/interrupção diferente da proposta do ensaio no Elo CA teste.
- **Objetivo geral:** Obtenção dos requisitos de **TRT** (tensão de restabelecimento transitória) nos terminais disjuntor de Serra da Mesa (**DSM**) durante a manobra de energização seguida de Abertura do Elo CA Teste.
- **Objetivo específico:** Verificação de atendimento ou superação para diferentes condições de operação do disjuntor: abertura do elo em vazio sem falta e sob diferentes condições de faltas.

O Elo CA Teste

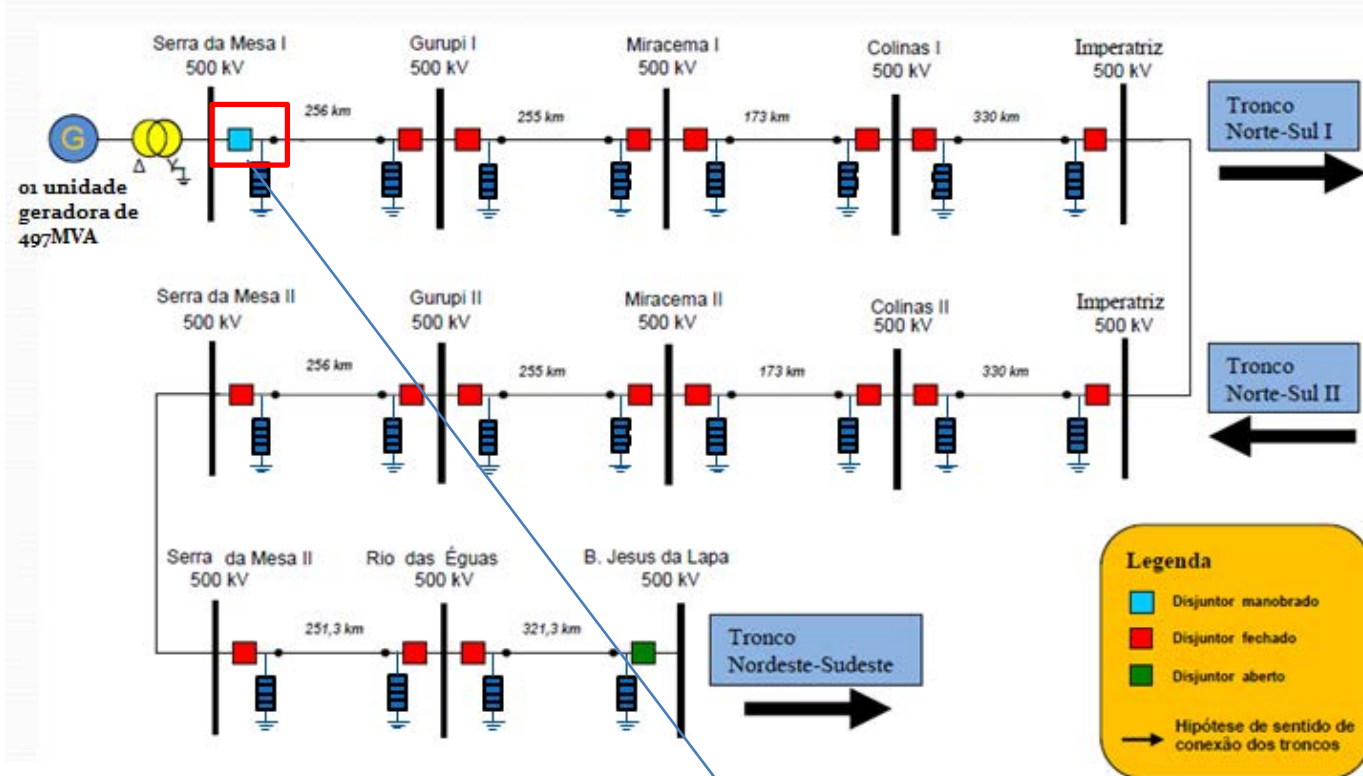


Figura 1: Diagrama unifilar do Elo CA teste.

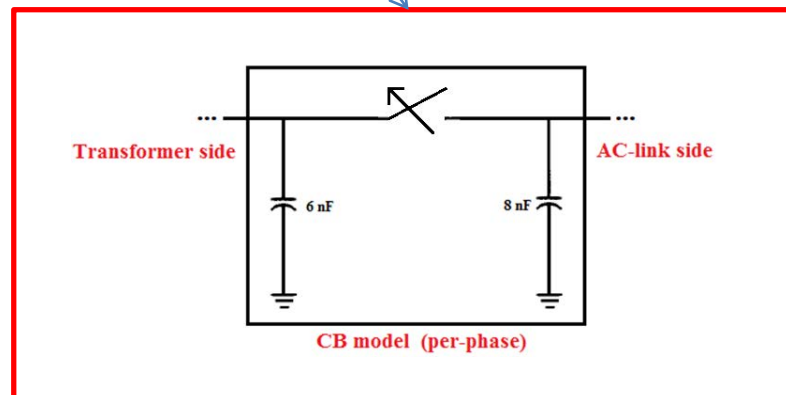


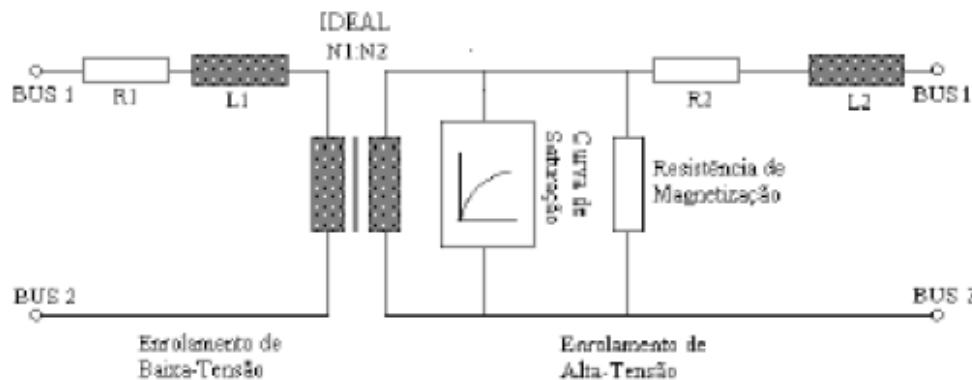
Figura 2: Detalhamento da modelagem do disjuntor.

Condições para o Estudo de TRT

- Evento de curta duração (2 ms) → altas frequências → maior detalhamento dos modelos dos componentes (especialmente o disjuntor).
- **Condições específicas para estudo:**
 - 1 Gerador: **492 MVA** em **Serra da Mesa**.
 - Tensão pré-manobra: 1.1 p.u (**550kV**) do lado de alta do transformador de Serra da Mesa;
 - **Capacitância parasita da bucha** do transformador elevador em Serra da Mesa, a montante do disjuntor, de **6nF**;
 - **Capacitância parasita do divisor capacitivo**, a jusante do disjuntor, de **8 nF**;
 - Comprimento total do elo: **2600 km**.
- **Simplificações:**
 - Valores de TRT obtidos de forma aproximada (sem a modelagem do arco elétrico) → Os picos de TRT obtidos com a presença do arco devem ser menores (energia dissipada no arco elétrico).
 - Disjuntor da classe de 500 kV, 40 kA com projeto vinculado à **Norma NBR 7118/1994**.

Transformador Elevador

- Dados dos transformadores elevadores em Serra da Mesa



Curva de magnetização

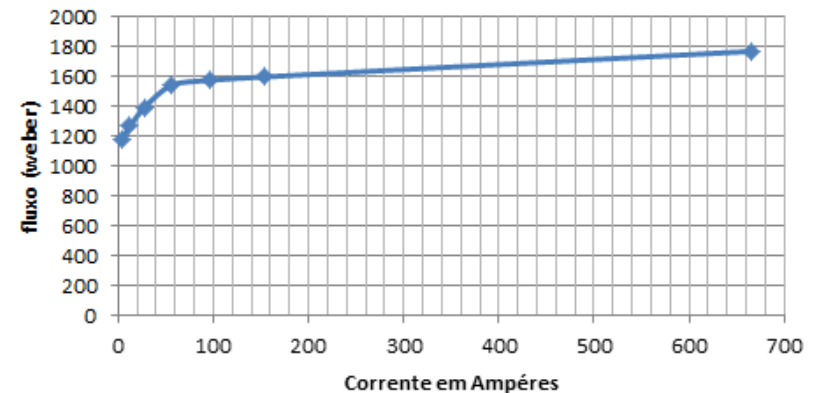


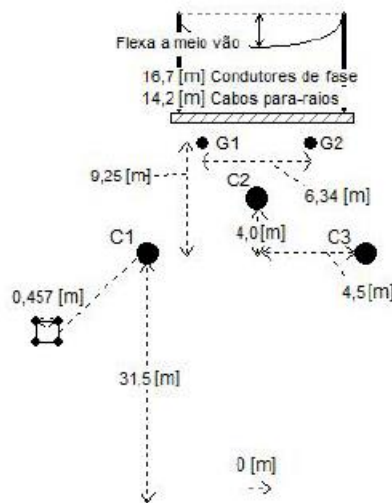
Figura 3: Diagrama unifilar do modelo do trafo em SM.

Transformador Elevador de Serra da Mesa

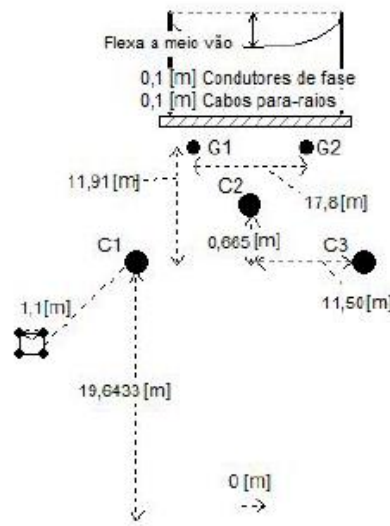
Transformador Elevador de Serra da Mesa 525(Y) / 15.0(Δ) – 472,6 MVA	
Reatância de dispersão do primário (525 kV)	31,338 (Ω)
Reatância de dispersão do secundário (15 kV)	0,0846 (Ω)
Resistência do enrolamento primário (525 kV)	0,795 (Ω)
Resistência do enrolamento secundário (15 kV)	0,003 (Ω)

Linhas de Transmissão

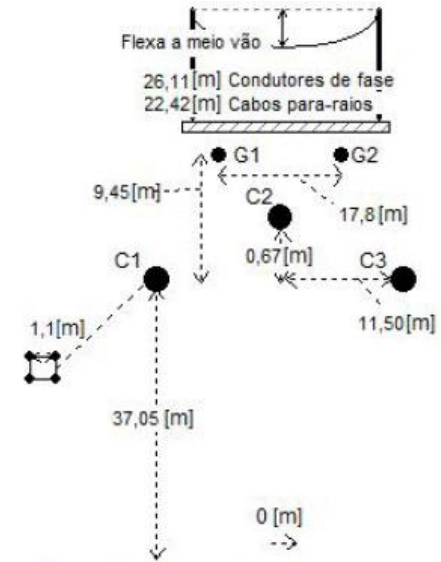
- Silhueta das Torres, Dados dos condutores e Parâmetros de Sequência



Silhueta das torres das linhas do tronco Norte-Sul I



Silhueta das torres das linhas do tronco Norte-Sul II



Silhueta das torres das linhas do tronco Nordeste Sudeste

resistividade do solo $4000 \Omega \cdot m$

Dados dos condutores das torres das linhas do tronco Norte-Sul II

Condutor	Resistência Unitária [Ω/km]	Rext [m]	Rint [m]	μr
RAIL	0,0614	0,014795	0,0037	1
PR-Aço galv EHS	3,51	0,00457	-	1

PARÂMETROS UNITÁRIOS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DAS LINHAS (60Hz)

TRECHO	Resistência Unitária [Ω/km]		Reatância Unitária [Ω/km]		Admitância Unitária [$\mu S/km$]	
	Seq. (+/-)	Seq. 0	Seq. (+/-)	Seq. 0	Seq. (+/-)	Seq. 0
Norte-Sul I	0,0159	0,4696	0,2670	1,5777	6,0810	2,7370
Norte-Sul II	0,0161	0,4352	0,2734	1,4423	6,0433	3,5287
NE-Sudeste	0,0161	0,4352	0,2734	1,4423	6,0471	3,5250

- Nas simulações considera-se o modelo dos parâmetros longitudinais dependentes da frequência

Pára-raios

- Por motivos operacionais os pára-raios foram mantidos ao longo do Elo. As curvas características e limites de absorção de energia são apresentados a seguir

Limites de absorção de Energia

Sistema [kV]	Valor único impulso [MJ]	Capacidade Térmica [MJ] IEC99-4/91	Capacidade Térmica [MJ] fabricante
500	4,83	7,56	8,40

Casos Simulados (PSCAD/EMTDC)

- Abertura do Elo CA Teste sem falta
- Abertura do Elo com faltas terminais (1FT, 3F-T, 3F-I)
- Abertura do Elo com faltas quilométricas (1F-T último pólo a abrir → maiores taxas de crescimento da TRT).
- Abertura do Elo com faltas remotas (1F-T, 3F-T, 3F-I)
- Tempo de integração: $1\mu\text{s}$ para faltas terminais e $10\mu\text{s}$ para faltas remotas (O tempo de trânsito do Elo é de 8,33 ms)

Dados Monitorados

- Correntes pré-manobra no disjuntor (**IDS_M**)
- Parâmetros da TRT no disjuntor (**E₁** - primeira tensão de referência; **U_c** – valor de crista da TRT; **S** - taxa de crescimento)
- **Perfil de tensão** em todos os barramentos ao longo do Elo

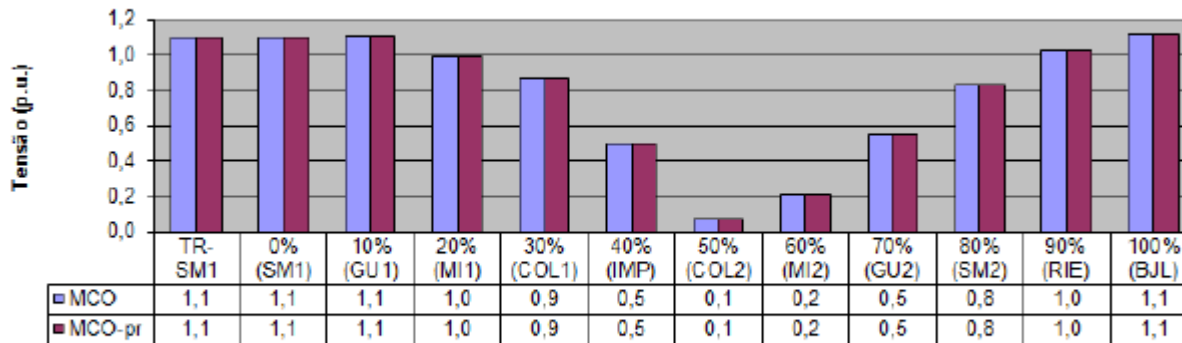
Critérios de Desempenho do Disjuntor

- Nas simulações de **faltas terminais** e **quilométricas** foram comparadas os **parâmetros de TRT (meia onda)** x **parâmetros de TRT (considerando somente a abertura do trecho de linha Serra da Mesa - Gurupi)** para o qual o disjuntor foi projetado. Objetivo é obter uma base de comparação para os resultados obtidos.
- Nos casos de **faltas remotas** foram verificados se os parâmetros da TRT obtida na simulação estavam ou não dentro da envoltória estabelecida pela norma NBR/IEC 7118 a qual o disjuntor está vinculado.

Resultados:
Abertura do Elo em Vazio Sem Falta

Abertura do Elo em Vazio Sem Falta (1)

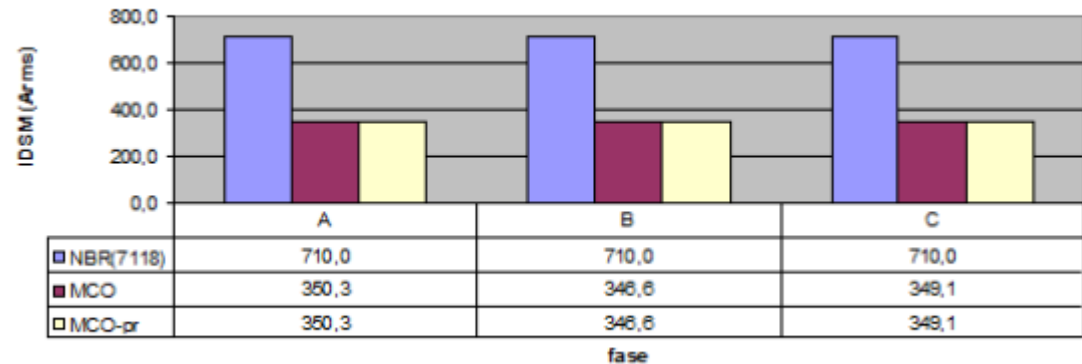
Perfil de tensão (pré-manobra) - 1Ger



Subestações ao longo do Elo CA

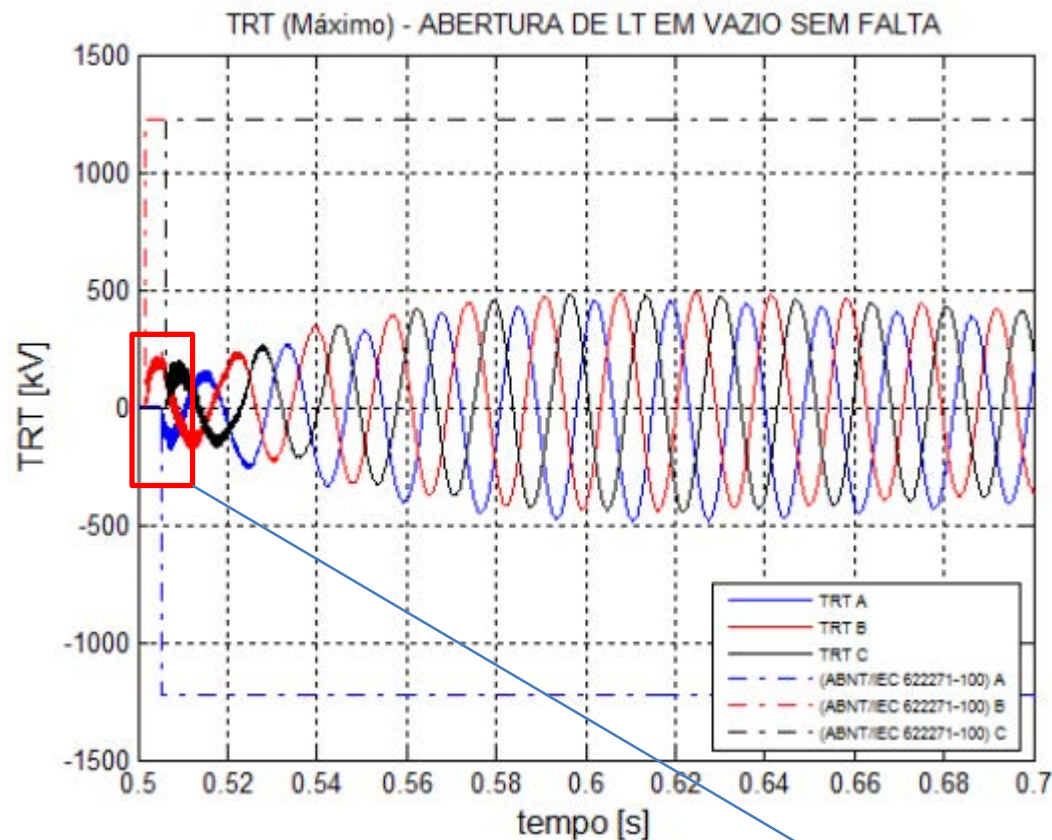
Perfil de tensão pré-manobra ao longo do Elo energizado com 1,1 p.u.

ID SM: Abertura de elo sem falta



Amplitude da corrente capacitiva para abertura do Elo (1 gerador, 1,1 p.u.).

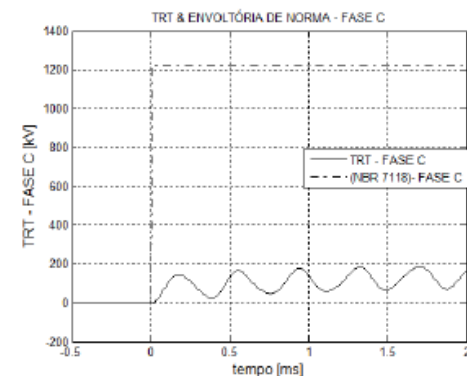
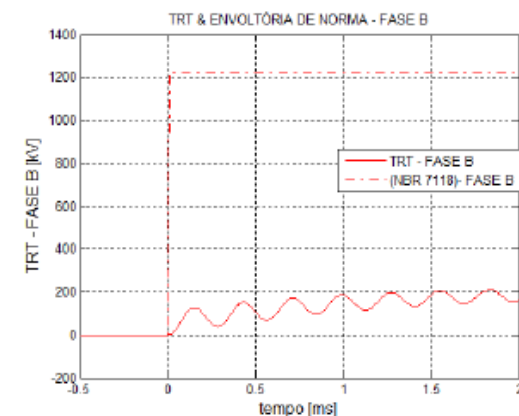
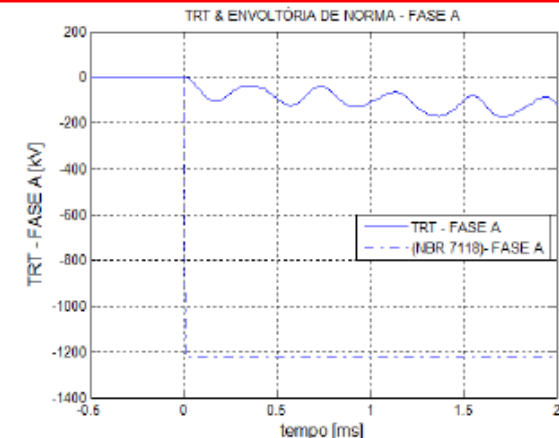
Abertura do Elo em Vazio Sem Falta (2)



Solicitação máxima estabelecida nos terminais do disjuntor (487 kVp; em 105,35 ms)

Máxima sobretensão, em kVp, estabelecida nos terminais

Fase	A	B	C
MCO	487,10	484,30	476,40
ABNT/IEC 622271-100	1226	1226	1226



TRT estabelecida nos terminais do disjuntor para abertura do Elo em vazio sem falta.

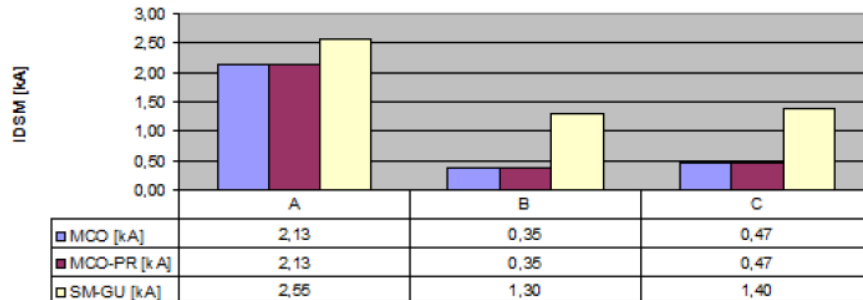
Resultados:

Abertura do Elo com Faltas Terminais

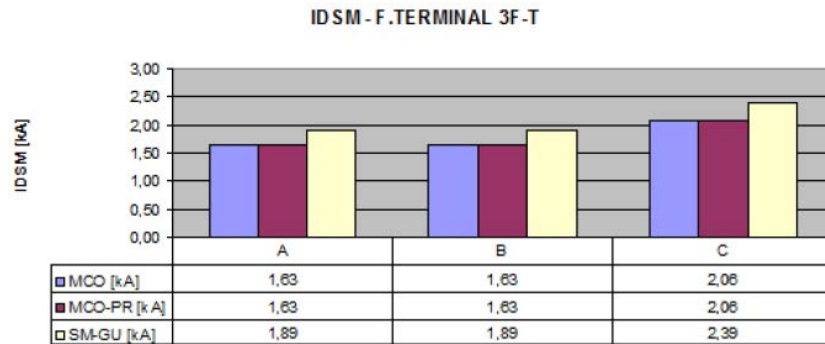
Faltas Terminais

- Perfil de corrente-kAp (antes da abertura)

IDSM - F. TERMINAL 1F-T

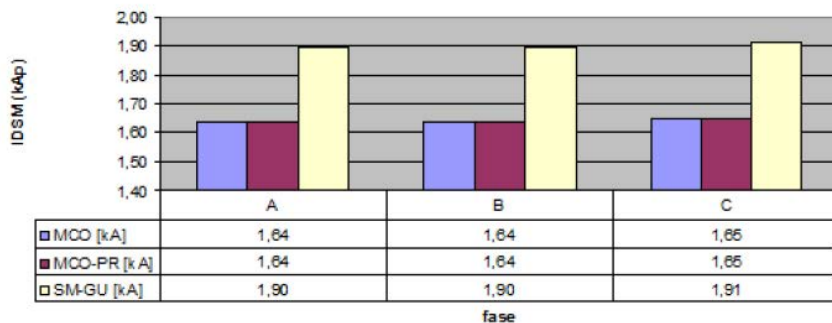


Corrente interrompida pelo DSM (kA_{ef}) para faltas terminais

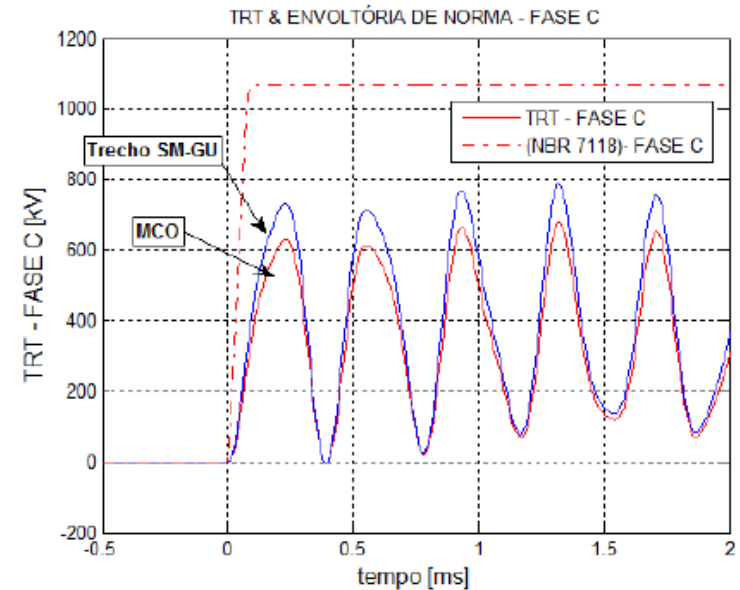
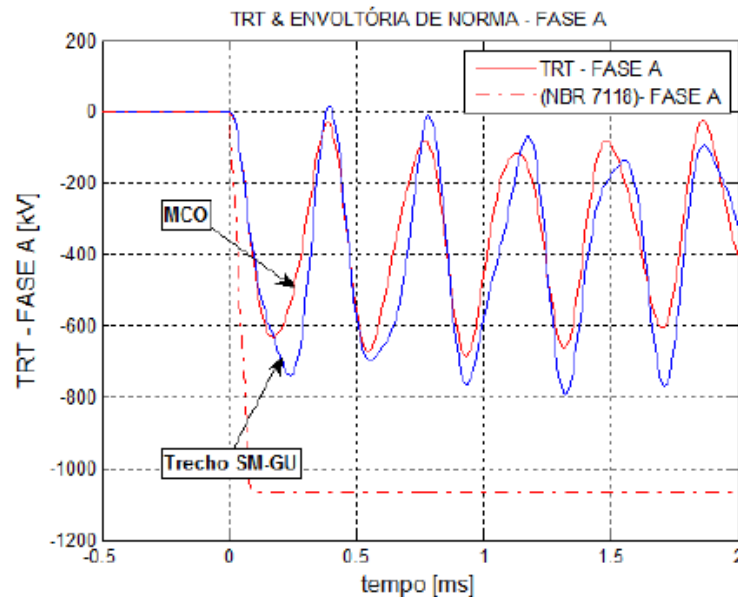


Tipo de falta	MCO ⁺	SM-GU
1F-T	1,51	1,80
3F-T	1,46	1,69
3F-I	1,17	1,35

IDSM - F. TERMINAL 3F-I

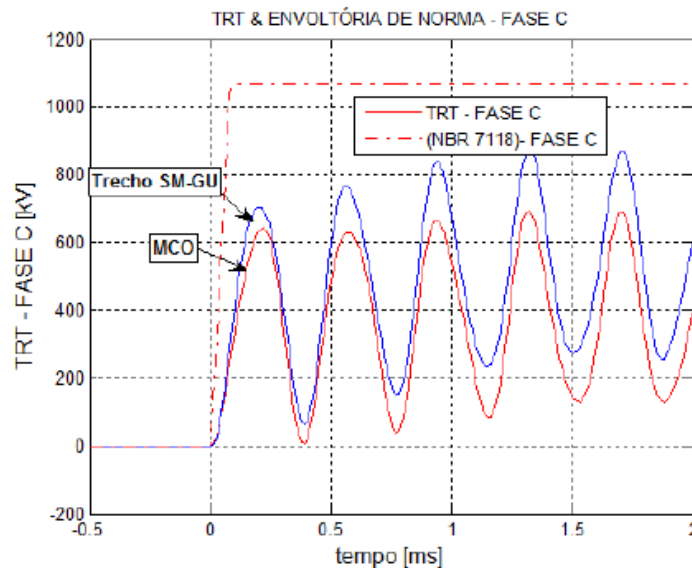


TRT: faltas terminais (piores casos)



TRT para falta terminal monofásica terra (1F-T)

TRT para falta terminal trifásica terra (3F-T)



Resumo dos requisitos de TRT para faltas terminais

Tipo de Falta	E1(kV)		Uc (kV)		S (kV/μs)	
	MCO	SM-GU	MCO	SM-GU	MCO	SM-GU
1F-T	633,63	739,12	686,03	793,14	3,73	3,08
3F-T	664,34	771,25	678,90	787,30	4,15	5,14
3F-I	643,40	703,68	693,70	874,54	2,92	3,52

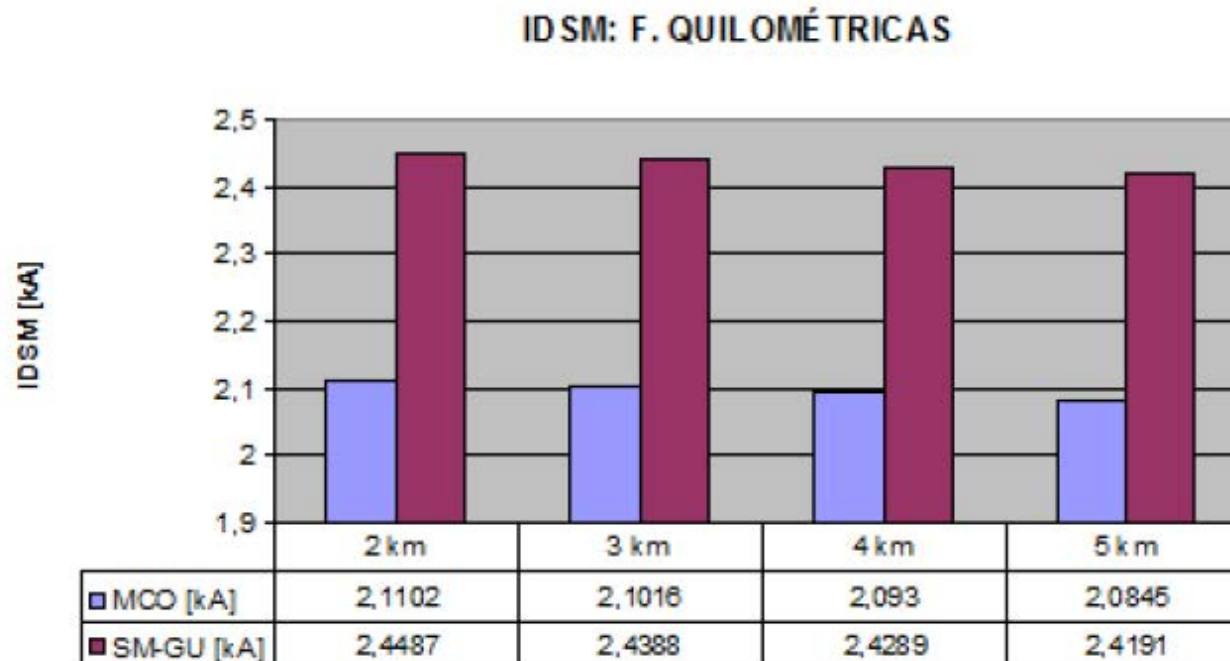
TRT para falta terminal trifásica isolada (3F-I)

Resultados:

Abertura do Elo com Faltas Quilométricas

Faltas Quilométricas

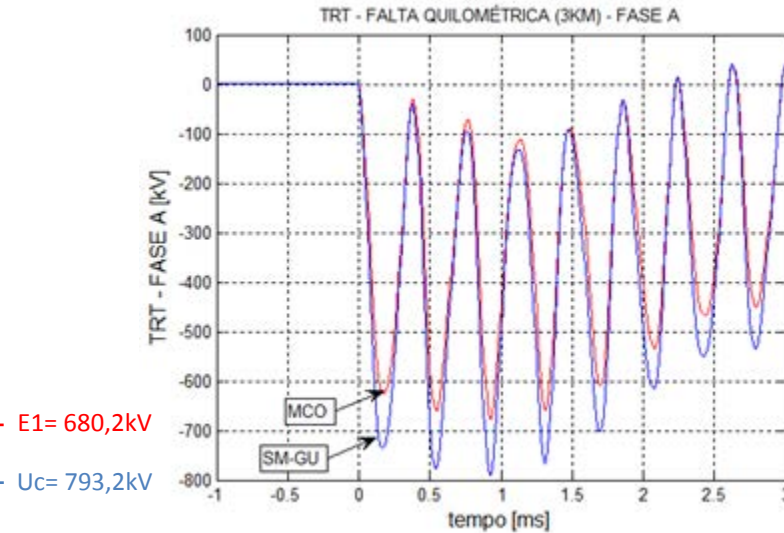
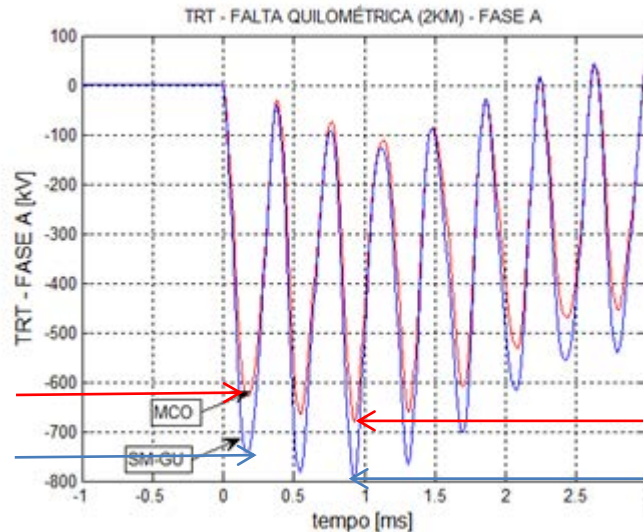
- Perfil de corrente (kAp)



Corrente interrompida (kA_{er}) para abertura de elo em vazio com faltas quilométricas

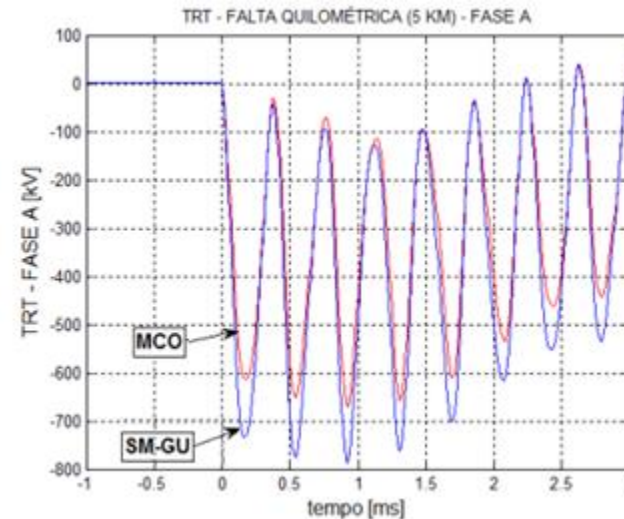
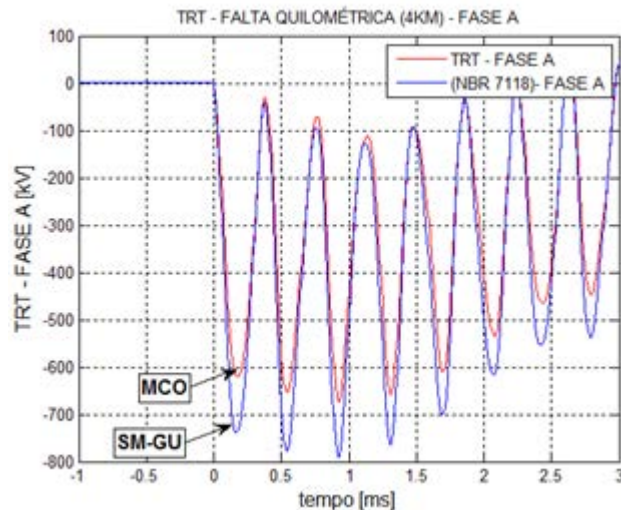
Local	MCO ⁺	SM-GU
2 km	1,50	1,73
3 km	1,48	1,73
4 km	1,48	1,72
5 km	1,47	1,71

TRT: faltas quilométricas



TRT para falta quilométrica (1F-T) - último pólo a abrir (2 km)

TRT para falta quilométrica (1F-T) - último pólo a abrir (3 km)



TRT para falta quilométrica (1F-T)- último pólo a abrir (4 km)

TRT para falta quilométrica (1F-T) - último pólo a abrir (5 km)

TRT: faltas quilométricas

Requisitos de TRT para abertura de elo em vazio com faltas quilométricas

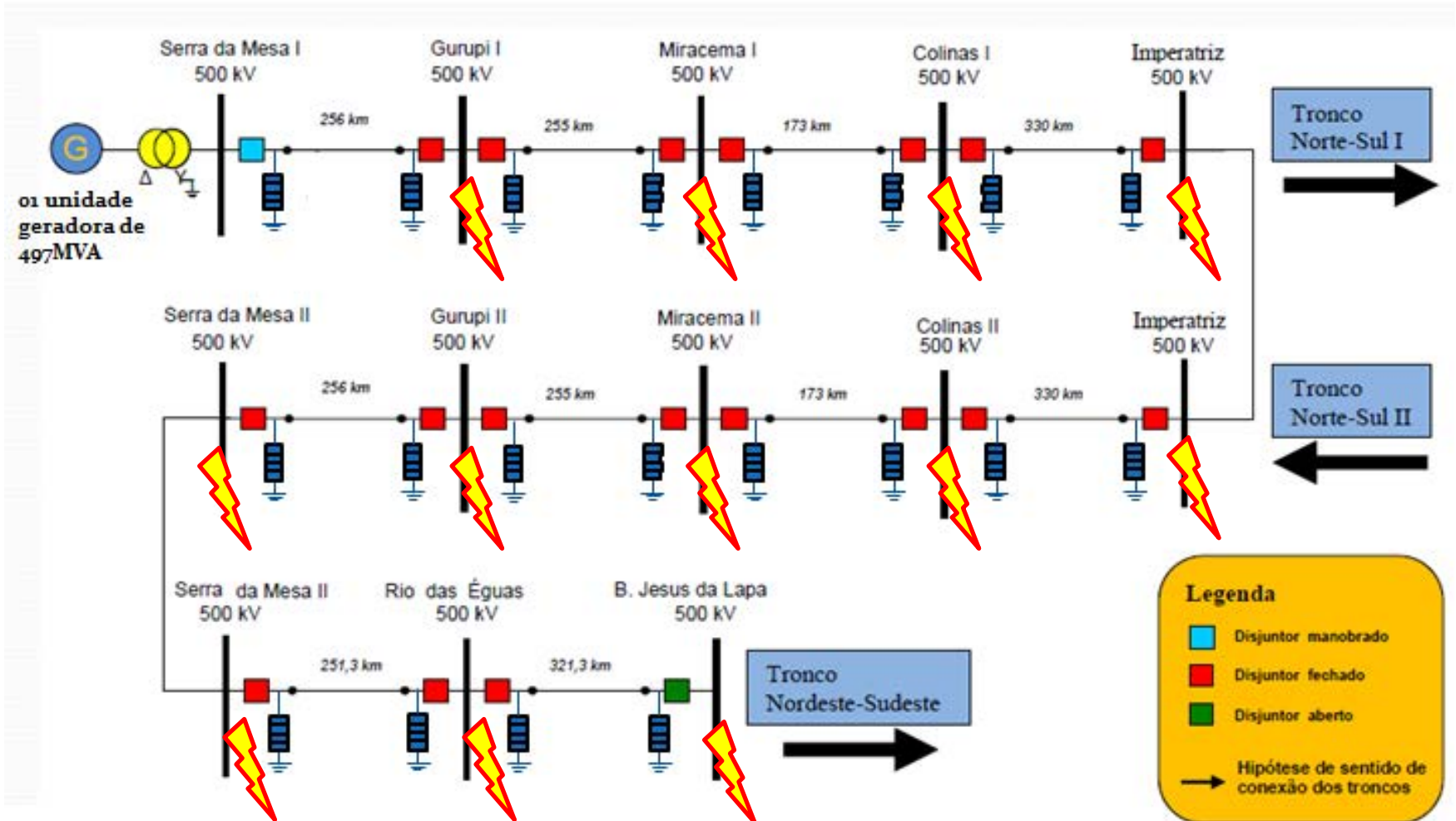
Local	E1(kV)		Uc(kV)		S (kV/ μ s)	
	MCO ⁺	SM-GU	MCO ⁺	SM-GU	MCO ⁺	SM-GU
2 km	628,55	743,11	680,18	793,16	3,49	4,13
3 km	624,08	735,07	676,76	790,61	3,47	4,08
4 km	619,96	739,31	673,03	789,51	3,44	4,11
5 km	612,49	733,38	671,02	787,46	3,22	4,08

Resultados:

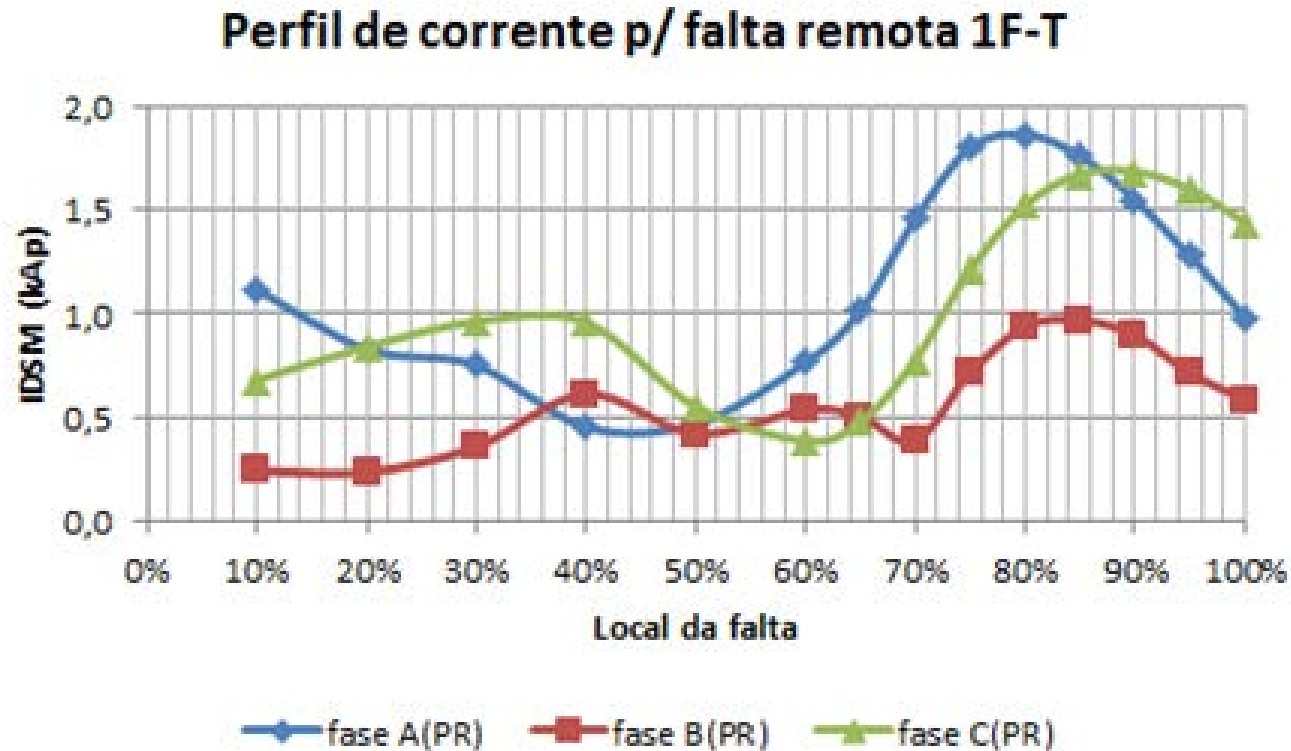
Abertura do Elo com Faltas Remotas

Faltas Remotas

- Faltas aplicadas em segmentos de 10 % do comprimento total da linha → Verificação de condições Severas
- Faltas Remotas: 1F-T, 3F-T, 3F-I



Faltas Remotas 1F-T: perfil de corrente

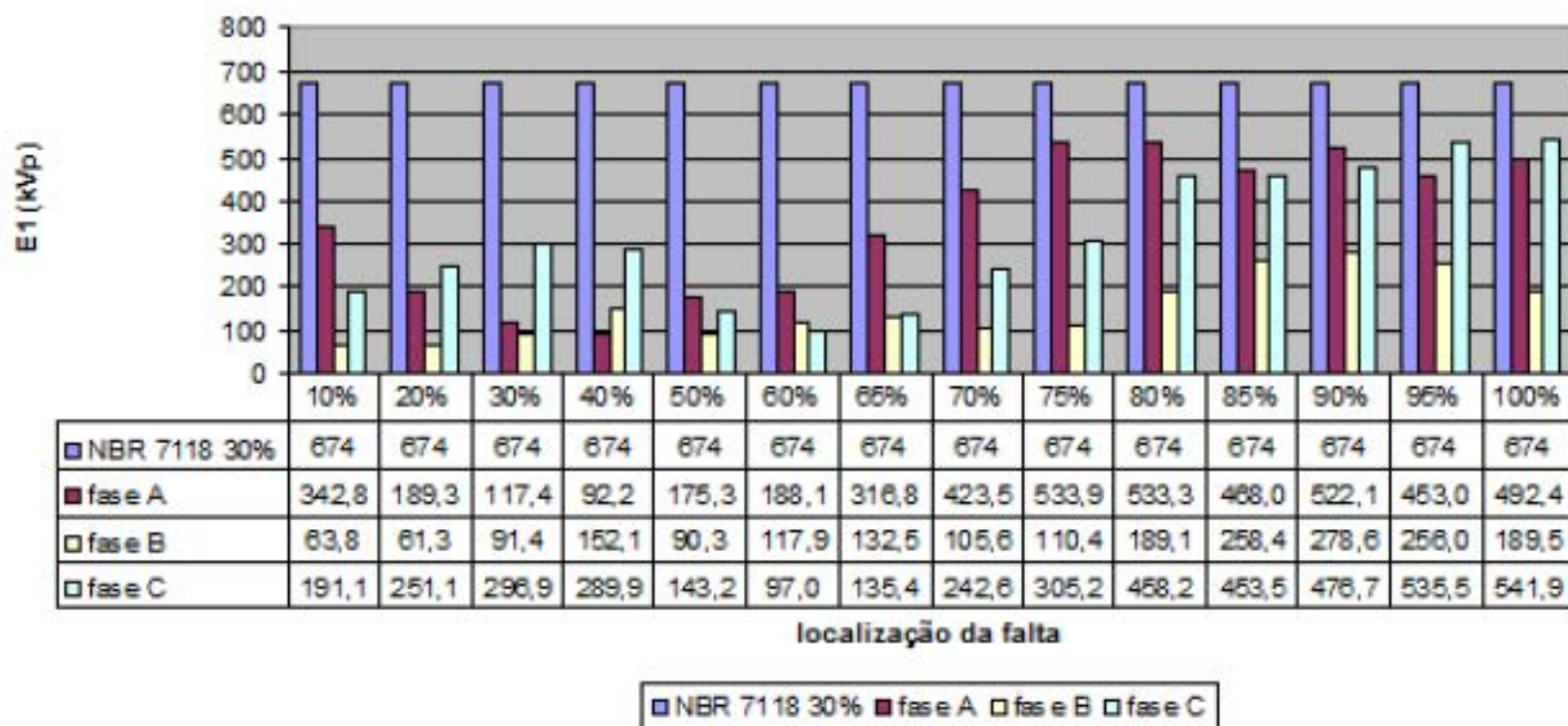


Comentários:

- Nota-se um comportamento da linha distinto da linha de meia onda em comparação com o que acontece em linhas curtas.
- Existe uma **região de ressonância**.
- A pior condição ocorre na região de ressonância e a corrente é superior à da falta terminal.
- Os piores casos de faltas 1F-T ocorrem entre **75% e 95%** do comprimento total da linha.
- Nota-se que o disjuntor não é superado na abertura de faltas monofásicas remotas (Energia no PR de BJL).

1ª Tensão de Referência: perfil para faltas remotas 1F-T

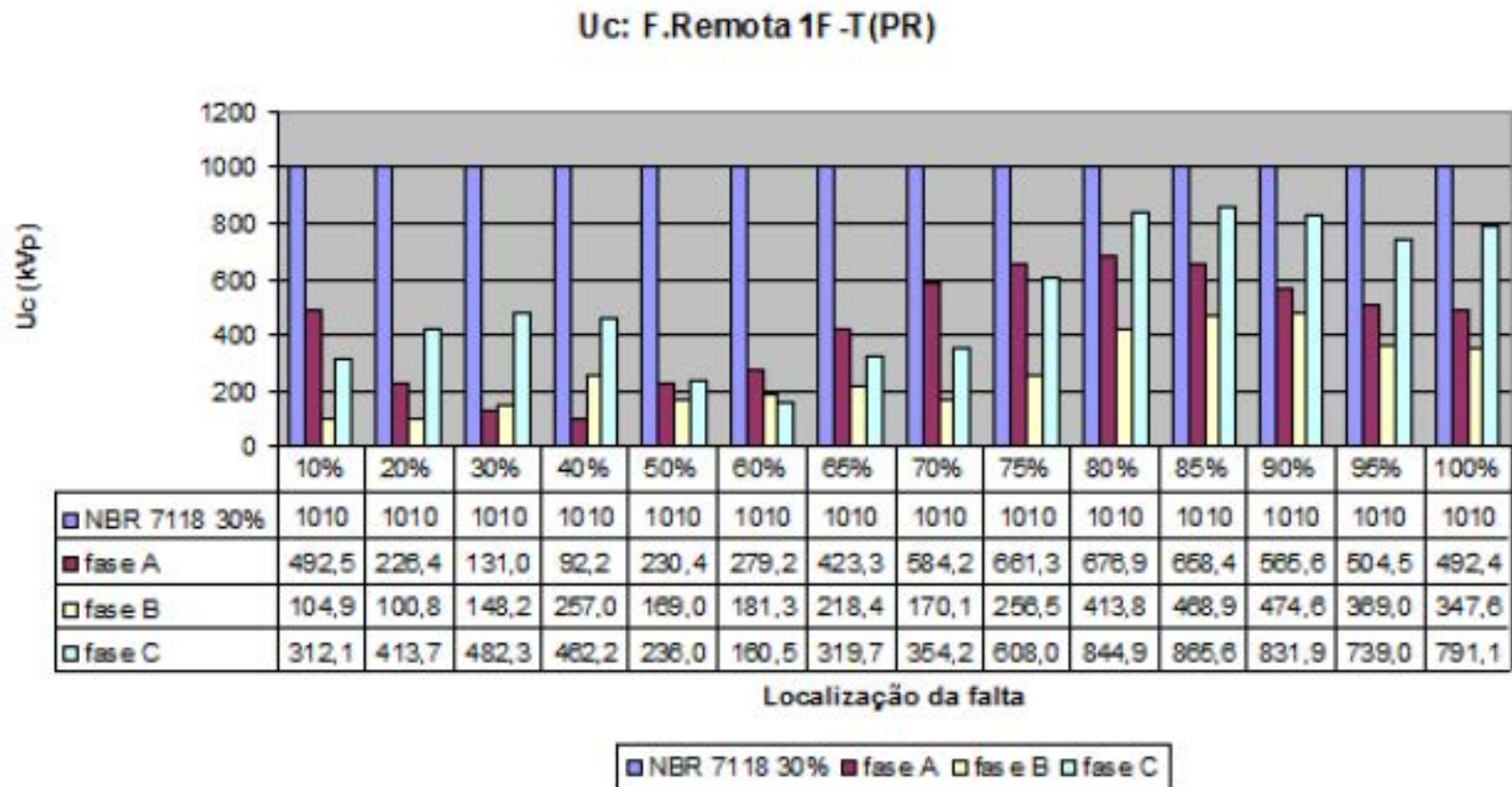
E1: F.Remota 1F-T (PR)



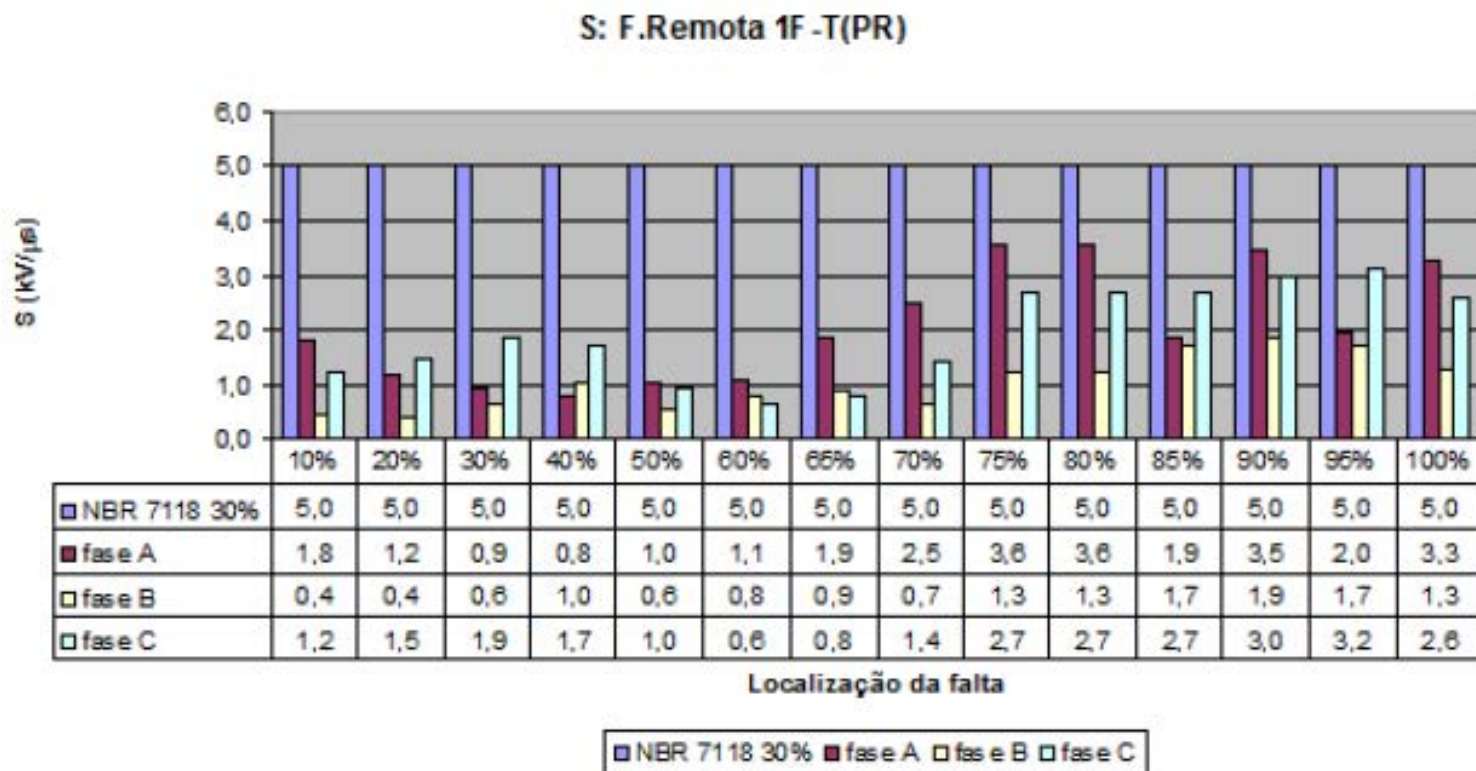
Comentários:

- O valor máximo de corrente obtida ($6,6 \text{ kA}_p$) correspondente à 17% da sua capacidade nominal de interrupção.
- A curva normalizada (ABNT/NBR 7118 - 1994) do disjuntor imediatamente superior é a de 30 % da capacidade de interrupção que será utilizada como base de comparação.

Valor de Crista: perfil para faltas remotas 1F-T

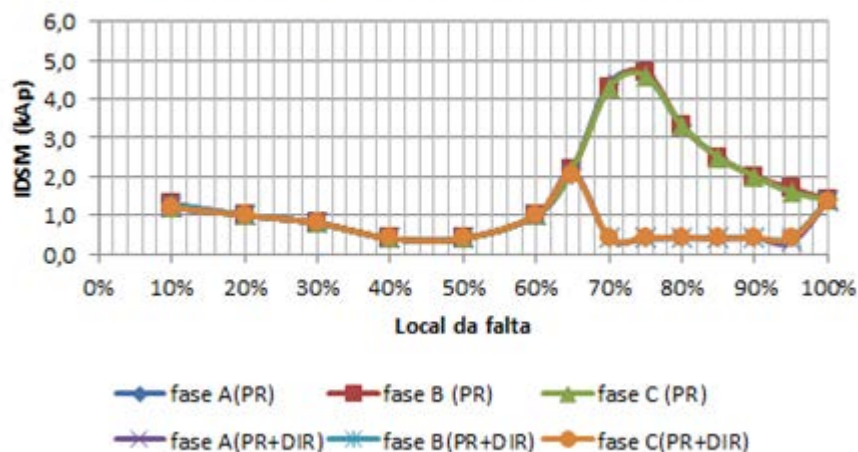


Taxa de crescimento: perfil para faltas remotas 1F-T

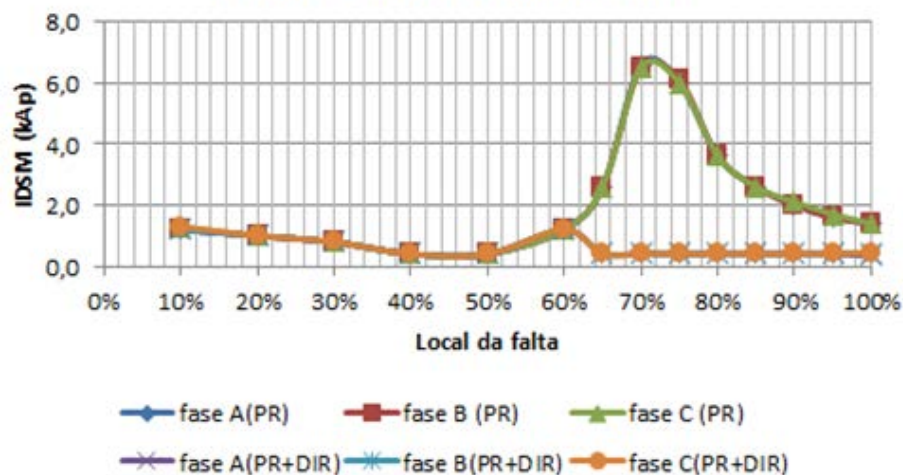


Faltas remotas 3F-T e 3FI: perfis de correntes

Perfil de corrente p/ falta remota 3F-T



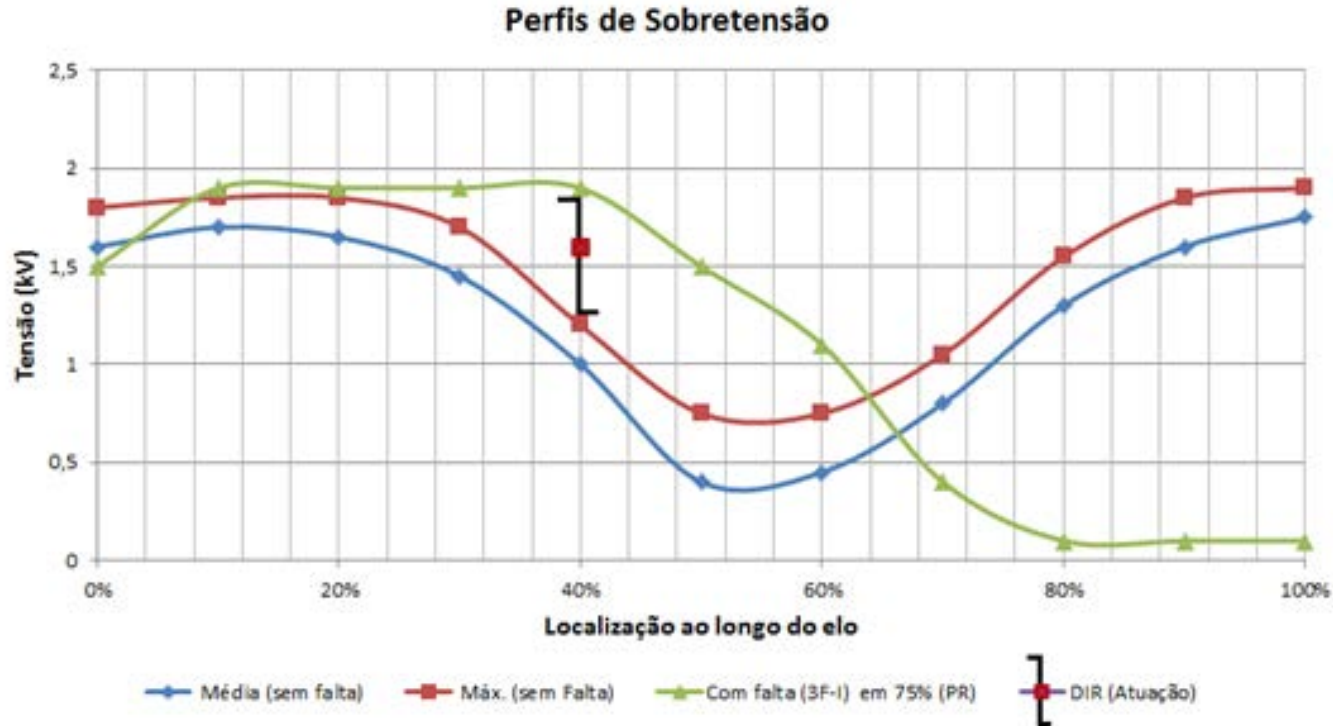
Perfil de corrente p/ falta 3F-I



Constatações:

- Varredura com faltas aplicadas aplicada em segmentos de 10 % do comprimento total da → Identificação de região de ressonância.
- Níveis de corrente muito superiores às da falta terminal para faltas remotas na região de ressonância.
- Faltas trifásicas que ocorrem na região crítica (65% a 95%) resultam em solicitações severas para o disjuntor → Necessidade de **Metodologia para Retirada da linha da condição de ressonância**.
- A elevação de corrente produz nível de sobretensão elevadas à montante da falta.

Sobretensão nos barramentos para faltas 3F-T e 3F-I (Local para Redução da Distância de Isolamento)



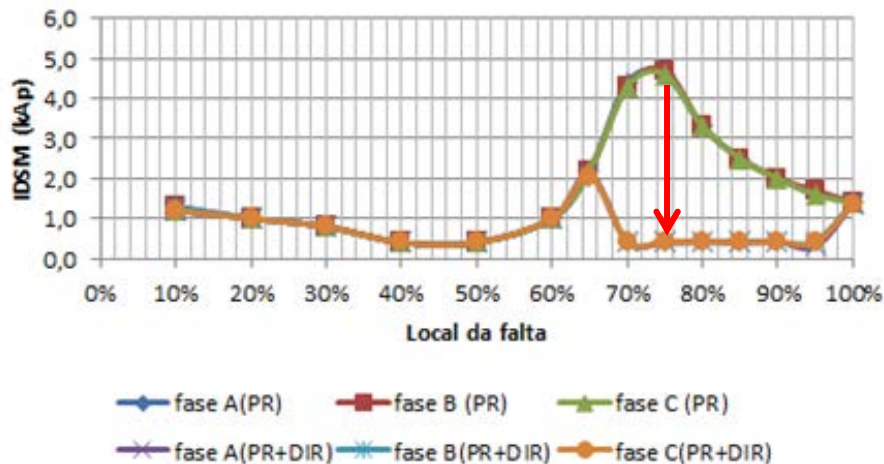
Função da DIR em Imperatriz:

- Com a elevação de tensão em Imperatriz (causada por um eventual curto trifásico na região de ressonância) ocorrerá um curto-circuito trifásico.
- O curto circuito trifásico neste local não causa sobretensões importantes e nem problema de abertura do disjuntor.
- A redução da distância de isolamento em Imperatriz retira a linha de forma segura da condição de ressonância → É possível a abertura do disjuntor nessas condições.
- A DIR foi modelada no PSCAD como uma chave controlada por tensão com disrupção em 1,6 p.u.

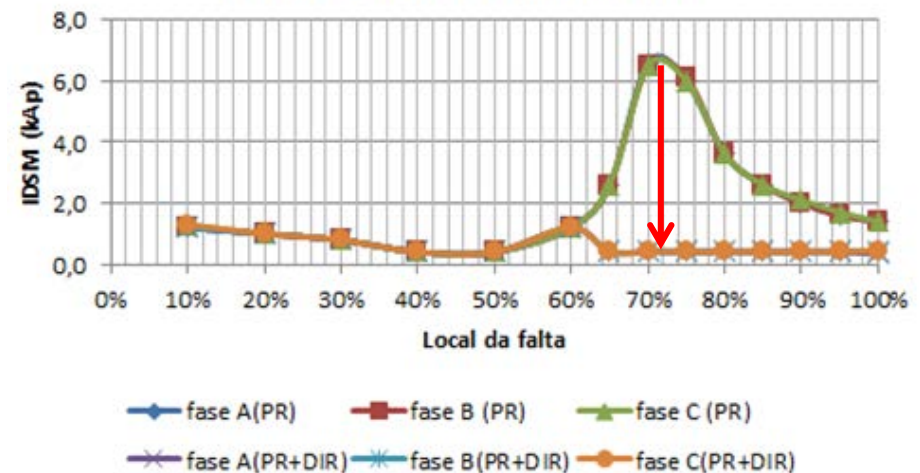
Faltas remotas 3FT e 3F-I: Efeito da DIR

- Efeito da disrupção controlada em Imperatriz na redução da corrente interrompida pelo disjuntor.

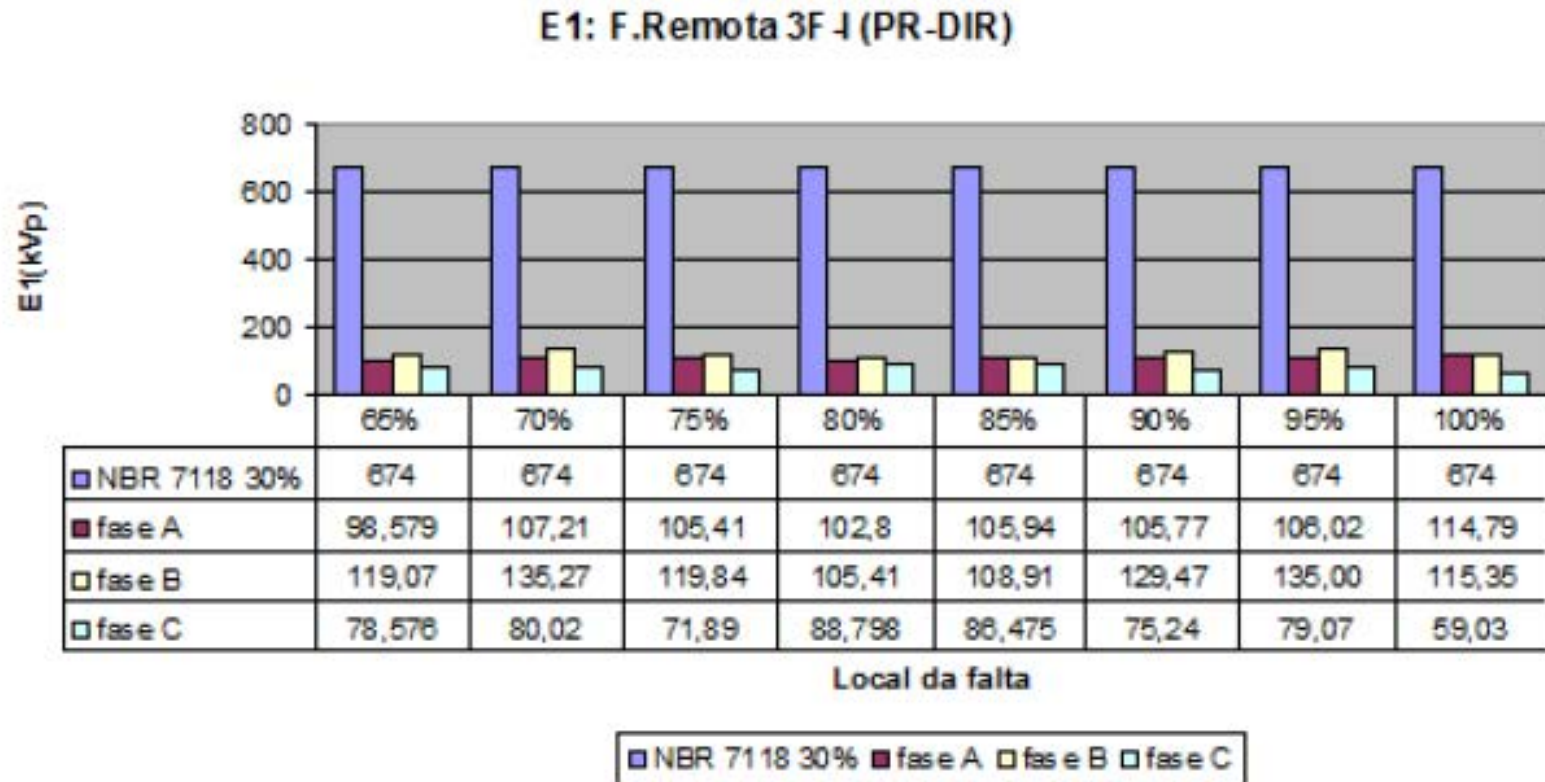
Perfil de corrente p/ falta remota 3F-T



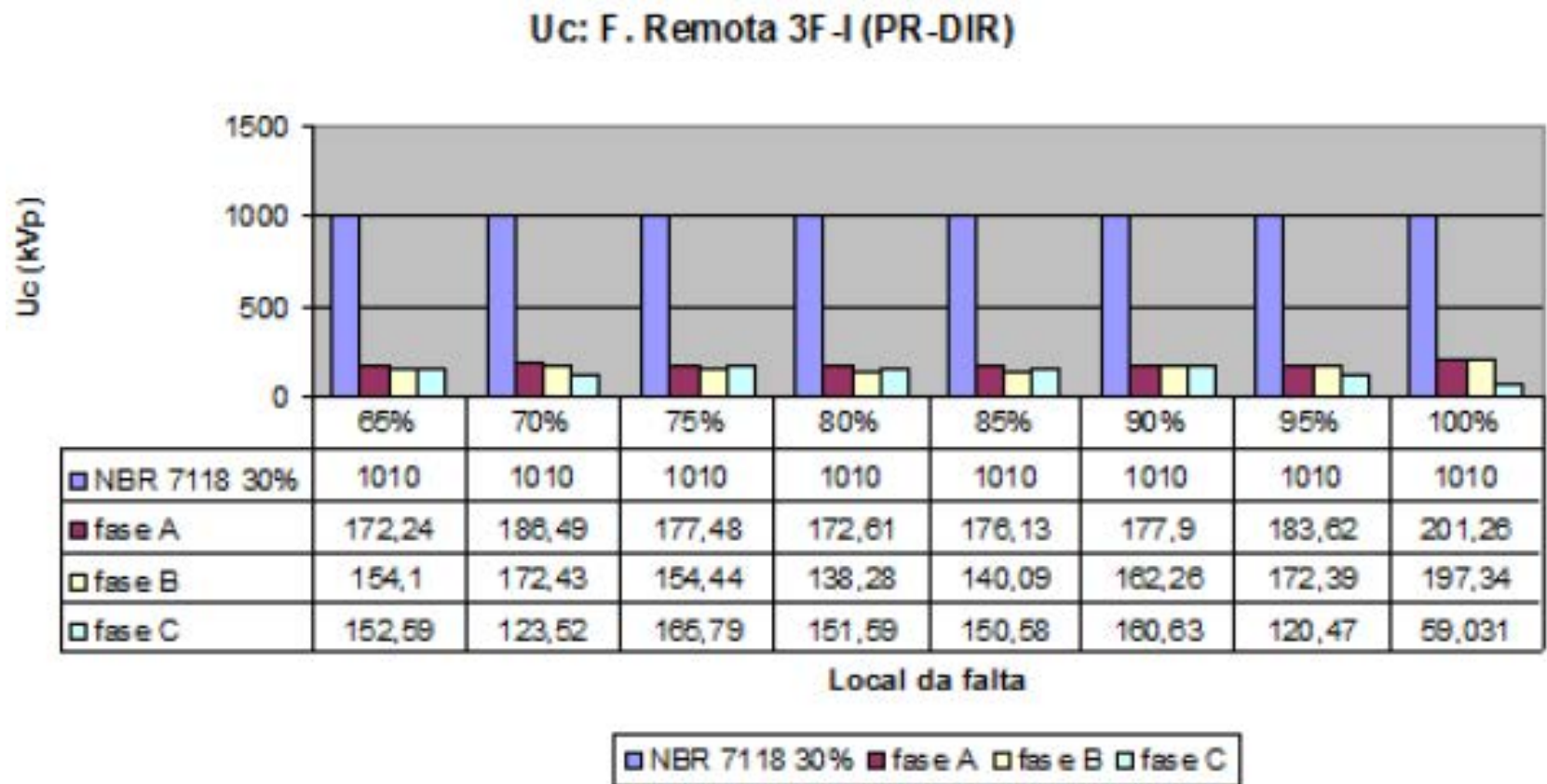
Perfil de corrente p/ falta 3F-I



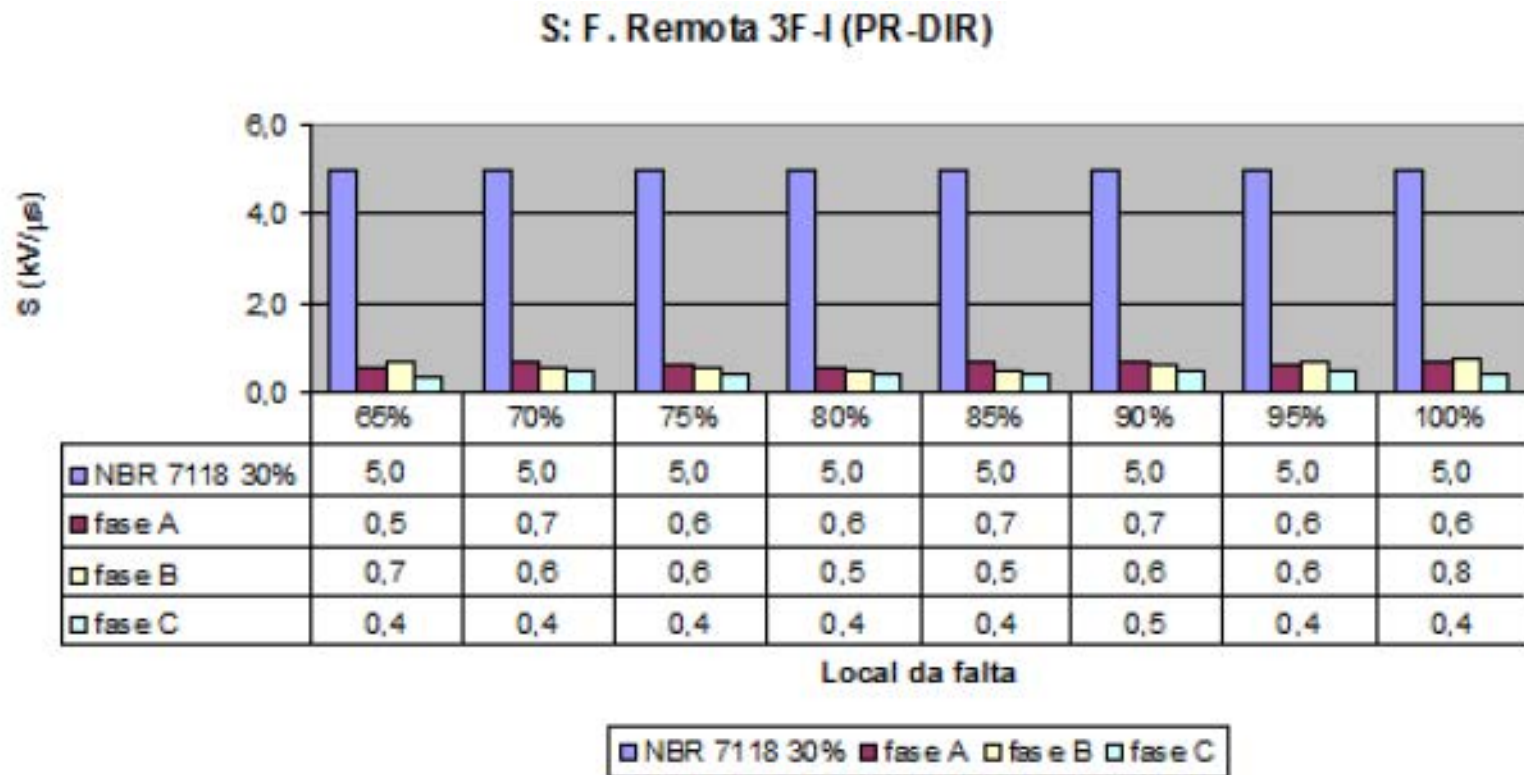
1ª Tensão de referência: faltas remotas 3F-I



Valor de crista da TRT: faltas remotas 3F-I



Taxa de crescimento: faltas remotas 3F-I



Conclusões

- Dos resultados obtidos pode-se concluir que o disjuntor atende às manobras de **abertura do Elo em vazio sem falta** sem que haja dano ao equipamento ou redução da sua vida útil.
- Para os casos de **faltas terminais** e **quilométricas** foi observado que as solicitações às quais o disjuntor estará sujeito **são menores** do que **as que ocorrem durante a abertura do trecho para o qual o disjuntor foi especificado**, o que permite afirmar que o **DSM** suporta a abertura do Elo CA Teste sob **falta terminal** ou **quilométrica**.
- As solicitações decorrentes de **falta remota monofásica** ao longo do Elo CA Teste não produzem solicitações severas ao **DSM**, podendo-se afirmar que o DSM pode abrir o Elo CA Teste sob **falta remota monofásica**.
- Recomenda-se a **verificação da capacidade térmica dos pará-raios localizados no terminal em vazio (Bom Jesus da Lapa)**, podendo ser necessário utilizar mais de um pará-raio no local na ocorrência de falta 1F-T no trecho crítico.

Conclusões

- Para os casos de abertura do Elo em vazio sob **falta remota trifásica**, as solicitações do **DSM serão inferiores aos limites do disjuntor**. Todos os casos foram simulados com metodologia para retirada da linha da condição de ressonância – aqui denominada de **DIR** (fragilização da cadeia de isoladores para que haja disrupção se a tensão fase-terra for superior a 1,6 pu) numa torre próxima da subestação de Imperatriz.
- Em todos os casos de faltas houve disrupção na DIR somente para os casos críticos de **falta trifásica**, especificamente entre **65% e 95%** do comprimento da linha (medida a partir do terminal de Serra da Mesa I). A DIR não atua em faltas monofásicas e nem durante a ocorrência de sobretensões da manobra de energização e abertura sem falta.
- Pode-se, portanto, afirmar que o **DSM** poderá efetuar a manobra de abertura do Elo CA Teste e que não será solicitado acima da sua capacidade durante o ensaio de energização do Elo CA Teste.
- Desta forma não haverá dano ao disjuntor nem redução da sua vida útil, mesmo se durante o ensaio ocorrer falta em qualquer local do Elo CA Teste.

Gratos pela atenção !