



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GAT/24
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – IV

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

ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS ASSOCIADOS ÀS REDES COLETORAS DE MÉDIA TENSÃO DE PARQUES EÓLICOS

Ricardo Antunes (*) Paulo C. Charles Alécio B. Fernandes Marcelo B. Machado Breno T. Meyer Fabio Vieira

ELETROSUL CHS Consultores Carpe Vie Consultoria Arteche ELETROSUL ELETROSUL

RESUMO

O presente Informe Técnico (IT) discute questões associadas à simulação de sobretensões transitórias e temporárias devido à manobras nos ramais das redes de média tensão (RMT) de Centrais Geradoras Eólicas (CGEs), com ênfase na modelagem dos componentes, como cabos, transformadores, controle e proteções dos aerogeradores. A título de exemplo, apresenta-se um estudo de engenharia para um parque eólico típico visando identificar as piores solicitações dielétricas impostas aos equipamentos associados. Para tanto, são simulados transitórios eletromagnéticos, fazendo uso do programa ATP (*Alternative Transient Program*), quando da aplicação e eliminação de faltas e desenergização dos conjuntos ramais de cabos/transformadores dos aerogeradores. Constata-se que estas manobras podem gerar tensões de restabelecimento transitórias (TRTs) e sobretensões extremamente elevadas podendo atingir, em determinadas situações, valores da ordem de 6 pu. As solicitações resultantes das simulações são comparadas com as respectivas suportabilidades dos equipamentos, sendo propostas alternativas técnicas e operacionais para adequação das mesmas em níveis aceitáveis. São comparados resultados obtidos via modelagem simplificada (com representação funcional das funções de controle e proteção) com os resultados obtidos via modelagem detalhada, na qual considera-se a dinâmica dos controles (implementados via MODELS/ATP). Tais comparações visam subsidiar o detalhamento necessário na modelagem dos equipamentos, adequando a representatividade do estudo e otimizando o tempo de processamento, sem comprometer as avaliações e conclusões.

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios eletromagnéticos, Surtos de manobra, Parques eólicos, Redes de média tensão, Modelagem computacional, Modelagem de aerogeradores, Suportabilidade, Tensão de Restabelecimento Transitória.

1.0 - INTRODUÇÃO

A busca constante por desenvolvimento sustentável, com uso de fontes de energia limpas e renováveis tem motivado o forte crescimento da energia eólica no cenário mundial. No Brasil, desde o lançamento em 2004 do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o Proinfa, observa-se tanto o aumento do interesse por esta fonte de energia quanto a redução do custo do MWh negociado nos leilões. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (Abreeólica), a energia eólica representa atualmente 2% da matriz energética do País e, em 2016, deverá representar 6,0%. Neste cenário, a busca por soluções otimizadas é prática constante em função da necessidade de competitividade com as demais fontes de energia e, sobretudo, da redução do custo de geração ao consumidor final. Por outro lado, estudos cada vez mais detalhados e precisos tornam-se necessários a fim de manter o grau de confiabilidade das usinas eólicas em patamares aceitáveis.

Atualmente, é prática comum a realização de estudos voltados ao acesso, à pré-operação e operação de parques eólicos, com foco nas iterações e reflexos causados pelos mesmos ao sistema no qual estão conectados. No Brasil, com o objetivo de aprimorar estes estudos, com foco sistêmico, foi criada recentemente uma Força Tarefa (FT-Eólicas-TEM), coordenada pelo ONS, visando à troca de experiências e definição de diretrizes para execução de estudos de transitórios eletromagnéticos (TEM), de forma cada vez mais segura e factível.

No caso de estudos de especificação de equipamentos, voltados para a rede interna de parques eólicos, há poucas publicações atualizadas, bem como são raros os fóruns de discussão. Percebe-se, de maneira geral, que há uma tendência de simplificação das análises de redes internas dos parques eólicos, associando-os às redes comuns de distribuição, tanto em redes aéreas quanto subterrâneas, representando estas instalações de forma simplificada através de equivalentes. Um dos maiores complicadores para realização destas análises está associado às dificuldades no fornecimento de modelos ou informações mínimas, que permitam a modelagem adequada dos controles e/ou proteção dos aerogeradores. Desta forma, além dos aspectos citados anteriormente, atenção e cuidados especiais devem ser dados às análises das redes de média tensão devido à sua complexidade e particularidades, dentre as quais podemos

No presente Informe Técnico, discute-se questões associadas à simulação de sobretensões transitórias e temporárias devido à manobras nos ramais das redes de média tensão de Centrais Geradoras Eólicas (CGEs), com ênfase na modelagem dos componentes, como cabos, transformadores, controle e proteções dos aerogeradores. À título de exemplo, apresenta-se um estudo de transitórios eletromagnéticos de um parque eólico típico, realizado com o programa ATP, visando identificar as piores solicitações dielétricas impostas aos ramais dos aerogeradores, emendas, transformadores dos aerogeradores (*step-up transformers*), transformadores da SE Coletora e reatores de neutro associados. São simuladas condições de aplicação e eliminação de faltas e desenergização dos ramais de cabos/transformadores dos aerogeradores. As solicitações resultantes são comparadas com suportabilidades típicas e com base nas referências [3] e [4], sendo propostas alternativas para adequação das mesmas em níveis aceitáveis. São comparados resultados obtidos via modelagem simplificada (representação funcional das funções de controle e proteção) com os resultados obtidos via modelagem detalhada dos aerogeradores na qual se considera a dinâmica dos controles (implementados via MODELS/ATP). Tais comparações visam subsidiar o detalhamento necessário na modelagem dos parques eólicos, adequando a representatividade do estudo e otimizando o tempo de processamento, sem comprometer as avaliações e conclusões.

A subestação coletora típica é composta por 3 transformadores 230/34,5 kV (35 MVA) com conexões “estrela aterrada – estrela – delta” a partir dos quais conectam-se os parques eólicos. O terminal estrela do 34,5 kV possui reator de aterramento e para-raios (PRs) de 15 kV para limitação das correntes de curto-circuito nos ramais dos aerogeradores. A conexão ao sistema interligado é realizada através de uma de linha de transmissão em 230 kV. Destaca-se a presença de PRs nas barras de 34,5 kV. Por se tratar de redes subterrâneas, inicialmente, não foram considerados PRs nos ramais. Na Figura 1 apresenta-se o complexo eólico típico analisado, com capacidade de 90 MW de geração (45 aerogeradores de 2,0 MW). Em cada transformador coletor, conectam-se ramais subterrâneos em 34,5 kV com grandes variações de comprimentos, contendo de 4 a 6 aerogeradores. Os ramais L1.1 e L3.1, do Parque 1, foram selecionados como representativos para realização das análises em função das maiores diferenças de comprimentos de cabos associadas a maior variação de aerogeradores presentes. Na Tabela 1 apresentam-se os comprimentos máximos e mínimos de cada alimentador dos parques bem como as distâncias dos diversos trechos de cabos.

Transformer”, calculados através da rotina “Satura”.

2.2.4 Pararraios:

Os casos foram simulados com pararraios ZnO classe 30 kV, conectados à barra de 34,5 kV, e classe 15 kV conectados ao neutro do transformador 230/34,5 kV (lado de 34,5 kV), com característica V x i típica.

2.3 Modelagem dos Aerogeradores

Em função das dificuldades práticas na obtenção de modelos detalhados, inicialmente será considerada uma forma alternativa e simplificada de se representar aerogeradores *full converter* (tipo 4), mas capazes de prover resultados adequados. Buscando-se uma análise comparativa com modelos detalhados, as maiores solicitações são comparadas com valores de literatura e com simulações considerando a representação detalhada, implementada via MODELS/ATP, dos aerogeradores. Abaixo segue o sumário dos modelos considerados:

- Modelo A (simplificado): Gerador síncrono *full converter* (tipo 4); representação básica (sem MODELS/ATP).
- Modelo B (detalhado): Gerador síncrono *full converter* (tipo 4); controles implementados em MODELS/ATP.

3.0 - CASOS ANALISADOS

3.1 Modelo A (simplificado) - Gerador síncrono *full converter* com representação básica (sem MODELS/ATP).

As simulações iniciais consideraram geradores síncronos *full converter* com representação simplificada. Com base nesta representação, buscou-se identificar as solicitações críticas, sendo estes casos utilizados na continuidade do estudo para fins de comparação com os modelos detalhados via MODELS/ATP. A modelagem simplificada teve como objetivo representar as faixas de frequência percebidas em surtos de manobra, desprezando-se dinâmicas lentas, como por exemplo, o controle de potência por ângulo de pitch. Adicionalmente, os resultados são comparados, qualitativamente, com àqueles obtidos em [1] e [2], onde foram adotados modelos simples e completos em PSCAD/EMTDC. São adotadas as seguintes premissas para o modelo simplificado:

- Representação com fonte de corrente, com valor ajustado de acordo com a potência ativa requerida.
- Bloqueio da injeção de corrente durante afundamentos de tensão (curto-circuitos).
- Proteção instantânea de sobretensão com bloqueio da corrente injetada.
- Representação dos filtros passivos de harmônicos (elementos RLC concentrados).

3.1.1 Aplicação e eliminação de faltas nos ramais de 34,5 kV

3.1.1-A - Identificação do pior ponto de aplicação do curto-circuito nos ramais:

Como premissa, no momento de eliminação do defeito, não há injeção de potência por parte dos aerogeradores. Inicialmente, variou-se a localização da falta ao longo dos ramais a fim de se identificar a condição mais severa em termos de sobretensões, com potência ajustada em 100%. Abaixo, segue breve descrição dos casos:

Tabela 2: Casos iniciais - Identificação do pior ponto de aplicação do curto-circuito nos ramais.

Caso	Descrição
F1	Curto-circuito fase-blindagem no início do ramal 1
F2	Curto-circuito fase-blindagem na emenda 1 do ramal 1 (emenda próxima do cubículo de 34,5kV)
F3	Curto-circuito fase-blindagem na emenda 2 do ramal 1 (emenda intermediária)
F4	Curto-circuito fase-blindagem na emenda 3 do ramal 1 (emenda intermediária)
F5	Curto-circuito fase-blindagem na emenda 4 do ramal 1 (emenda próxima do 1º aerogerador)
F6	Curto-circuito fase-terra na AT do transformador do aerogerador AG-106 (primeiro AG do ramal 1)
F7	Curto-circuito fase-terra na AT do transformador do aerogerador AG-101 (último AG do ramal 1)
F8	Curto-circuito fase-blindagem no início do ramal 3
F9	Curto-circuito fase-blindagem na emenda 1 do ramal 3 (única emenda presente no trecho inicial)
F10	Curto-circuito fase-terra na AT do transformador do aerogerador AG-115 (primeiro AG do ramal 3)
F11	Curto-circuito fase-terra na AT do transformador do aerogerador AG-112 (último AG do ramal 3)

São monitoradas as tensões fase-blindagem nas emendas, nos aerogeradores do ramal sob análise bem como na primeira emenda dos ramais vizinhos. Adicionalmente, são monitoradas as tensões nos cubículos, cabos, aerogeradores e no neutro do transformador 230/34,5 kV (Tabelas 3 e 4). A energia dissipada nos PRs de neutro e de cubículo são suprimidas pois apresentam valores desprezíveis.

Tabela 3: Legenda com denominação das variáveis monitoradas.

Variável	Descrição	Variável	Descrição
CO_BL_IN	Tensão entre condutor e blindagem no início do ramal	L3_E-BE	Tensão entre condutor e blindagem da emenda 1 do ramal 3
VE1-BE1	Tensão entre condutor e blindagem da emenda 1	L11-P1	Corrente no DJ do ramal 1
VE2-BE2	Tensão entre condutor e blindagem da emenda 2	BL_IN	Corrente na blindagem no início do ramal 1
VE3-BE3	Tensão entre condutor e blindagem da emenda 3	INEU_TF	Corrente no Neutro do TF 230/34.5kV
VE4-BE4	Tensão entre condutor e blindagem da emenda 4	AT115	Tensão fase-terra na AT do AG115
CO_BL_FI	Tensão entre condutor e blindagem no final do ramal	AT112	Tensão fase-terra na AT do AG112
AT106	Tensão fase-terra na AT do AG106	L1_E-BE	Tensão entre condutor e blindagem da emenda 1 do ramal 1
AT101	Tensão fase-terra na AT do AG101	L31-P1	Corrente no DJ do ramal 3

Tabela 4: Resultados de aplicação de falta no ramal 1 – Geração em 100%.

Caso	Tensões (kVpico)																	Correntes (Apico)				
	NEU_TF	CO_BL_IN		VE1-BE1		VE2-BE2		VE3-BE3		VE4-BE4		CO_BL_FI		AT106		AT101		L3_E-BE		L11-P1	BL_IN	INEU_TF
		temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans			
F1	15.57	40.21	79.59	40.22	79.68	40.22	79.74	40.23	79.83	40.23	79.86	40.25	79.91	40.3	80.02	40.16	79.91	40.21	--	2771	2085	3115
F2	15.18	40.22	79.35	40.25	79.47	40.25	79.55	40.27	79.67	40.28	79.71	40.29	79.79	40.39	79.93	40.2	79.82	40.22	--	2700	1763	3034
F3	14.86	40.15	79.2	40.17	79.34	40.19	79.45	40.21	79.6	40.23	79.65	40.25	79.75	40.37	79.9	40.14	79.8	40.12	--	2643	1514	2971
F4	14.45	39.93	79.05	39.96	79.22	39.98	79.36	40.02	79.54	40.03	79.61	40.06	79.72	40.21	79.91	39.94	79.82	39.89	--	2569	1194	2889
F5	14.31	39.82	79.05	39.85	79.23	39.88	79.38	39.92	79.58	39.93	79.64	39.96	79.77	40.12	79.98	39.84	79.88	39.79	--	2545	1087	2862
F6	14.05	39.59	79.11	39.62	79.32	39.65	79.48	39.69	79.71	39.7	79.79	39.74	79.93	39.91	80.16	39.59	80.06	39.56	--	2501	898	2813
F7	12.32	39.14	75.2	39.18	75.38	39.22	75.53	39.28	75.73	39.31	75.8	39.35	75.93	39.42	75.93	39.61	76.76	39.08	--	2193	636	2465

Nota (1): Temp: tensão temporária durante a permanência da falta. (2) Trans: máxima tensão transitória, ocorrida durante a interrupção da falta.

Tabela 5: Resultados de aplicação de falta no ramal 3 – Geração em 100%.

Caso	NEU_TF	Tensões (kVpico)												Correntes (Apico)		
		CO_BL_IN		VE1-BE1		CO_BL_FI		AT115		AT112		L1_E-BE		L31-P1	BL_IN	INEU_TF
		temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans			
F8	15.54	39.93	73.52	39.96	73.63	40.01	73.74	40.08	73.85	39.96	73.89	39.82	--	2767	1604	3109
F9	15.25	39.84	73.49	39.88	73.63	39.94	73.63	40.04	73.9	39.89	73.97	39.69	--	2717	1559	3052
F10	14.99	39.63	73.59	39.69	73.77	39.76	73.93	39.89	74.1	39.71	74.19	39.47	--	2671	891	3002
F11	13.93	39.69	71.53	39.76	71.71	39.84	71.87	39.91	71.86	40.01	72.55	39.49	--	2481	644	2788

A partir das Tabela 4 e 5, verifica-se que o caso de maior severidade identificado foi o caso F6 (Curto-circuito fase-terra na AT do transformador do aerogerador AG-106).

3.1.1-B - Refinamento da pior condição de aplicação do curto-circuito nos ramais e instalação de novos PRs:

Com o objetivo de maximizar as solicitações, o caso de maior severidade (Caso F6) é avaliado na situação de contingência no sistema interligado, com desligamento do elemento que promoveu a maior redução do nível de curto-circuito na barra de 230 kV. Na sequência, verifica-se a influência da geração do parque (10% e 50%). Em função dos elevados níveis de sobretensão obtidos nos cabos e nos transformadores dos aerogeradores, são simulados casos considerando a instalação de PRs adicionais em posições distribuídas ao longo dos ramais. A descrição destes casos são apresentados na Tabela 6 e os valores obtidos resumidos na Tabela 7.

Tabela 6: Identificação das piores solicitações (rede degradada e variação de geração).

Caso	Descrição
F6 (referência)	Curto-circuito fase-terra na AT do transformador do aerogerador AG-106 (primeiro AG do ramal 1)
F6.1	Idêntico ao Caso 6, mas com contingência de LT 230kV
F6.2	Idêntico ao Caso 6, mas com geração reduzida para 10%
F6.3	Idêntico ao Caso 6, mas com geração reduzida para 50%
F6.4	Idêntico ao Caso 6.2, mas com PRs no início do ramal L1.1
F6.5	Idêntico ao Caso 6.2, mas com PRs no primeiro aerogerador (AG-106)
F6.6	Idêntico ao Caso 6.2, mas com PRs no último aerogerador (AG-101)

Tabela 7: Detalhamento das piores solicitações de falta no ramal L1.1 (Rede degradada e variação de geração).

Caso		Tensões (kVpico)																				Energia Novo PR	
		CO_BL_IN			VE1-BE1		VE2-BE2		VE3-BE3		VE4-BE4		CO_BL_FI			AT106			AT101				L3_E-BE
		temp	trans	trans F-F	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	temp	trans	trans F-F	temp	trans	trans F-F	temp	trans	trans F-F		temp
F6	14.05	39.59	79.11	80.17	39.62	79.32	39.65	79.48	39.69	79.71	39.70	79.79	39.74	79.93	79.92	39.91	80.16	79.92	39.59	80.06	79.83	39.56	---
F6.1	12.45	37.31	71.24	72.02	37.31	71.41	37.31	71.55	37.33	71.73	37.34	71.81	37.35	71.92	71.92	37.49	72.11	71.92	37.19	72.03	71.82	37.32	---
F6.2	14.07	39.53	86.84	91.57	39.56	87.06	39.58	87.23	39.63	87.45	39.64	87.55	39.68	87.70	91.41	39.85	87.95	91.41	39.54	87.81	91.20	39.48	---
F6.3	14.07	39.64	79.09	80.17	39.67	79.29	39.69	79.46	39.73	79.68	39.75	79.76	39.79	79.91	79.90	39.96	80.13	79.90	39.64	80.03	79.80	39.60	---
F6.4	14.07	39.53	53.86	66.27	39.56	54.17	39.58	54.41	39.63	54.78	39.64	54.92	39.68	55.16	66.26	39.85	55.45	66.27	39.54	55.86	66.27	39.48	4.20
F6.5	14.07	39.53	52.26	66.27	39.56	52.41	39.58	52.50	39.63	52.66	39.64	52.72	39.68	52.82	66.27	39.85	53.00	66.27	39.54	53.12	66.27	39.48	4.62
F6.6	14.07	39.53	53.89	66.27	39.56	53.98	39.58	53.99	39.63	54.06	39.64	54.09	39.68	54.13	66.27	39.85	54.43	66.27	39.54	53.35	66.27	39.48	4.59

As maiores sobretensões transitórias sobre os cabos, emendas e transformadores ocorrem na condição de curto-circuito fase-terra no terminal de alta tensão do transformador do aerogerador AG-106, sistema completo, com geração ajustada em 10% da capacidade do parque (Caso F6.2). A máxima sobretensão transitória foi de 87,95kVpico (3,12pu) na AT do Transformador AG-106. As formas de onda são apresentadas na Figura 3.

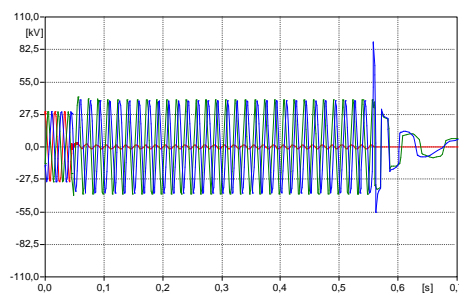


Figura 3a – Tensão na AT do TF AG-106 (modelo simplificado).

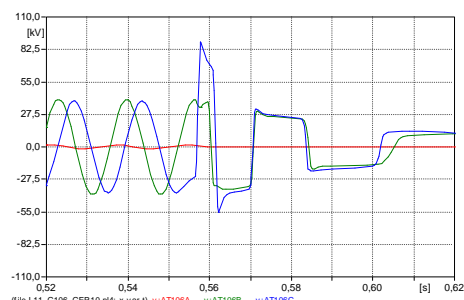


Figura 3b – detalhe da Figura 3a.

Com adição de PRs, verifica-se que as sobretensões máximas são consideravelmente reduzidas (valores inferiores a 2,0 pu), com maiores atenuações quando da instalação junto ao primeiro aerogerador (Figura 4).

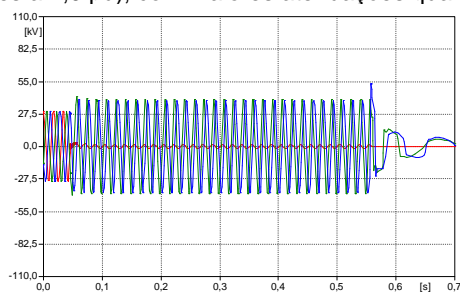


Figura 4a – Tensão na AT do TF AG-106 com PR (modelo simplificado).

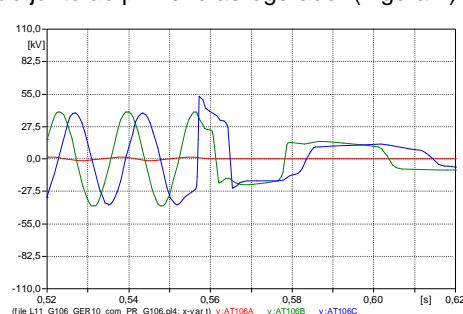


Figura 4b – detalhe Figura 4a.

A TRT sobre o disjuntor de 34,5kV, com e sem a instalação de novos PRs é apresentada na Figura 5.

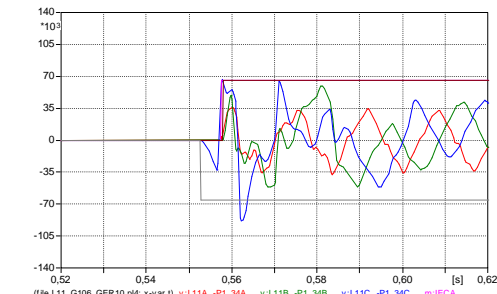


Figura 5a – TRT no DJ de 34,5kV (modelo simplificado).

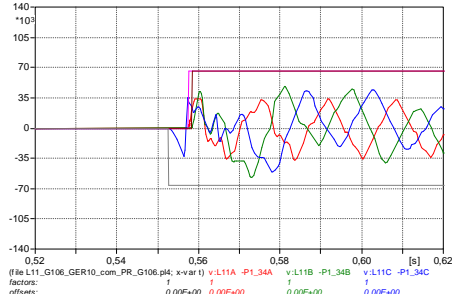


Figura 5b – TRT no DJ de 34,5kV com PR (modelo simplificado).

3.1.1-C - Análise de desenergização dos ramais e cabos entre os cubículos e transformador 230/34,5 kV:

Para verificar as sobretensões impostas considerando injeção de potência pelos aerogeradores, são simuladas aberturas dos disjuntores (desenergização) dos ramais em função de manobra manual ou trip indevido. Cabe lembrar que as simulações de abertura em curto-circuito apresentadas anteriormente consideram os conversores dos aerogeradores bloqueados (sem injeção de potência). São consideradas aberturas dos disjuntores do ramal L1.1 e da média tensão do transformador 230/34,5 kV, com cenários de geração de 10% e 100%. A sequência de eventos é definida de acordo com as lógicas de controle e proteção dos aerogeradores. A interrupção das correntes dos aerogeradores ocorre 1 ms após a atuação das proteções de sobretensão dos mesmos. Em função dos elevados níveis de sobretensão observados, o Caso D2 (caso de maior severidade) é reavaliado com a instalação de PRs conforme segue. Os PRs são modelados com as mesmas características daqueles instalados nos cubículos de 34,5kV. Abaixo, segue o descritivo dos casos simulados e resultados obtidos (Tabela 8 e 9).

Tabela 8: Descrição dos casos de desenergização.

Caso	Descrição
D1	Abertura manual do DJ 34,5kV do TF230/34,5kV (ramais L1.1, L1.2 e L1.3); geração de 100%
D2	Desenergização com abertura accidental do DJ do ramal L1.1, com geração de 100%.
D3	Desenergização com abertura accidental do DJ do ramal L1.1, com geração de 10%.
D2.1	Idêntico ao Caso D2, mas com PRs no início do ramal L1.1
D2.2	Idêntico ao Caso D2, mas com PRs no primeiro aerogerador (AG-106)
D2.3	Idêntico ao Caso D2, mas com PRs no último aerogerador (AG-101)

A partir das simulações de desenergização dos ramais, pode-se constatar que as maiores sobretensões transitórias sobre os cabos, emendas e transformadores ocorreram na condição de abertura accidental do ramal L1.1, com geração ajustada em 100% da capacidade do parque (Caso D2). Nesta condição, as máximas sobretensões transitórias obtidas são de 171,38kVpico (6,08pu) entre fase-blindagem e de 169,30kVpico (6,01pu) na AT do transformador AG-101 (Figura 6a). Supondo-se a instalação de PRs, de acordo os casos D2.1, D2.2 e D2.3, as sobretensões máximas são consideravelmente reduzidas para valores inferiores a 2 pu (Figura 6b). A TRT sobre o disjuntor de 34,5kV, com e sem a instalação de novos PRs, é apresentada na Figura 7.

Tabela 9: Resultados - Desenergização dos ramais e cabos entre os cubículos e transformador 230/34,5kV.

Caso	DJ manobrado	Geração	Tensões (kVpico)										Energias - PRs (kJ)	
			VNEU_TF	CO_BL_IN trans	VE1-BE1 trans	VE2-BE2 trans	VE3-BE3 trans	VE4-BE4 trans	CO_BL_FI trans	AT106 trans	AT101 trans	L3_E-BE trans	TF1-34	Novo PR
D1	BT_TF230 (1)	100%	12.02	57.41	57.48	57.55	57.63	57.66	57.72	57.72	57.91	57.43	21.900	---
D2	Ramal L1.1	100%	2.35	171.38	171.15	170.81	170.09	169.79	169.23	169.24	169.30	33.24	---	---
D3	Ramal L1.1	10%	0.30	62.94	62.65	62.59	62.49	62.47	62.41	62.41	62.37	---	---	---
D2.1	Ramal L1.1	100%	2.55	54.56	54.61	54.65	54.72	54.74	54.78	54.78	54.95	33.45	---	7.75
D2.2	Ramal L1.1	100%	2.54	54.75	54.71	54.68	54.63	54.62	54.59	54.51	54.74	33.45	---	7.70
D2.3	Ramal L1.1	100%	2.54	55.13	55.09	55.05	55.00	54.98	54.95	54.96	54.50	33.45	---	7.70

Nota (1): Sobretensões reduzidas em função da representação de PR no cubo de 34,5kV.

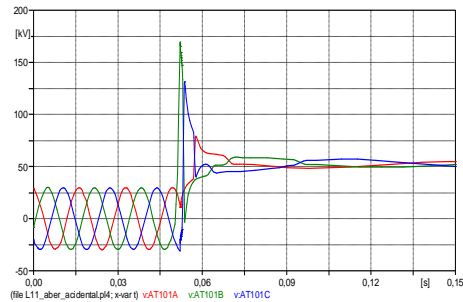


Figura 6a – Abertura manual – Tensão na AT do TF AG-101 (modelo simplificado).

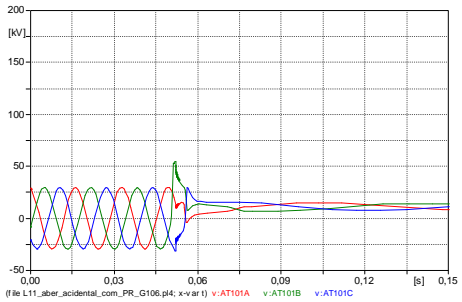


Figura 6b – Abertura manual – Tensão na AT do TF AG-101 (modelo simplificado) com PRs.

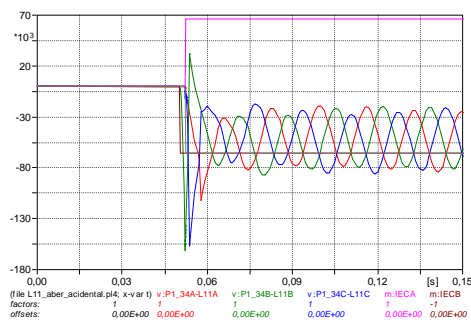


Figura 7a – Abertura manual – TRT DJ34,5kV (modelo simplificado).

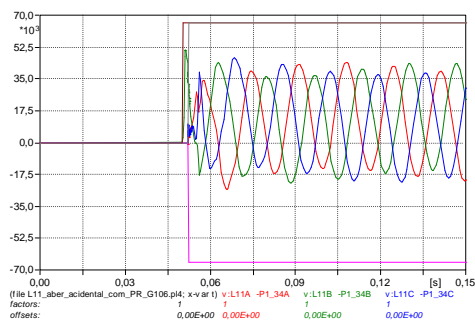


Figura 7b – Abertura manual – TRT DJ34,5kV (modelo simplificado) com PRs.

3.2 Modelo B (detalhado): Gerador síncrono *full converter* (Tipo 4) com representação dos controles implementados via MODELS/ATP

Neste item, as condições críticas de eliminação de falta e abertura de ramal, verificadas com modelo simplificado, são reavaliadas considerando-se um modelo detalhado com representação dos controles implementados em MODELS/ATP. Neste modelo, são consideradas lógicas de sub e sobretensão, com bloqueio da corrente pelos inversores quando da ocorrência destes eventos. As características principais são resumidas abaixo:

- Injeção de corrente em função das lógicas de controle de potência ativa e reativa.
- Configurado para interromper injeção de corrente durante curto-circuitos.
- Proteção instantânea de sobretensão: não representada.

3.2.1 Aplicação e eliminação de faltas nos ramais de 34,5 kV

O caso de maior severidade identificado na Tabela 7 (Caso F6.2) é reavaliado agora com inclusão de modelo detalhado. Para subsidiar as análises do grau de detalhamento necessário, são considerados níveis diferentes de representação dos aerogeradores por MODELS/ATP, quais sejam:

Nível 1: representação apenas dos aerogeradores do ramal L11 (6 aerogeradores);

Nível 2: representação de todos os aerogeradores do complexo eólico (45 aerogeradores).

As formas de onda obtidas para os níveis de representação 1 e 2 são apresentadas nas Figura 8 e 9, respectivamente. Os casos considerando a instalação de PRs são apresentados nas Figura 10 e 11. As TRTs sobre o disjuntor de 34,5kV são ilustradas nas Figura 12 e 13. De acordo com os resultados, constata-se que a dinâmica das sobretensões e os valores máximos são muito similares, independente do nível de representação adotado (99,9 kV_{pico} e 103,2 kV_{pico} para os Níveis 1 e 2, respectivamente). As sobretensões obtidas utilizando-se a representação por MODELS é superior em 17% com relação ao modelo simplificado (103,2 kV_{pico} versus 87,9kV_{pico}). As mesmas constatações são observadas no comportamento da TRT sobre o disjuntor do ramal.

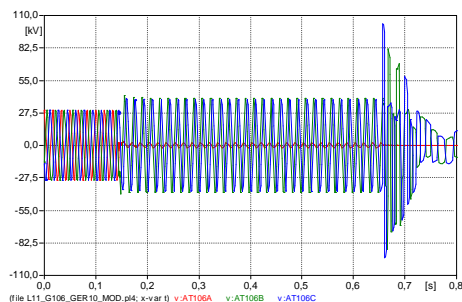


Figura 8a: Tensão na AT do TF AG-106 (MODELS no ramal L11).

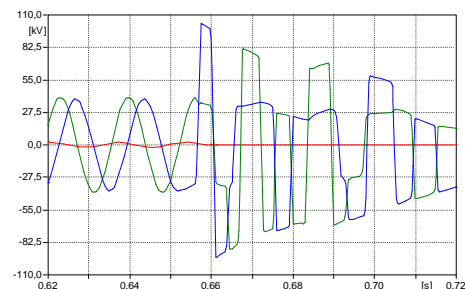


Figura 8b: detalhe Figura 8a.

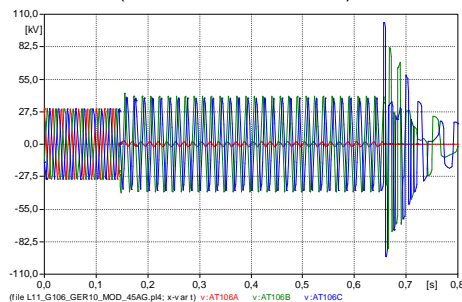


Figura 9a: Tensão na AT do TF AG-106 (MODELS em todo o parque).

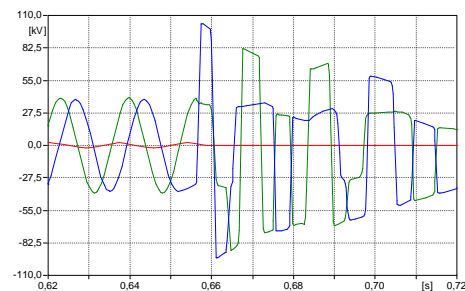


Figura 9b: detalhe Figura 9a.

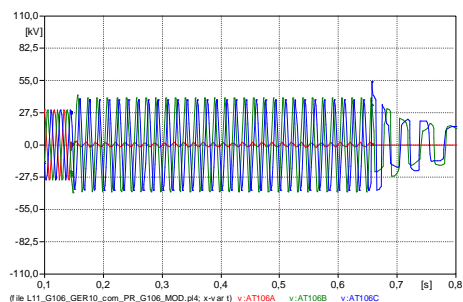


Figura 10a: Tensão na AT do TF AG-106 com PRs (MODELS no ramo L11).

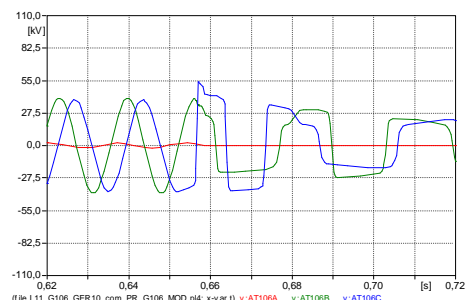


Figura 10b – detalhe Figura 11a.

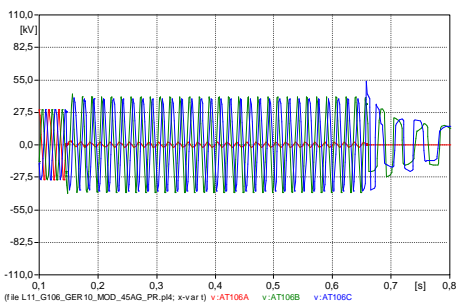


Figura 11a – Tensão na AT do TF AG-106 com PRs (MODELS em todo o parque).

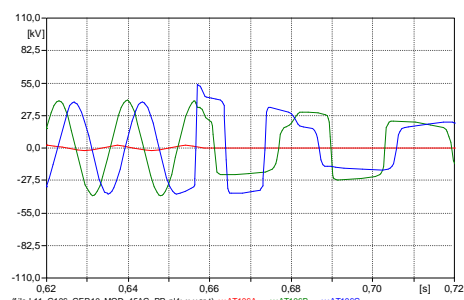


Figura 11b: detalhe Figura 12a.

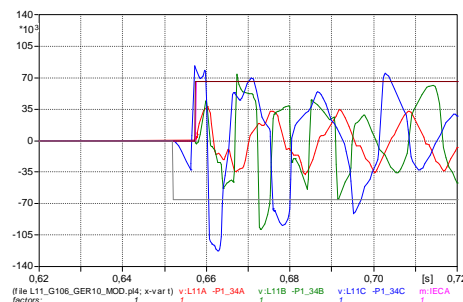


Figura 12a: TRT no DJ de 34,5kV (Models no ramo L11).

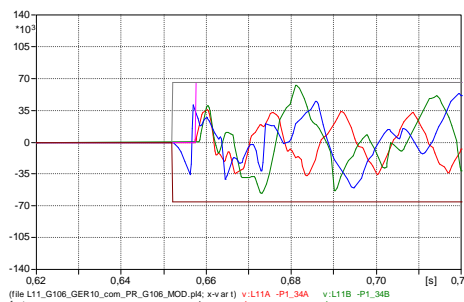


FIGURA 12b: TRT no DJ de 34,5kV com PRs (Models no ramo L11).

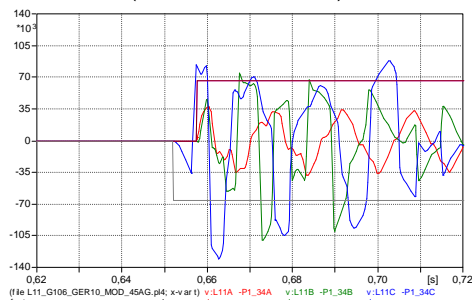


Figura 13a: TRT no DJ de 34,5kV (MODELS em todo o parque).

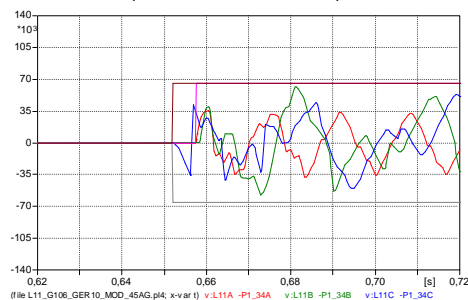


FIGURA 13b: TRT no DJ de 34,5kV com PRs (MODELS em todo o parque).

3.2.2 - Análise de desenergização dos ramos – Representação dos aerogeradores por MODELS/ATP:

O caso de maior severidade identificado na Tabela 9 (Caso D2) é reavaliado agora com inclusão de modelo detalhado. Tendo em vista a elevada similaridade nos resultados dos níveis de representação 1 e 2, apresentados anteriormente, optou-se por comparar apenas a resposta com representação de MODELS no ramo L11. As formas de onda de sobretensão e TRT para o nível de representação 1 são apresentadas nas Figura 14a e 16a, respectivamente. De acordo com os resultados obtidos sem uso de PRs, constata-se sobretensões e TRTs extremamente elevadas e muito superiores aos resultados com modelo simplificado. Tal resultado se deve, principalmente, à ausência de representação da proteção de sobretensão instantânea na MODELS. Os casos associados à instalação de PRs são apresentados nas Figura 14b e 15b. Com uso de PRs, as sobretensões são significativamente reduzidas, com valores muito próximos àqueles obtidos a partir do modelo simplificado (56,9 kV_{pico} versus 54,7kV_{pico}). A dissipação de energia nos mesmos foi de 87,7kJ (58% da capacidade nominal).

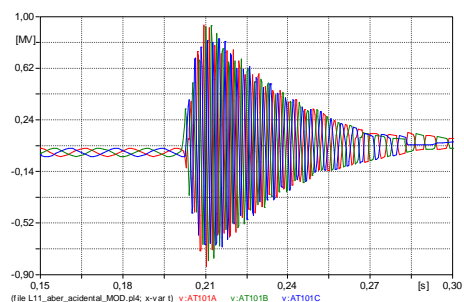


Figura 14a: Abertura manual, Tensão na AT no TF AG-101 (MODELS no ramal L11).

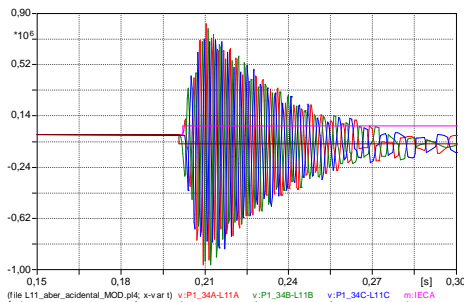


Figura 15a: Abertura manual – TRT DJ34,5kV (MODELS no ramal L11).

A fim de complementar a representação via MODELS, foi adicionada a proteção de sobretensão instantânea aos aerogeradores. Os resultados são apresentados nas Figura 16 e 17. As sobretensões obtidas utilizando-se a representação por MODELS, complementada com proteção de sobretensão, é superior em 48% com relação ao uso do modelo simplificado (250,9 kV_{pico} versus 169,3kV_{pico}). Com uso de PRs, as TRTs não superam as envoltórias de norma bem como as sobretensões são significativamente reduzidas, com valores muito próximos àqueles obtidos a partir do modelo simplificado (55,3 kV_{pico} versus 54,7kV_{pico}). A dissipação de energia nos mesmos foi de 11,2kJ (7,5% da capacidade nominal).

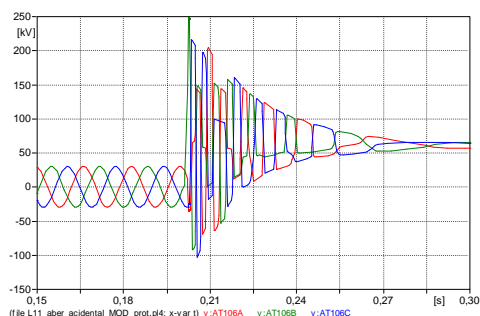


Figura 16a: Abertura manual, Tensão na AT no TF AG-101 (MODELS e proteção no ramal L11).

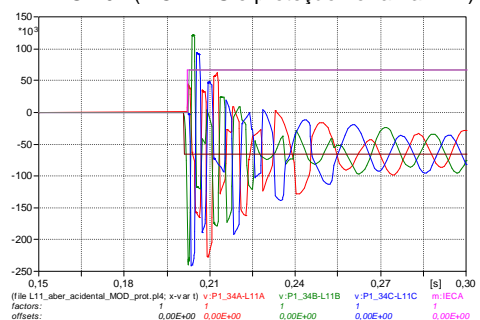


Figura 17a: Abertura manual – TRT DJ34,5kV (MODELS e proteção no ramal L11).

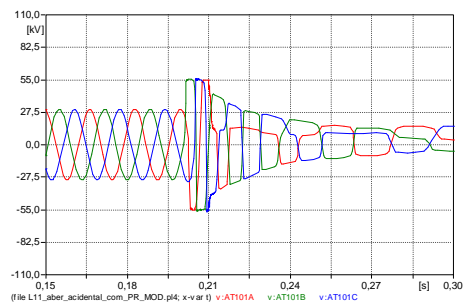


Figura 14b: Abertura manual, Tensão na AT do TF AG-101 com PRs (MODELS no ramal L11).

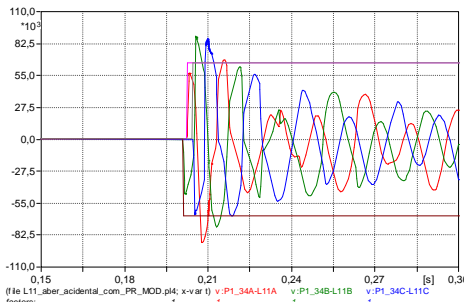


Figura 15b: Abertura manual – TRT DJ34,5kV com PRs (MODELS no ramal L11).

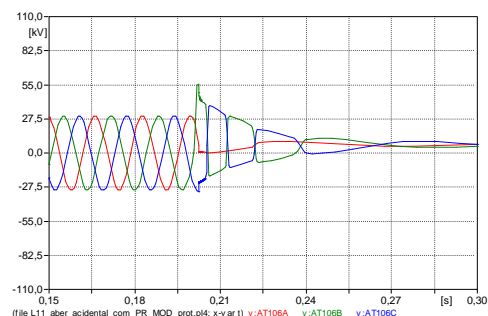


Figura 16b: Abertura manual, Tensão na AT do TF AG-101 com PRs (MODELS e proteção no ramal L11).

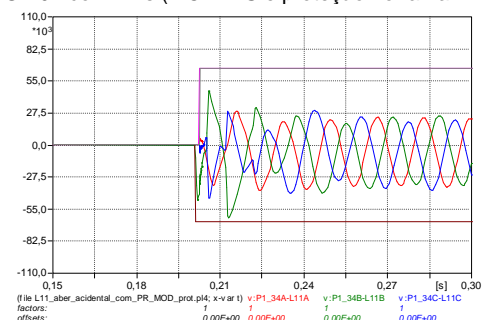


Figura 17b: Abertura manual – TRT DJ34,5kV com PRs (MODELS e proteção no ramal L11).

4.0 - CONCLUSÃO

4.1 – Resultados obtidos com uso do modelo simplificado:

As maiores sobretensões transitórias sobre os cabos, emendas e transformadores dos aerogeradores ocorrem na condição de desenergização do ramal L1.1, com geração ajustada em 100% da capacidade do parque (Caso D2). Nesta condição, as máximas sobretensões transitórias obtidas são da ordem de 6,0pu (170kV_{crista}), valores estes extremamente elevados. De acordo com informações típicas fornecidas por fabricantes, as suportabilidades à manobra mínimas esperadas para os cabos XLPE 20/35kV seriam de 152kV_{crista}, ou seja, equivalente a 76% do NBI (200kV_{crista}). Neste caso, portanto, identifica-se superação dos níveis de sobretensão, denotando a possibilidade de danos à isolação dos cabos. De acordo com informações obtidas de fabricantes, as emendas e mufas terminais dos cabos suportariam as sobretensões temporárias e transitórias máximas identificadas nos estudos.

Com relação aos transformadores dos aerogeradores, os valores máximos obtidos nos casos de desenergização, da ordem de 6,0pu, são extremamente mais elevados que a suportabilidade prescrita na referência [4] de 2,00pu sendo, inclusive, da mesma ordem de grandeza que o NBI típico destes transformadores (170kV).

A suportabilidade a TRT do disjuntor de 34,5kV do ramal manobrado é superada em todas as simulações onde não há a presença de PRs, sendo estas violações eliminadas quando da inclusão dos mesmos.

As suportabilidade dos demais equipamentos (PRs de neutro e de cubículo, enrolamento de 34,5kV e bucha de neutro do transformador principal e reator de neutro) não foram violadas.

Com base nos resultados apresentados, percebe-se que a instalação de PRs adicionais de 30kV reduzem significativamente as sobretensões transitórias a valores inferiores aos valores de referência e abaixo da suportabilidade dos cabos XLPE e transformadores dos aerogeradores. A posição de instalação ótima, que promove a maior redução das sobretensões, é junto à AT do transformador do primeiro aerogerador de cada ramal.

Para casos práticos com aerogeradores tipo 4, é importante destacar que estes novos PRs de 30kV devem ser instalados de tal forma que não sejam removidos quando da manutenção do aerogerador associado. Adicionalmente, como recomendação operacional, sugere-se a inibição da manobra de desenergização de ramais de 34,5kV antes do desligamento prévio dos aerogeradores associados aos mesmos.

Os resultados obtidos com a modelagem simplificada são similares, tanto em amplitude quanto amortecimento das sobretensões, àqueles percebidos nas publicações [1] e [2], onde são considerados modelos simples e completos em PSCAD/EMTDC para parques eólicos e redes de média tensão semelhantes ao caso aqui estudado.

4.2 – Resultados obtidos com uso do modelo detalhado (implementado em MODELS/ATP):

De acordo com os resultados obtidos para aplicação e eliminação de faltas, constata-se que o comportamento das TRTs, sobretensões e os valores máximos são muito similares, independente do nível de representação adotado (MODELS apenas no ramal ou em todo o parque). As sobretensões obtidas utilizando-se a representação por MODELS é superior em 17% com relação ao uso do modelo simplificado. Com uso de PRs, as sobretensões apresentam praticamente os mesmos valores daqueles obtidos com a representação simplificada.

A suportabilidade a TRT do disjuntor de 34,5kV do ramal manobrado é superada em todas as simulações onde não há a presença de PRs. A adição de PRs, em conjunto com a representação da proteção de sobretensão, por sua vez, reduzem as solicitações, adequando as suportabilidades para os casos de eliminação de falta e abertura intempestiva. Com adição da proteção de sobretensão instantânea ao modelo em MODELS/ATP, a sobretensão máxima é superior em 48% com relação ao uso do modelo simplificado (250,9kV_{pico} versus 169,3kV_{pico}).

Desta forma, pode-se concluir que a representação simplificada fornece solicitações similares para os casos de aplicação e eliminação de falta, onde não há injeção de corrente pelos aerogeradores. O mesmo não ocorre para os casos de abertura intempestiva, onde os valores obtidos com a representação simplificada são consideravelmente inferiores aos obtidos com o modelo detalhado (MODELS/ATP) com a representação da proteção de sobretensão.

Destaca-se que as constatações aqui apresentadas não podem ser extendidas, ou generalizadas, à aerogeradores de tecnologias diferentes (tipo 1, 2 ou 3) ou à aerogeradores que, mesmo sendo tipo 4, possuam uma estratégia de controle diferente quando sob falta (FRT – *Fault Ride-Through strategy*), como por exemplo, manutenção da corrente de curto-circuito durante afundamentos de tensão.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) R. King, F. Moore, N. Jenkins, A. Haddad, H. Griffiths, M. Osborne, "Switching transients in offshore Wind farms – impact on the offshore and onshore networks". International Conference on Power Systems Transients - IPST 2011, Delft, Netherlands, June 14-17.
- (2) Jenny Z. Zhou and Robert S. Burton, "Design Studies for a Wind Farm Collector System", International Conference on Power Systems Transients - IPST 2011, Delft, Netherlands, June 14-17.
- (3) ABNT NBR 7287:2009 – Cabos de potência com isolação extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 a 35kV – Requisitos de Desempenho.
- (4) IEEE 1313.2 1999 (Guide for the Application of Insulation Coordination).
- (5) ABNT NBR IEC 62271-100:2006-parte 100, Disjuntores de Alta Tensão de Corrente Alternada.