

Desenvolvimento de modelos computacionais para análise de interferências eletromagnéticas e desempenho térmico em umbilicais de potência integrados

Mario Leite Pereira Filho
João Carlos Leão Veloso Silva

Palestra apresentada para os engenheiros da Petrobras e professores da UFRJ, PUC, IME e UFF, em 25/05. 56 slides.

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. **PROIBIDO REPRODUÇÃO**

www.ipt.br

Desenvolvimento de Modelos Computacionais para Análises de Interferências Eletromagnéticas e Desempenho Térmico em Umbilicais de Potência Integrados

Coordenador IPT

Mario Leite Pereira Filho

Coordenador PETROBRAS

José Carlos Leão Veloso Silva

São Paulo, 18/05/2022

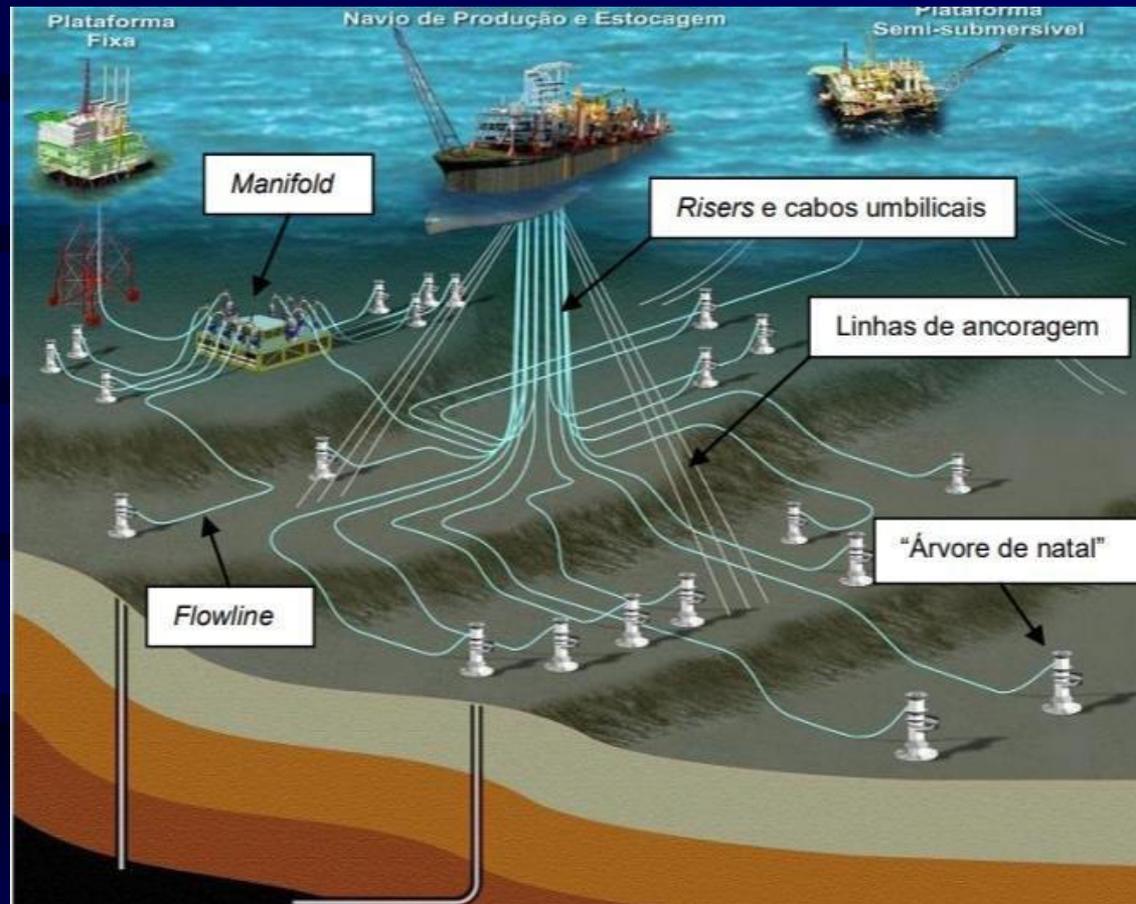
Sumário

- Motivação e escopo do projeto
- Metodologia
- Extração de parâmetros
- Resultados de tensões induzidas (crosstalk)
- Resultados de aquecimento
- Conclusões

Motivação

- Relatos documentados de ocorrência de interferências eletromagnéticas (crosstalk) nos equipamentos de sensoriamento no acionamento de bombas submarinas.
- Este crosstalk pode levar à parada das bombas com o consequente impacto na produção de óleo.
- Há necessidade de um modelo para quantificação deste crosstalk para permitir projetos de umbilicais que reduzam este problema
- A elevação de temperatura do umbilical imerso em água e em ar é diferente e seu impacto precisa ser melhor avaliado

Diagrama de exploração



Fonte : Diário do Pre-Sal Petrobras

Escopo

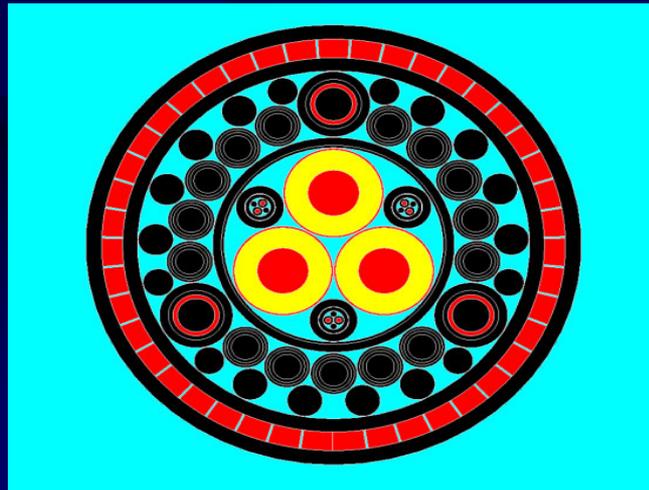
- O escopo do projeto é o de obter formas de construção e organização da seção transversal dos umbilicais que minimizem o crosstalk e possam ser fabricados pelos fornecedores existentes.
- Para isto é necessário construir modelos digitais que permitam a reprodução em computador dos fenômenos que ocorrem durante a operação.
- A análise dos resultados obtidos permitirá a escolha de seções transversais que minimizem o problema do crosstalk.
- Com estas seções pode-se estudar por meio de simulação multifísica o aquecimento do umbilical em diferentes condições de instalação.

Metodologia

- O umbilical sob o ponto de vista elétrico é uma estrutura com algumas peculiaridades quanto a simulações computacionais:
- a) Seu fator de forma comprimento / diâmetro é muito desfavorável para uma abordagem direta 3D, com malhas muito deformadas ou com um número muito alto de graus de liberdade para a solução numérica
- b) Internamente a seção é não uniforme devido aos passos diferentes do trifólio de potência, cabos de controle e tubulações, impedindo uma abordagem direta 2D
- c) A representação do circuito entre o acionador na superfície e a bomba submersa precisa considerar modelo de linha de transmissão (LT) longa, $f_{com} = 9,6 \text{ kbs}$ (MODBUS-RTU).

Metodologia

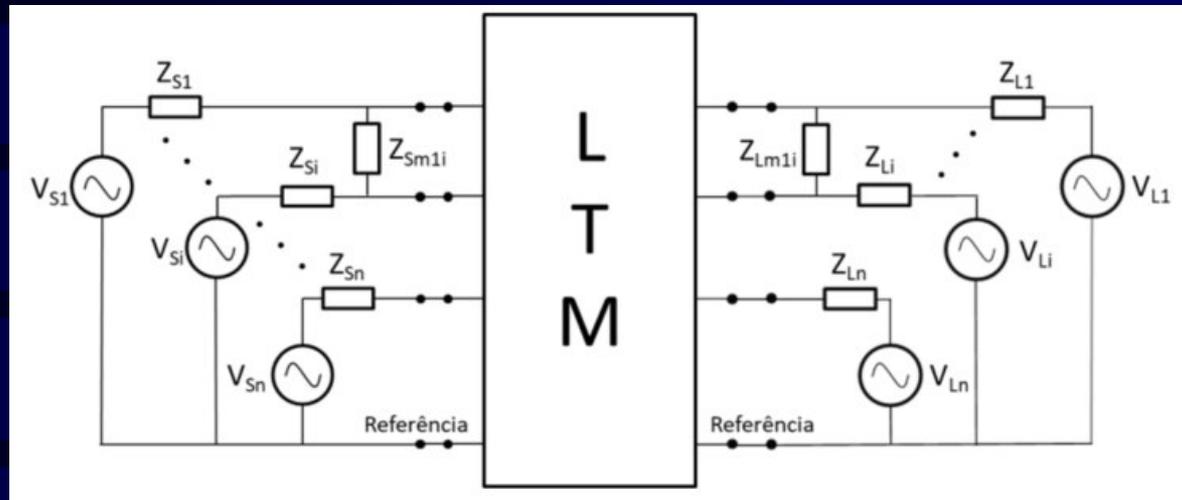
- A literatura mostra que as análises mais eficientes utilizam o modelo de circuitos para representar o cabo elétrico do umbilical entre o conversor e a bomba.
- É necessário calcular os parâmetros LRCG do circuito
- Seção não uniforme, geometria complexa e diversos materiais: MEF é indicado
- Representação da linha não uniforme pode ser feita com teoria das LT multicondutores não uniformes



[GEOMETRIA_jub
arte_2022-05-
15_08h31m15.mp4](#)

Metodologia

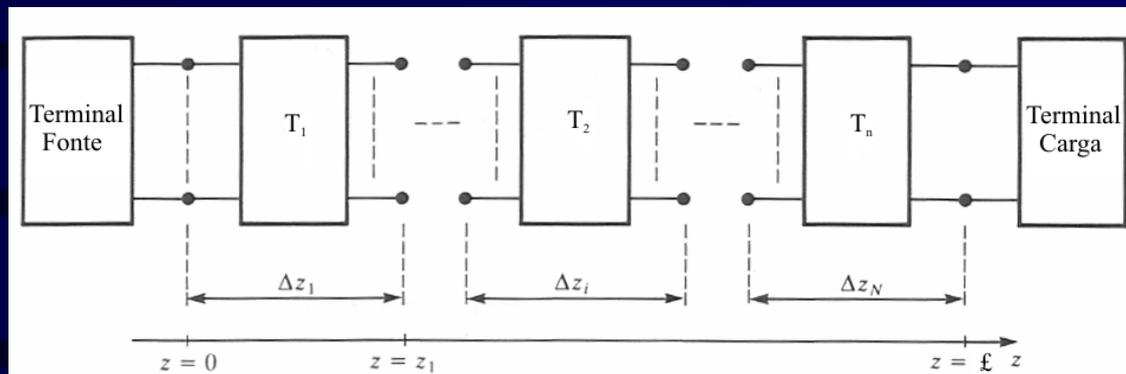
- Representação de circuitos



- A LTM (linha de transmissão multicondutores) é modelada como uma associação série de seções do umbilical, com amostragem que considera o menor passo (par de controle)
- Cada par de controle foi amostrado em 8 pontos

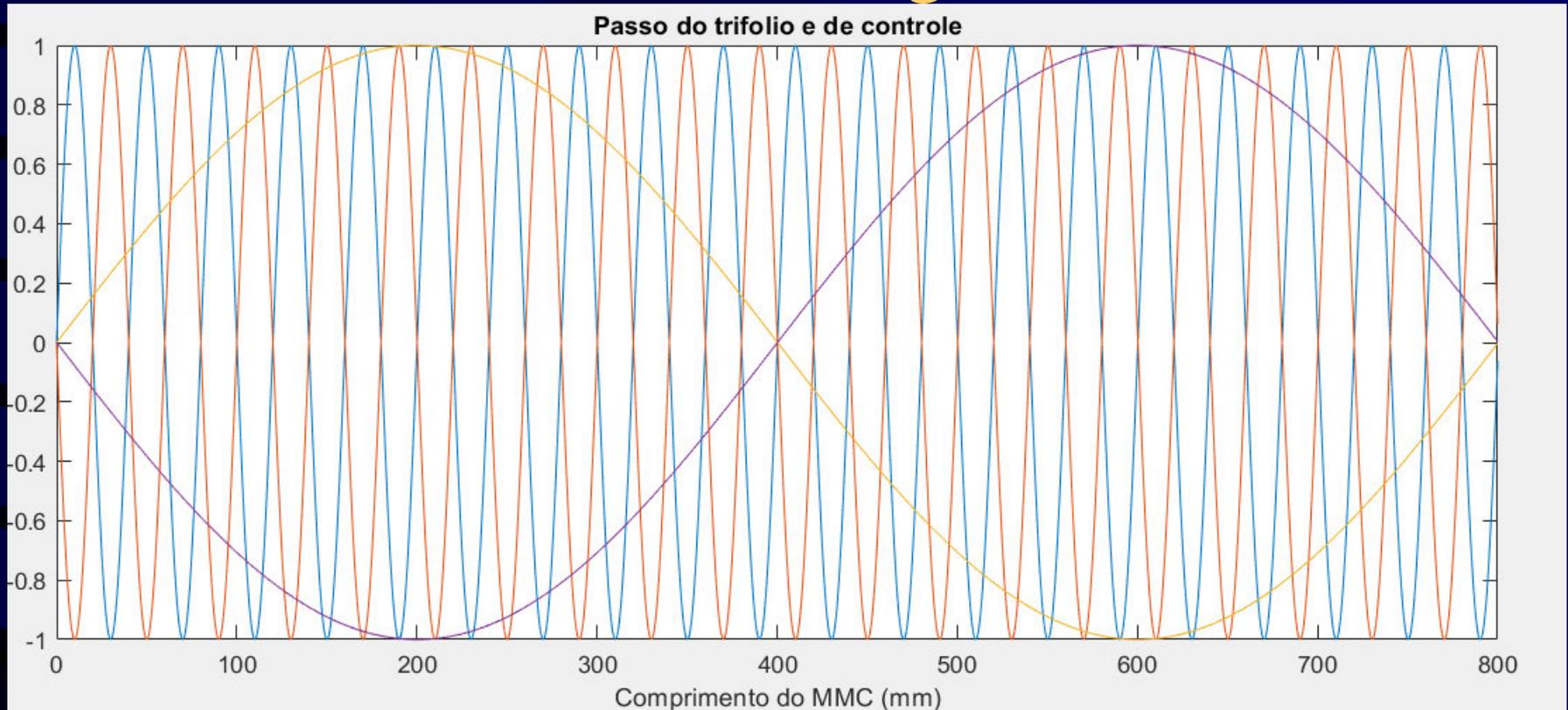
Metodologia

- Representação da LTM



- Cada seção é representada por um modelo de LT distribuída, os valores das propriedades permitem descartar G
- Parâmetros calculados no domínio da frequência entre 10 Hz e 100 kHz.

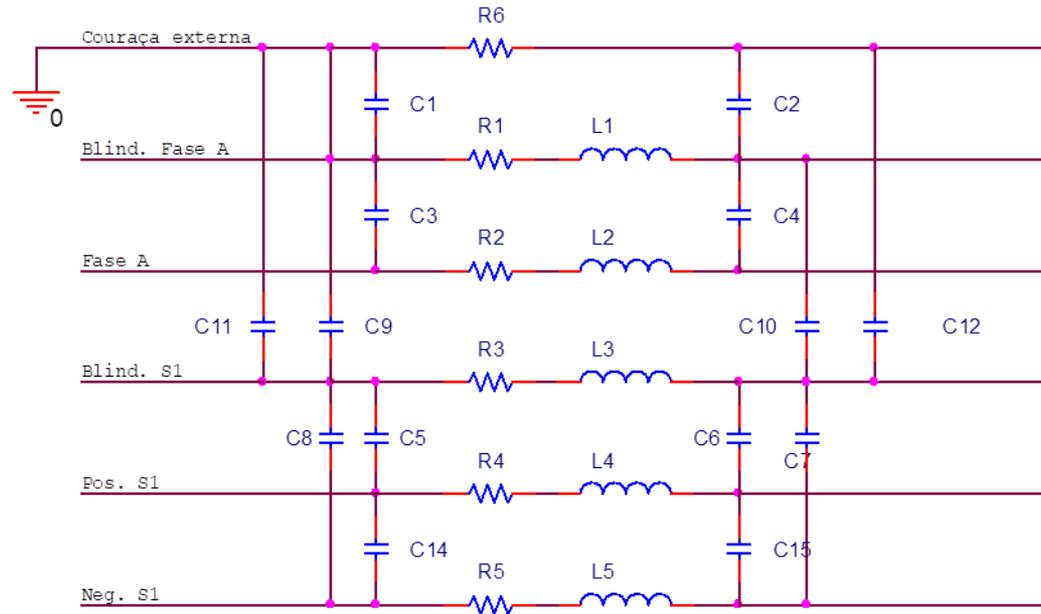
Metodologia



- Cada seção é representada por um modelo de LT distribuída, os valores das propriedades permitem descartar G
- $N_{\text{seções}} = 8 * 40 = 320$.

Metodologia

- Representação de cada seção da LTM



- Exemplo para uma fase de potencia e um par de controle

Softwares utilizados

- Opção foi usar abordagens paralelas e não apostar tudo em um única rota. Testes cruzados para verificação.
- Software de pacote fechado: Feko / Altair
 - Entra com a geometria e materiais
 - O Feko faz seu próprio cálculo numérico de parâmetros
 - Resolve modelo de circuitos com propagação
 - Principal aplicação em telecomunicações
- Solução mista: Flux / Altair e Matlab
 - Flux calcula parâmetros RLC por MEF
 - Solução LTM executada no Matlab (com propagação)
- Poderia ser utilizado Maxwell / Ansys para o MEF, questão de preço e familiaridade da equipe com Flux
- Todos permitem abordagem multifísica – Temperatura

Resultados

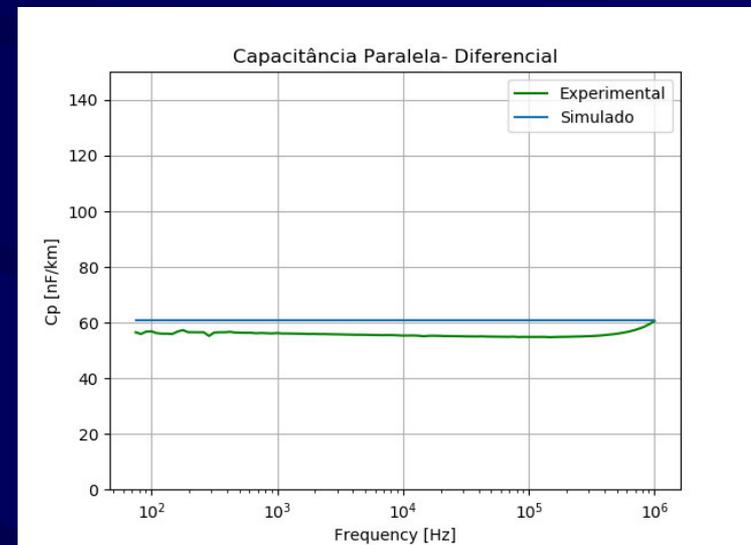
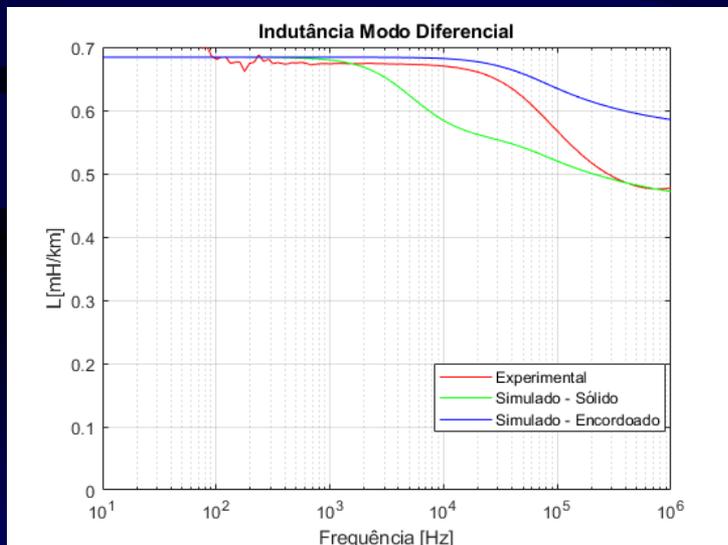
- Seção original do Jubarte : [GEOMETRIA_jubarte_2022-05-15_08h31m15.mp4](#)
- Pares de controle giram junto com o trifólio e estão expostos à mesma tensão induzida ao longo de todo o comprimento do cabo
- Tensões de modo comum se somam! Problema observado no caso documentado.
- Interligação das blindagens nas duas pontas reduz o valor das tensões induzidas mas expõe as blindagens a risco térmico durante curtos-circuitos

Extração de parâmetros RLC

- Parâmetros calculados no domínio da frequência, regime permanente
- 15 condutores, injetar corrente em cada um deles individualmente e calcular os fluxos induzidos para calcular L e R na simulação magnetodinâmica, matriz 15x15
- Impor tensão em cada um dos condutores e calcular cargas induzidas para calcular C na simulação eletrodinâmica, matriz 15x15.

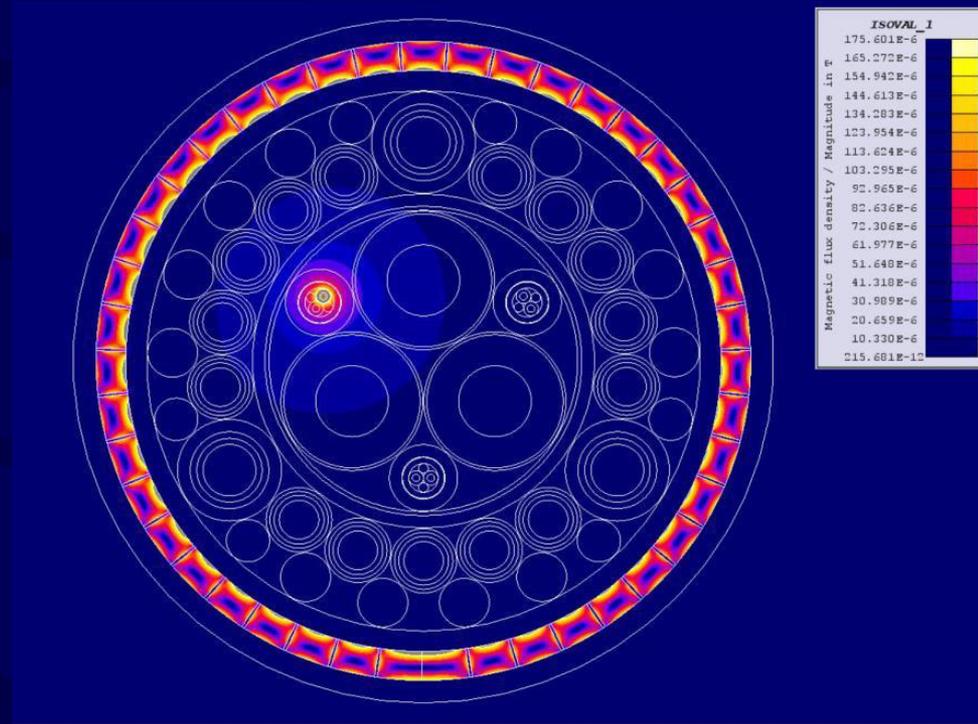
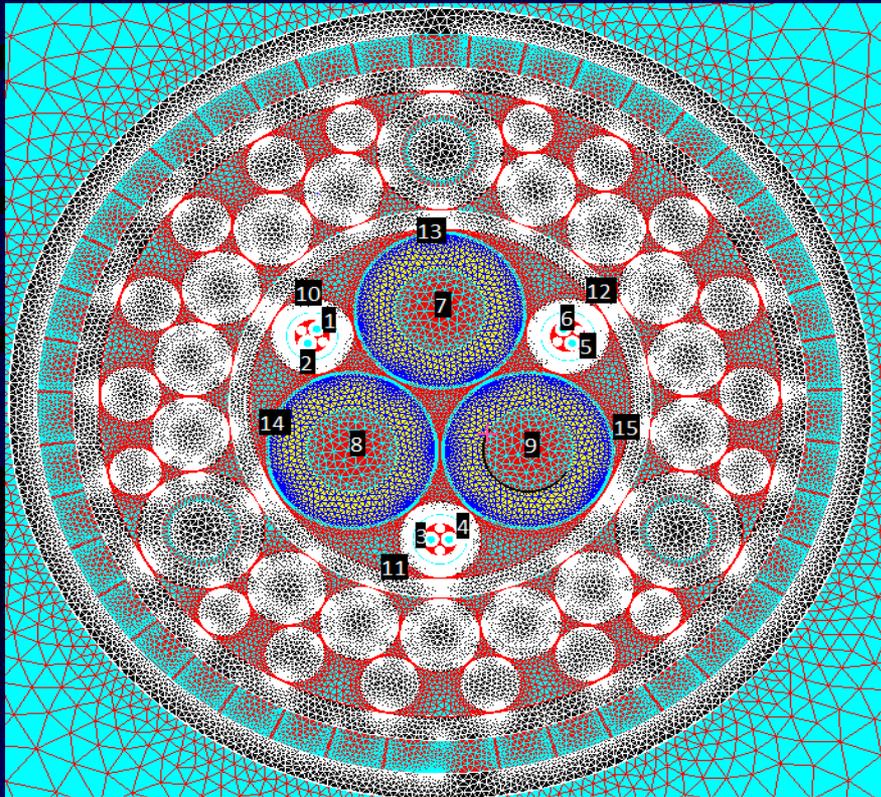
Verificação experimental LC

- Medidas em cabo modbus com um par traçado e blindagem braided
- Pequenas diferenças , correção com informações mais precisas dos matérias e geometria

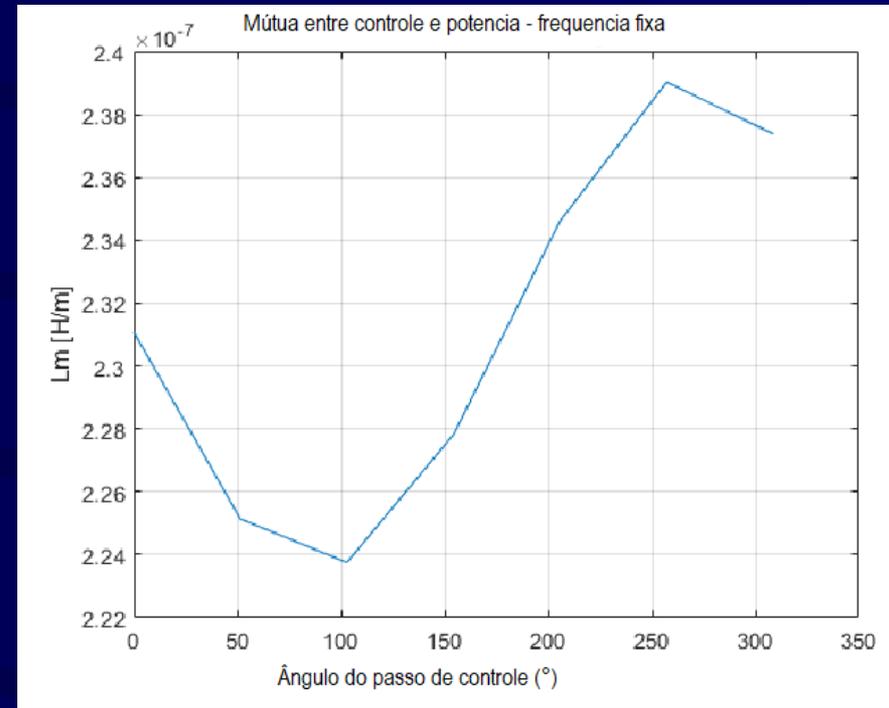
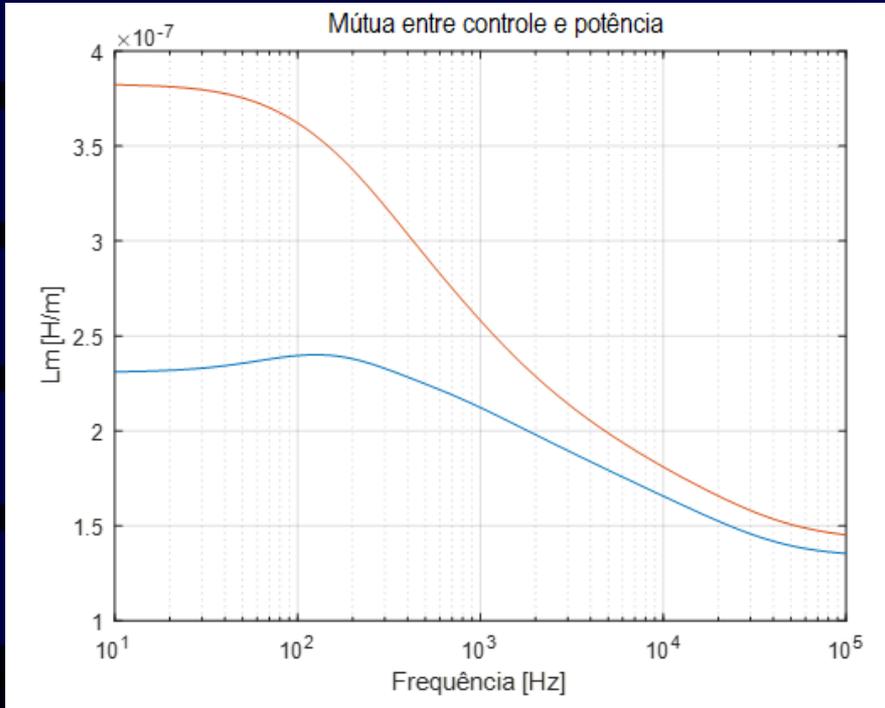


Ambiente simulação Flux

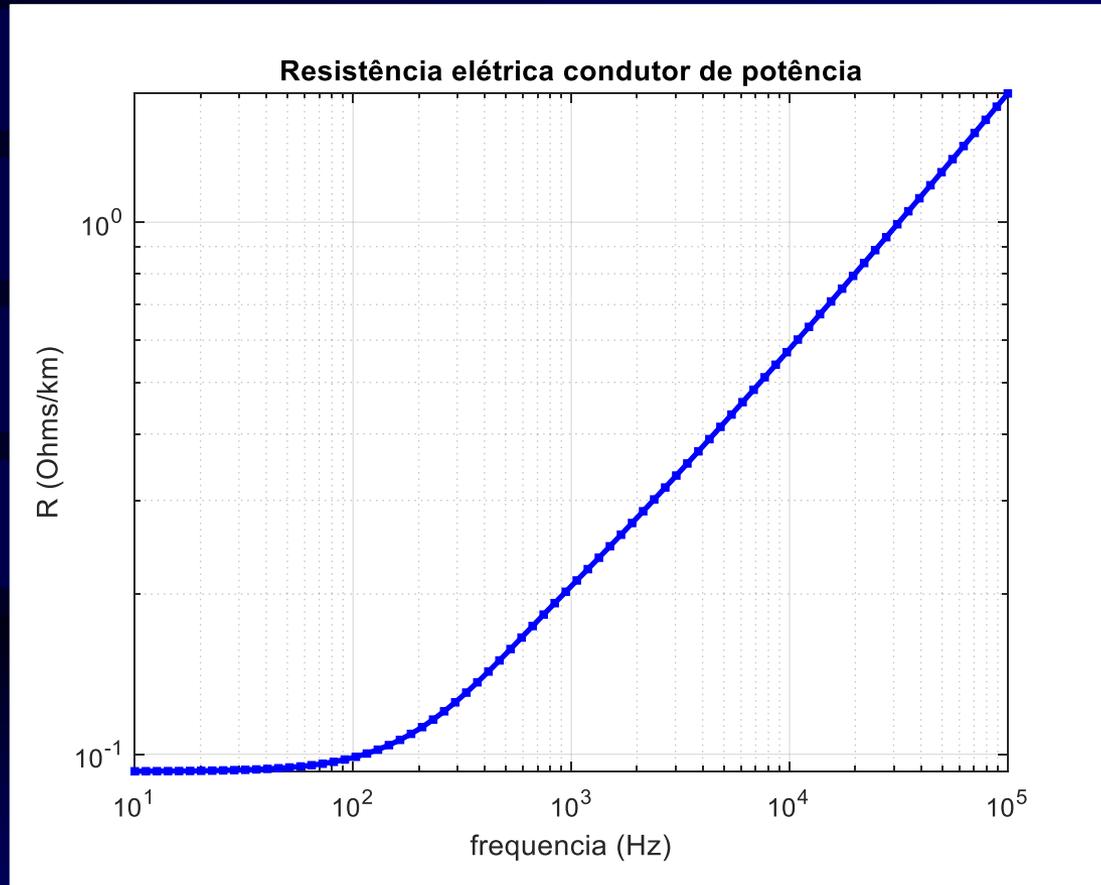
- Malha MEF e simulação magnética



Resultados típicos de L



Efeito pelicular na resistência elétrica do condutor de potência



Situações examinadas crosstalk

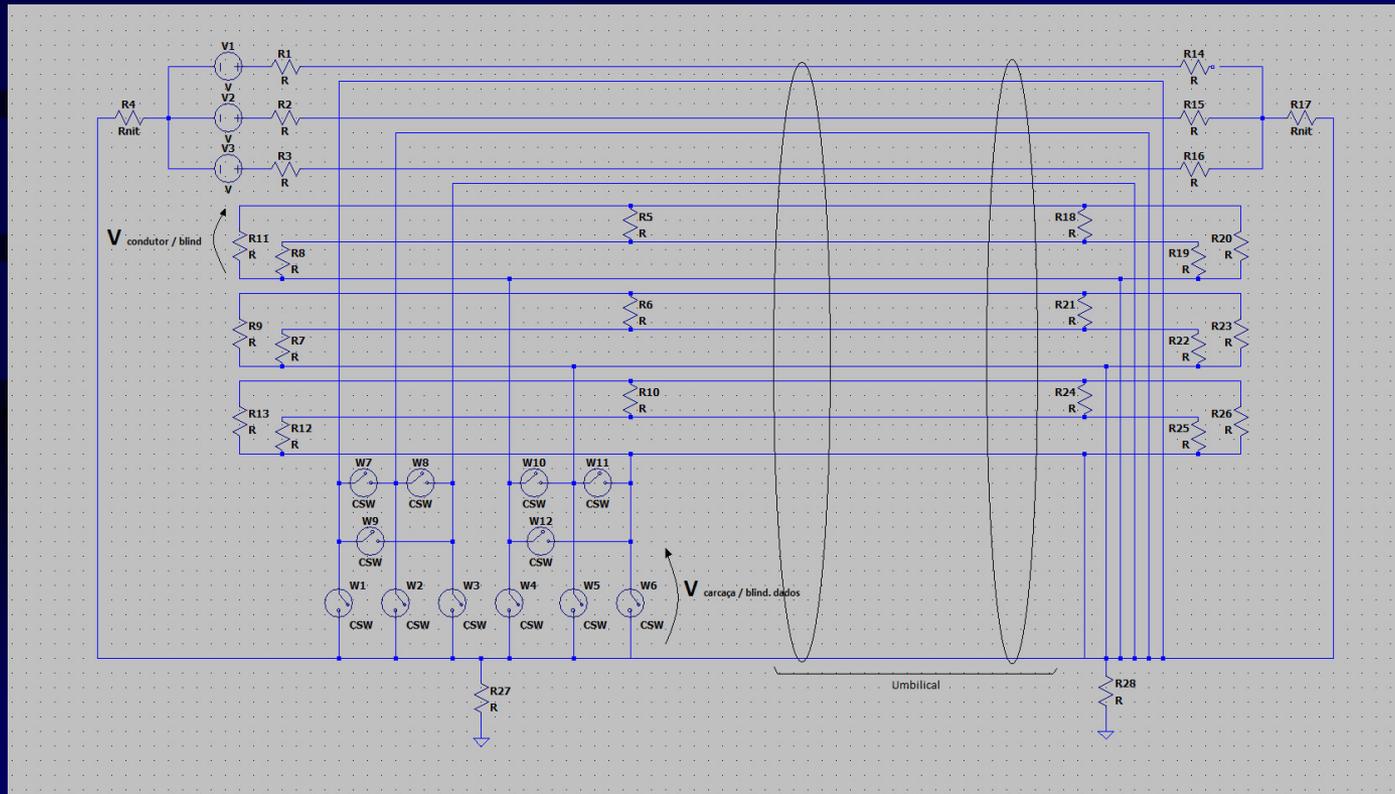
- Literatura indica que efeitos principais estão associados a:
 - Posição relativa entre os condutores – giro entre seções
 - Interconexão e/ou aterramento de blindagens
 - Variação de posição de projeto – fabricação
 - Alterações de materiais ou de suas propriedades
 - Desbalanceamento de carga
- Todos estes aspectos foram verificados sistematicamente

Posição relativa entre condutores - giro

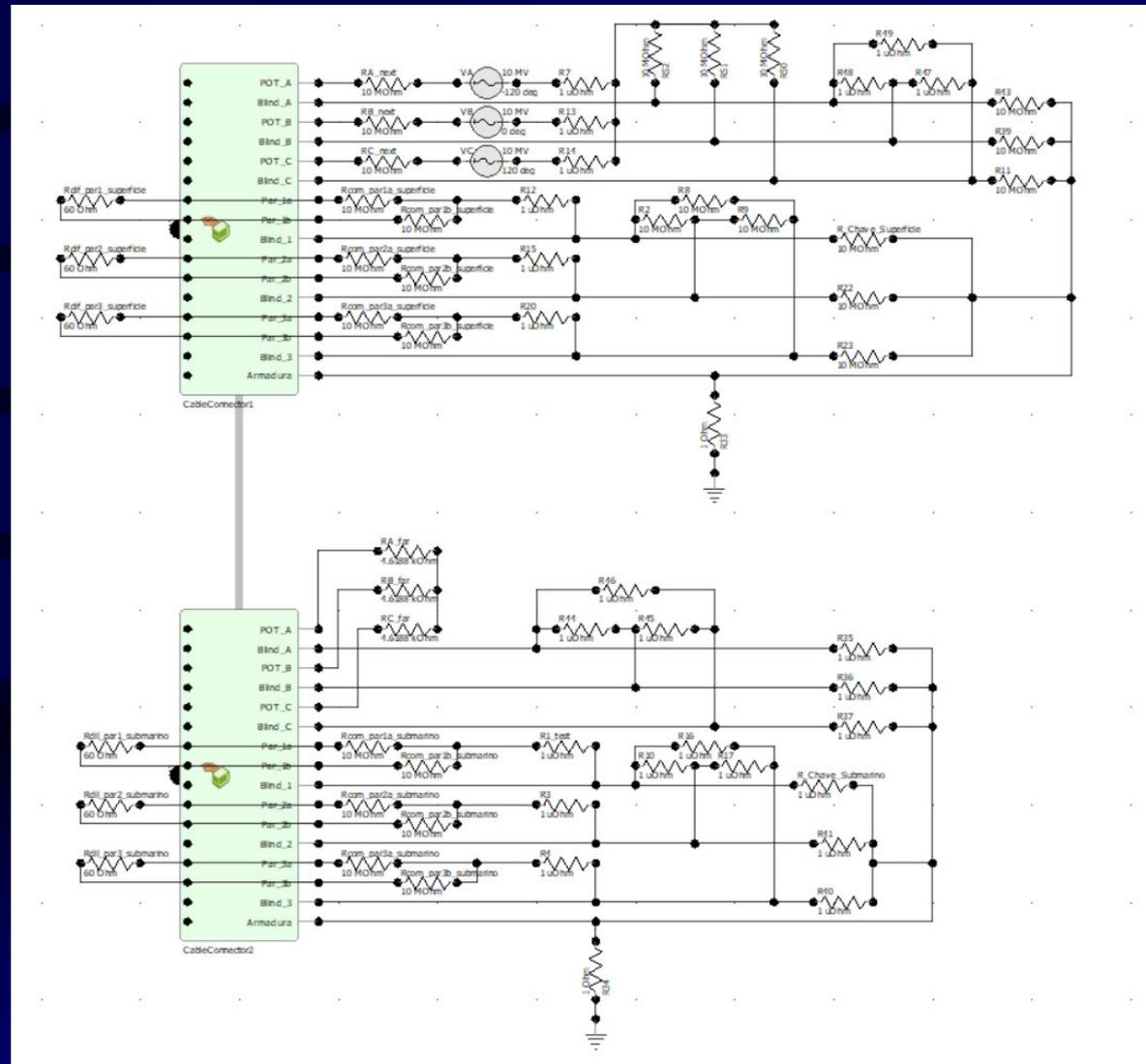
- Principal impacto no crosstalk
- trifólio solidário com controle
 - [GEOMETRIA jubarte_2022-05-15_08h31m15.mp4](#)
- Trifólio girando em relação a controle
 - [GEOMETRIA Caso3_2022-05-13_23h26m28.mp4](#)
- Diferença de duas a três ordens de grandeza!

Representação esquemática do circuito Feko

- Feko requer conexões de impedâncias somente entre entes geométricos contíguos (ex.: par / blindagem do controle)

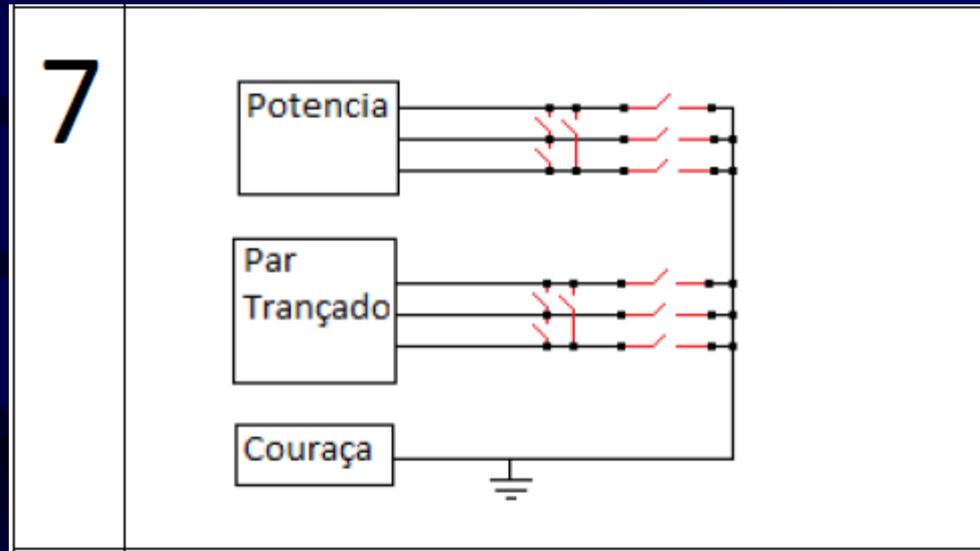


Representação esquemática do circuito no ambiente Feko

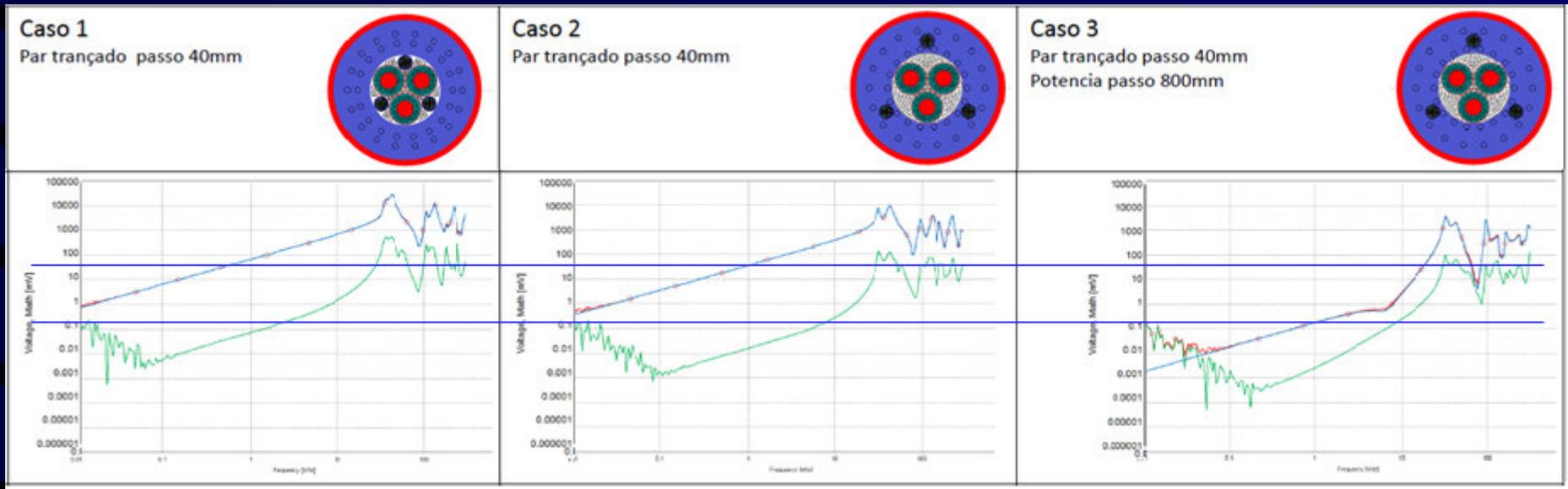


Giro com blindagens abertas

- Conexões das blindagens - abertas



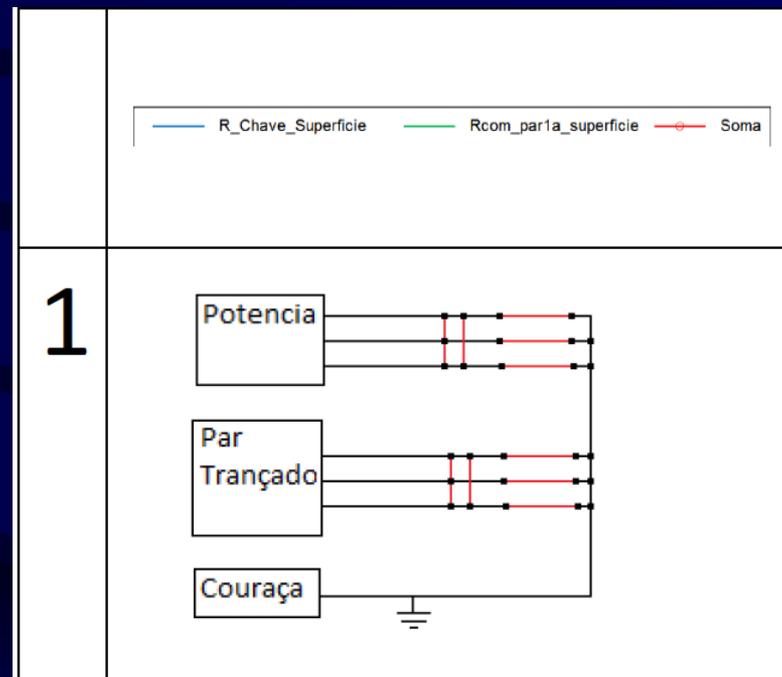
Giro com blindagens abertas



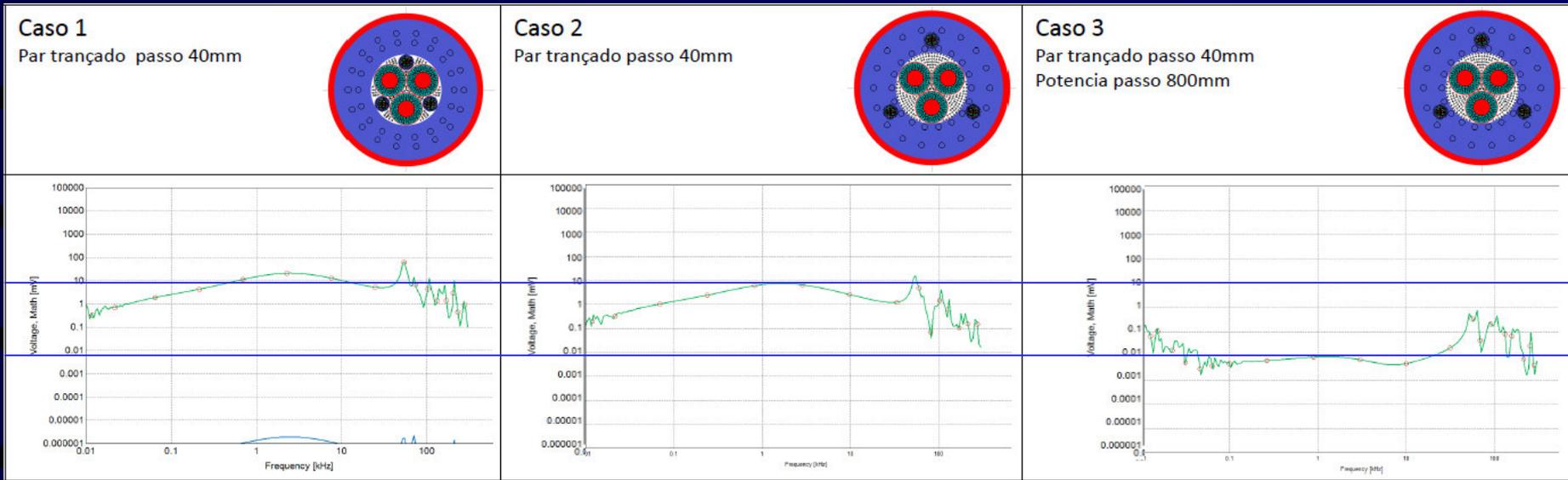
- Diferença de 300x em 1 kHz na tensão de modo comum!

Giro com blindagens interligadas

- Blindagens com pontas interligadas e aterradas



Giro com blindagens interligadas



- Diferença de 900x em 1 kHz na tensão de modo comum!
- Girar o setor do trifólio em relação ao setor dos pares de controle é o maior impacto na redução de crosstalk, com ou sem blindagens interligadas

Tratamento das blindagens

- Blindagens interligadas reduzem crosstalk para frequência mais altas, iniciando ~ 120 Hz
- Precisa considerar riscos de sobreaquecimento para os casos de curto-circuito quando estão interligadas ou de sobretensão quando estão abertas
- A impedância vista pelo inversor e as perdas também são afetadas pelas interligações

Outros fatores que afetam crosstalk

- A literatura aponta que variações de posição e de passo devido à variabilidade das máquinas de trefilação dos cabos elétricos poderia influir no crosstalk.
- Foram realizadas simulações onde constatou-se que estas variações tem baixo impacto para cabos longos, com muitas hélices. São mais relevantes para cabos curtos usados em telecomunicações.
- Variações de propriedades devido a temperatura e frequência afetam igualmente todos os condutores da seção, de forma que não provocam não uniformidade em cada seção específica

Outros fatores: desbalanceamento

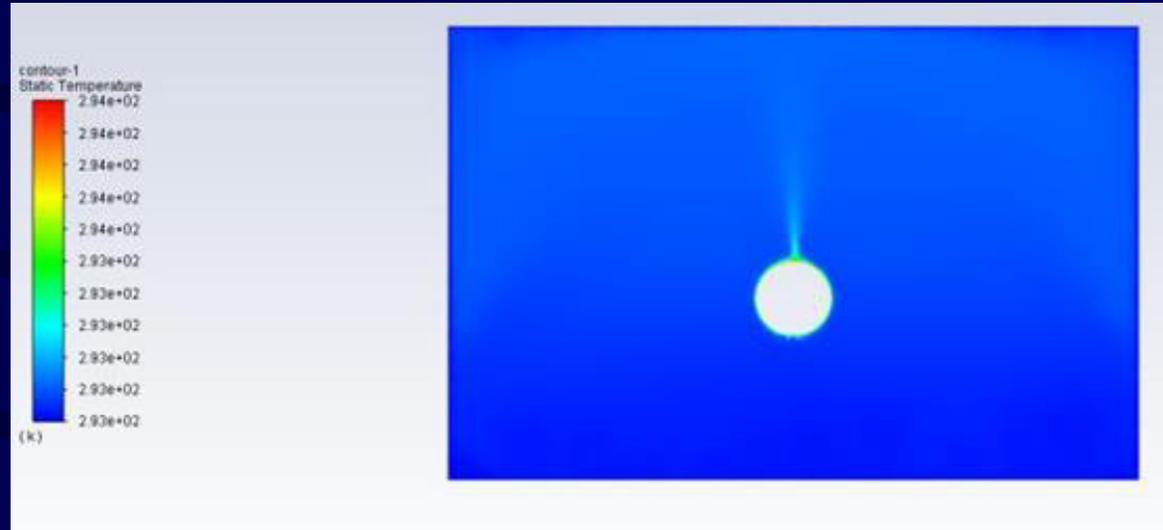
- O ambiente de pares trançados presume simetria nas impedâncias de terminação. As normas de cabos restringem desbalanceamento capacitivo a menos de 10%.
- O desbalanceamento converte tensão de modo comum para o modo diferencial. Como a tensão de modo comum costuma ser mais alta que a diferencial este desbalanceamento deve ser prevenido
- Esta prevenção consiste em cuidar para que as impedâncias de modo comum na interface dos transceptores nas duas pontas dos cabos sejam balanceadas

Aquecimento - modelo térmico

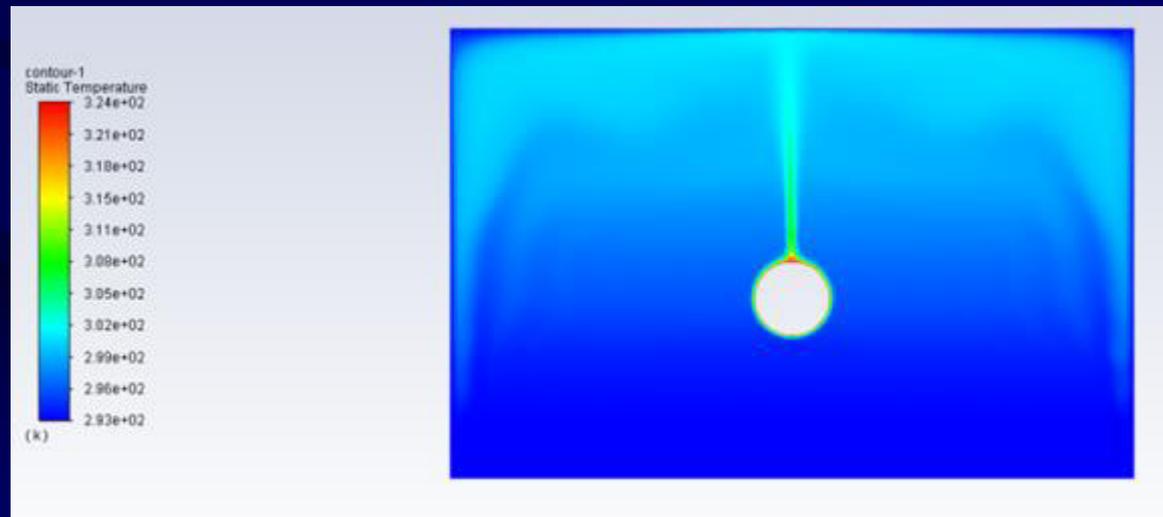
- O controle da temperatura máxima de operação do material isolante é crítico para a vida útil do umbilical
- Modelo multifísico, as propriedades elétricas dos materiais variam com a temperatura.
- A troca de calor com a água ou com o ar foram modelados com um coeficiente de convecção que depende da temperatura, obtido por simulação do umbilical na água e no ar usando modelo no software Fluent da Ansys.
- Simulação no domínio do tempo até indicação de estabilização de temperatura – dezenas de horas

Aquecimento - modelo térmico

- Convecção natural na água

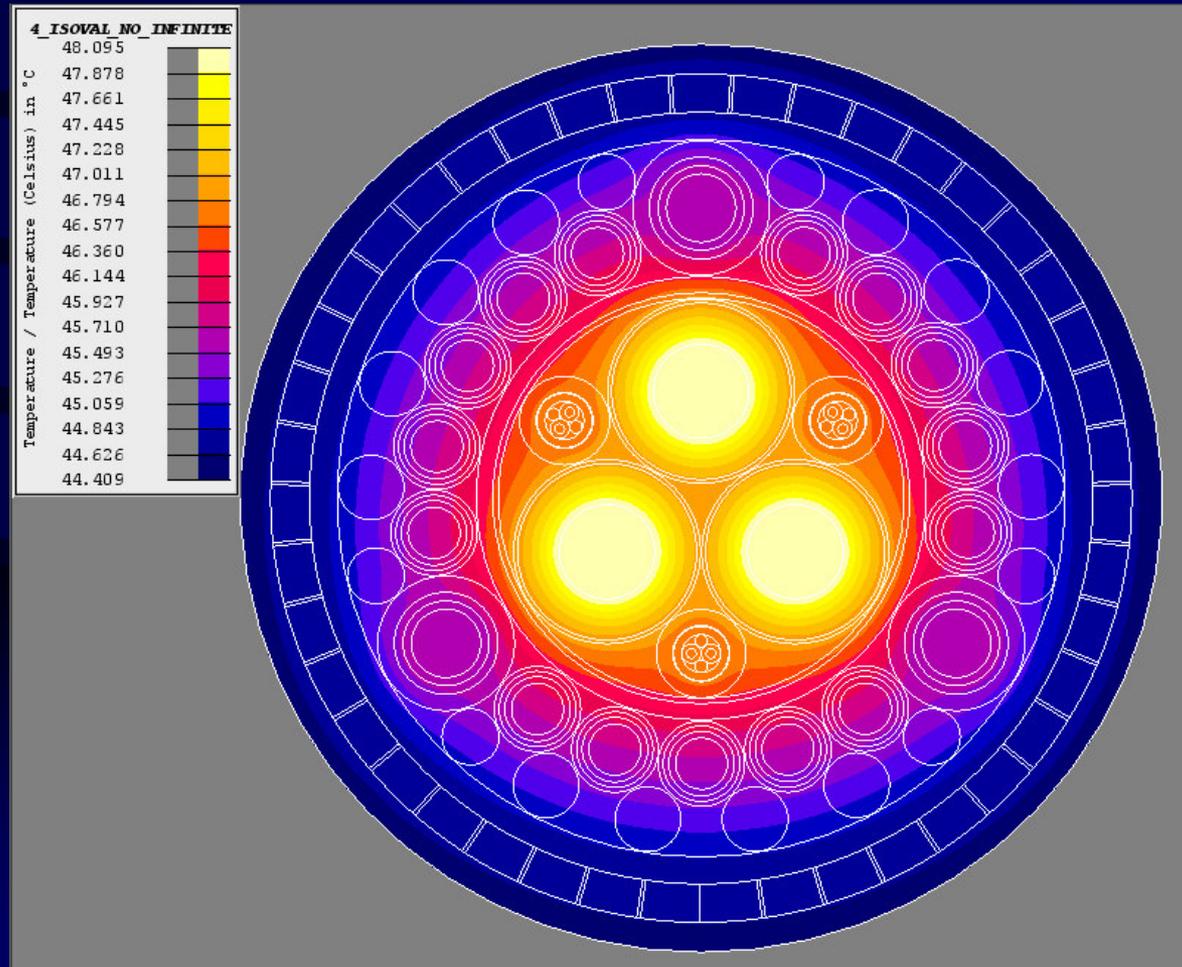


- Convecção natural no ar



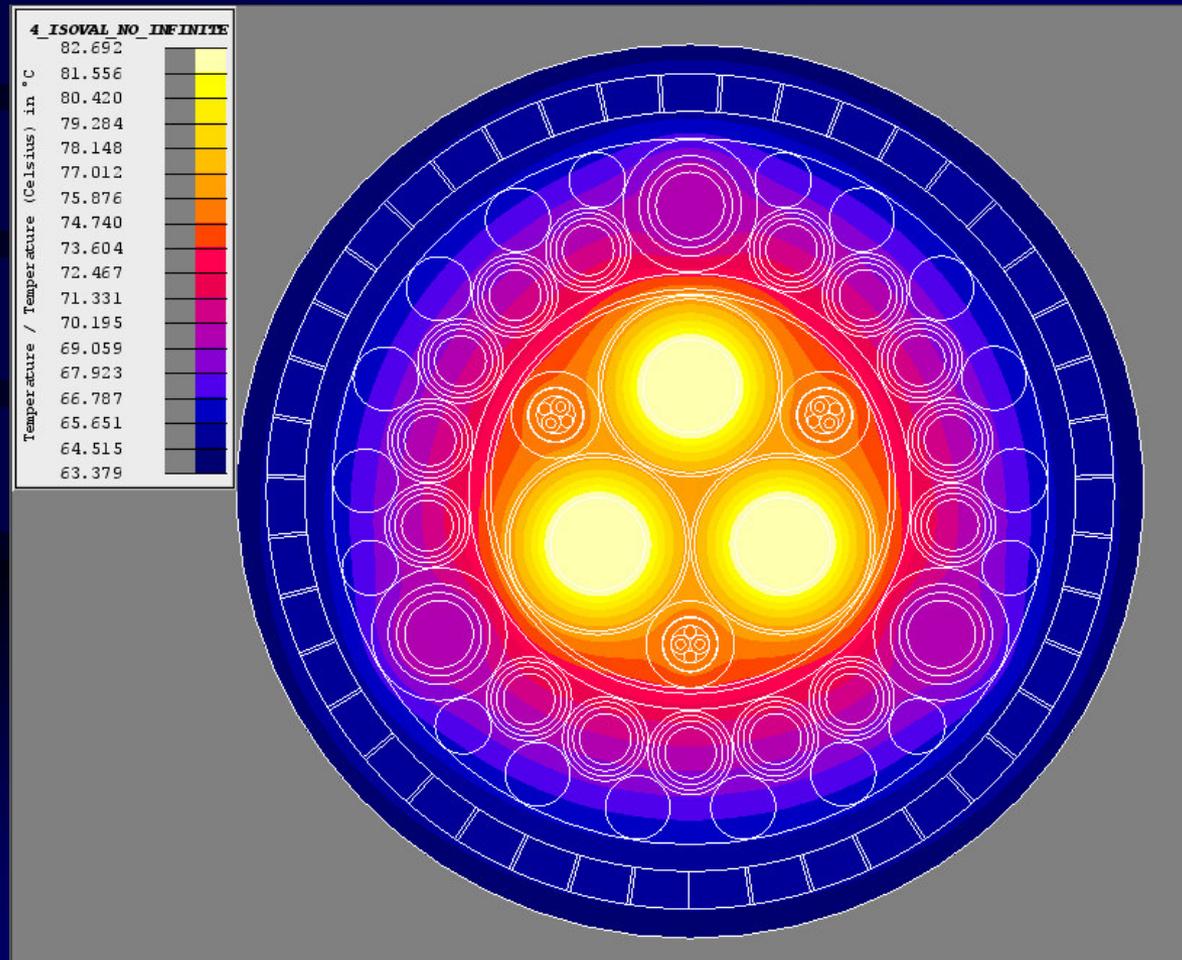
Modelo elétrico – térmico Flux

- Aquecimento no ar a 37 °C com 200 A – isolante com 48°C , próximo a estabilização



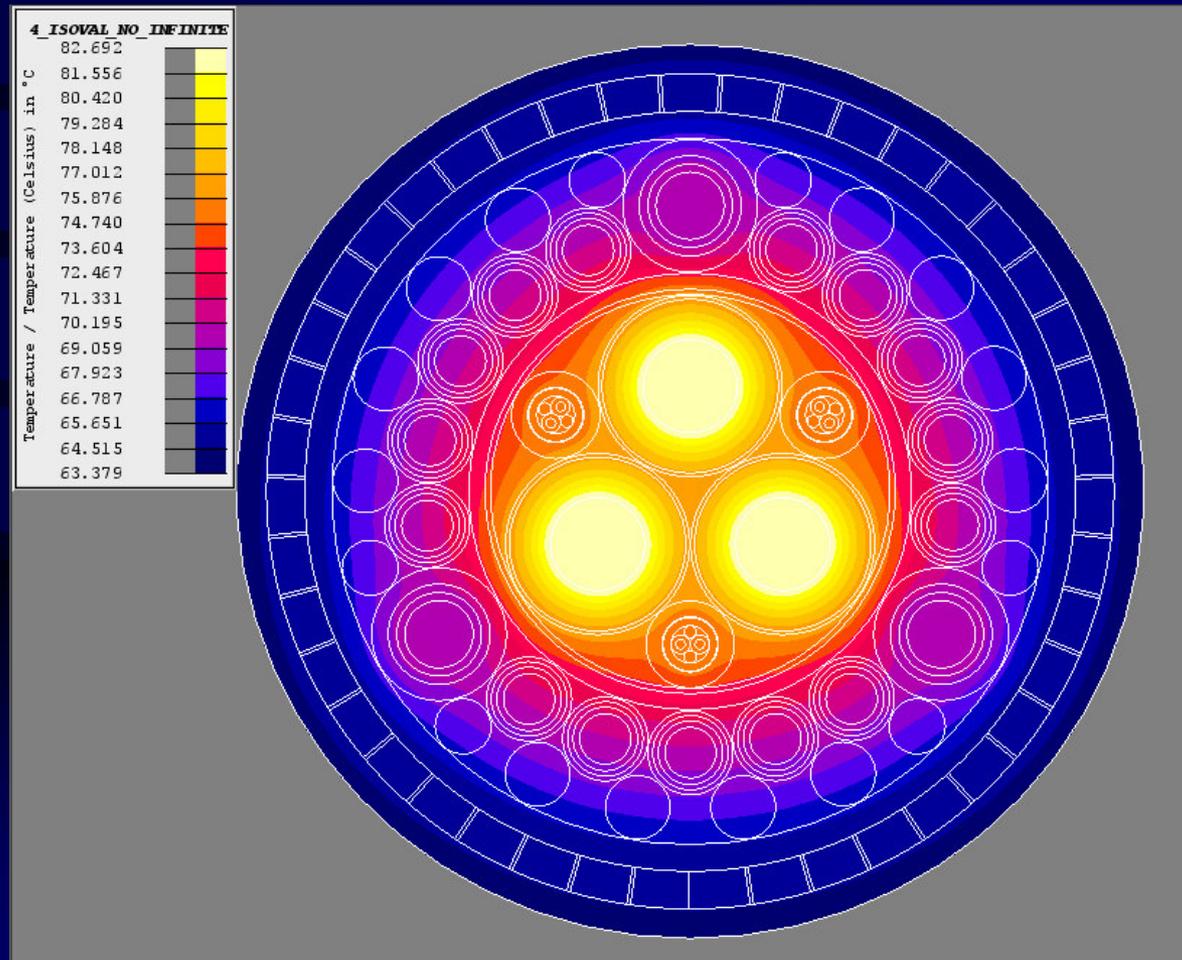
Modelo elétrico – térmico Flux

- Aquecimento no ar a 37 °C com 428 A – isolante com 82,7 °C , próximo a estabilização



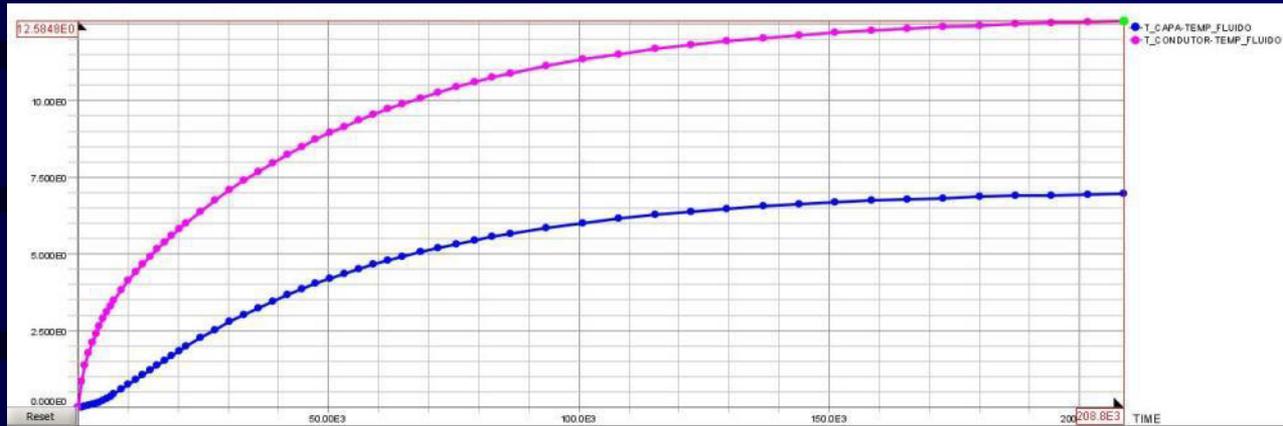
Modelo elétrico – térmico Flux

- Aquecimento na água a 11 °C com 520 A – isolante com 39,9 °C , próximo a estabilização

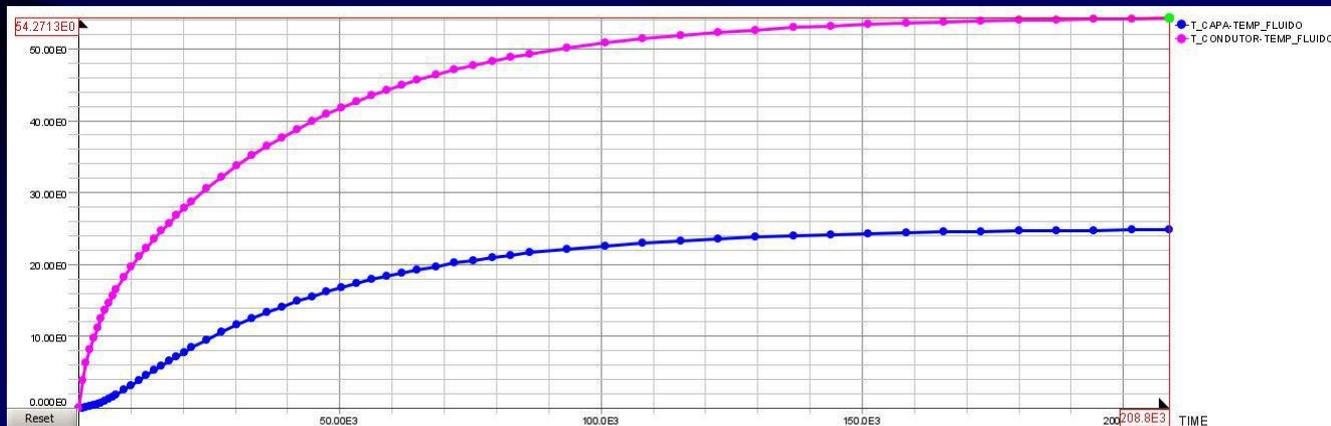


Resultados térmicos

- Ar a 37 °C com 200 A – temperatura final no isolante com 49,6 °C (folha de dados = 48 °C)

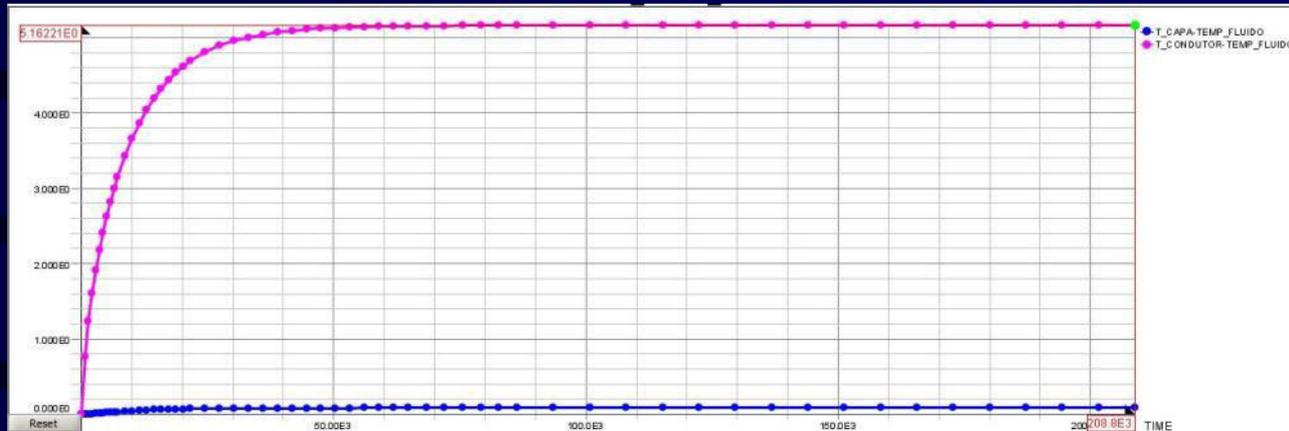


- Ar a 37 °C com 428 A – temperatura final no isolante com 91,3 °C (folha de dados não cita). Máximo para EPR é de 90 °C

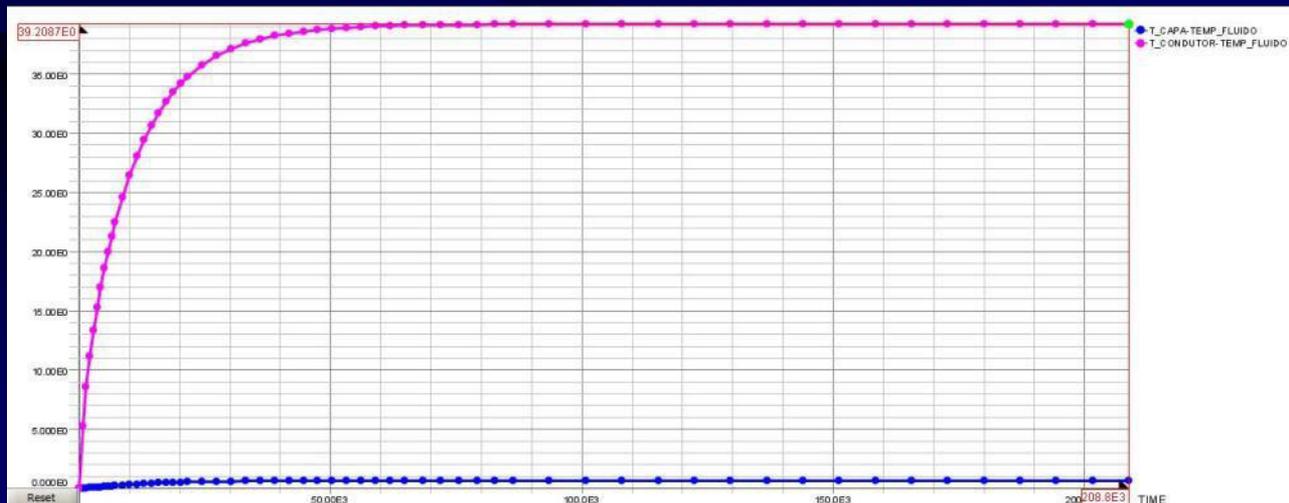


Resultados térmicos

- Água a 11 °C com 200 A – temperatura final no isolante 16,2 °C (folha de dados não cita)

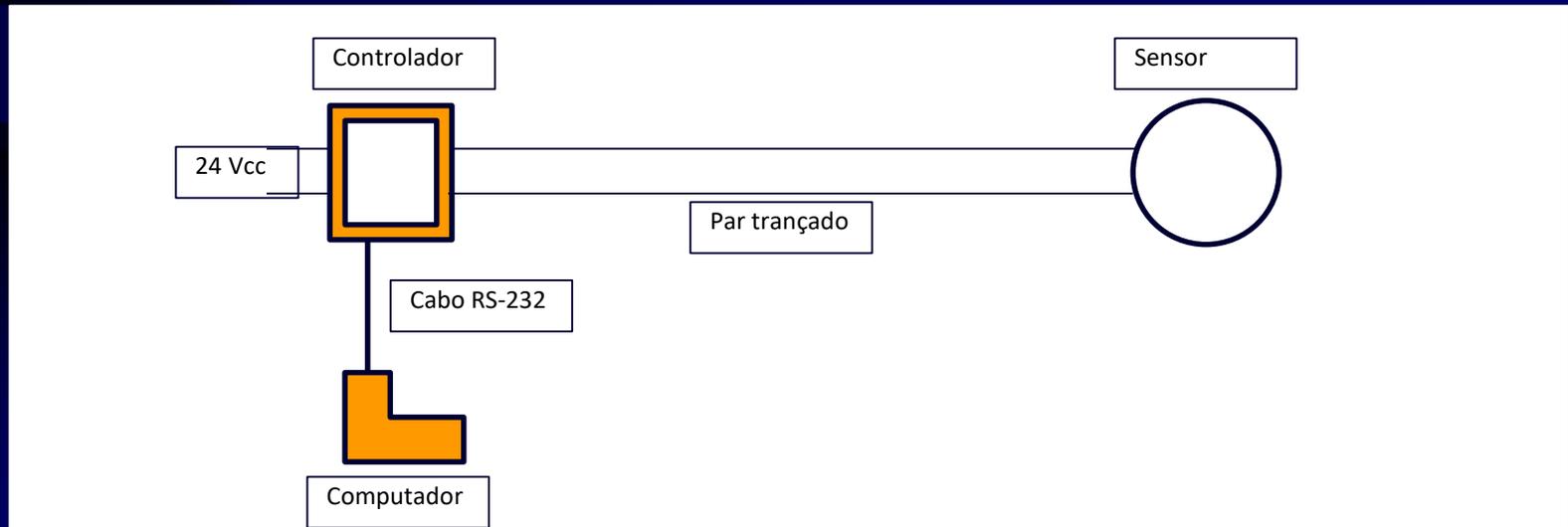


- Água a 11 °C com 520 A – temperatura final no isolante 50,2 °C (folha de dados não cita)



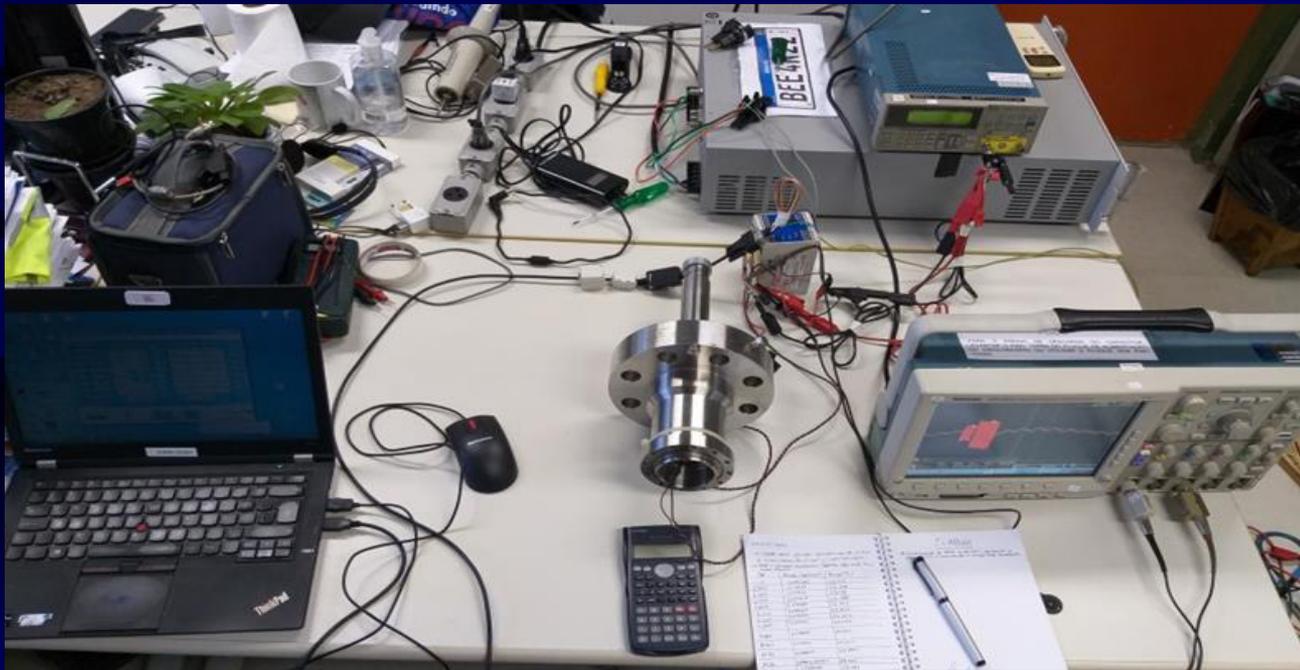
Sensor TPT e transceptor

- Necessário definir imunidade – resistência a ruídos elétricos – do sensor TPT e transceptor TMC associado
- Documentação não cita números de CEM – compatibilidade eletromagnética - emissão e de imunidade
- Equipe Petrobras do projeto instruiu o IPT para montagem de arranjo de bancada de testes



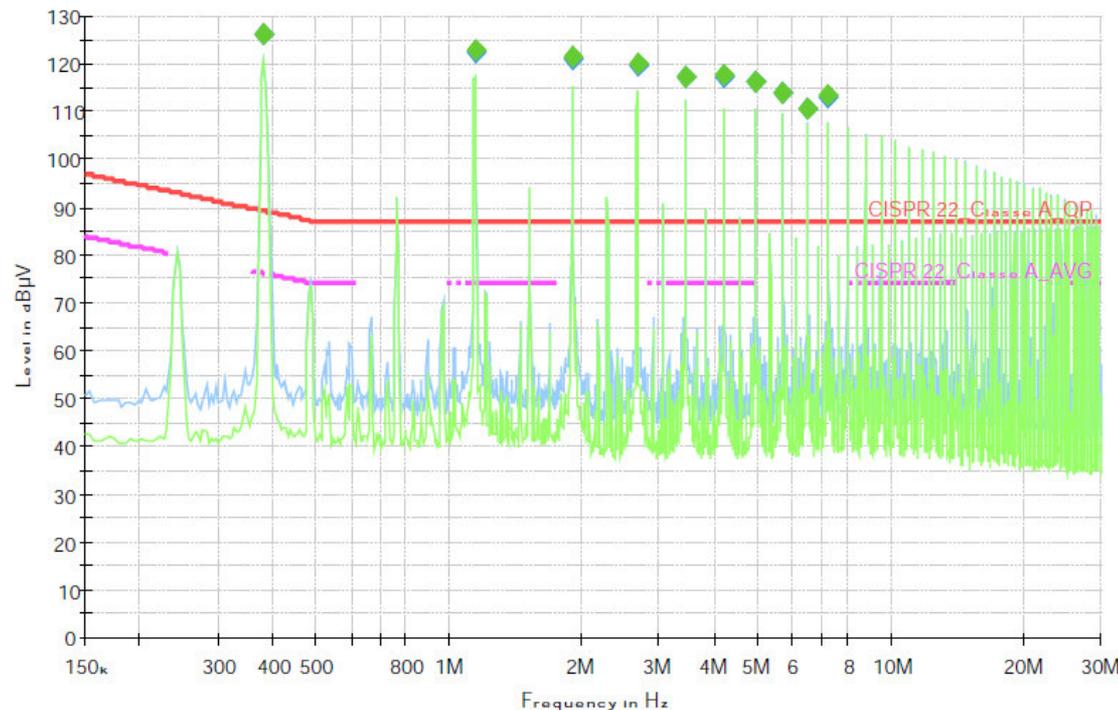
Sensor TPT e transceptor

- Operação inicial da bancada difícil – travamento do computador



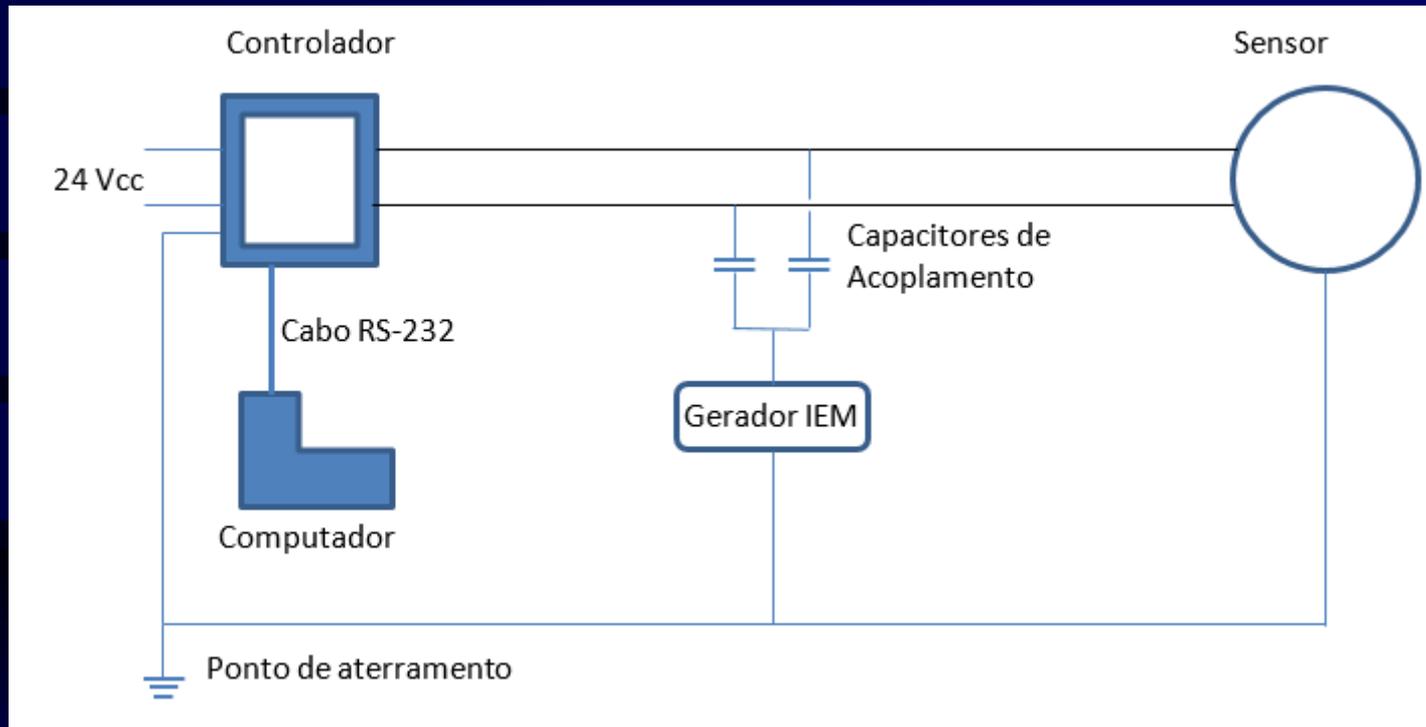
Sensor TPT e transceptor

- Medição no laboratório de CEM mostrou que o transceptor TMC emitia ruído eletromagnético 50,1 dB acima do limite permissível, ou 319x em escala linear. Problema foi resolvido com uso de ferrites nos cabos de comunicação com o PC.



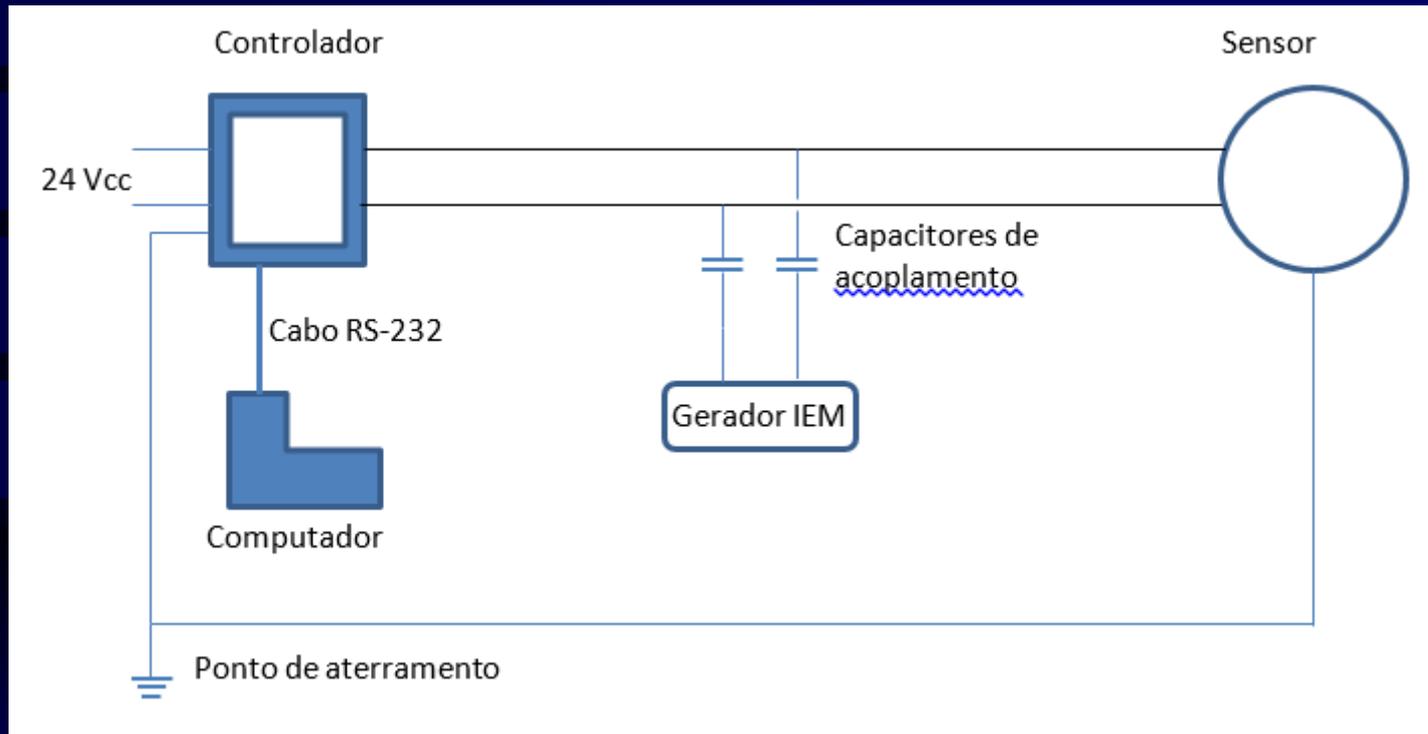
Injeção de ruído

- Modo comum



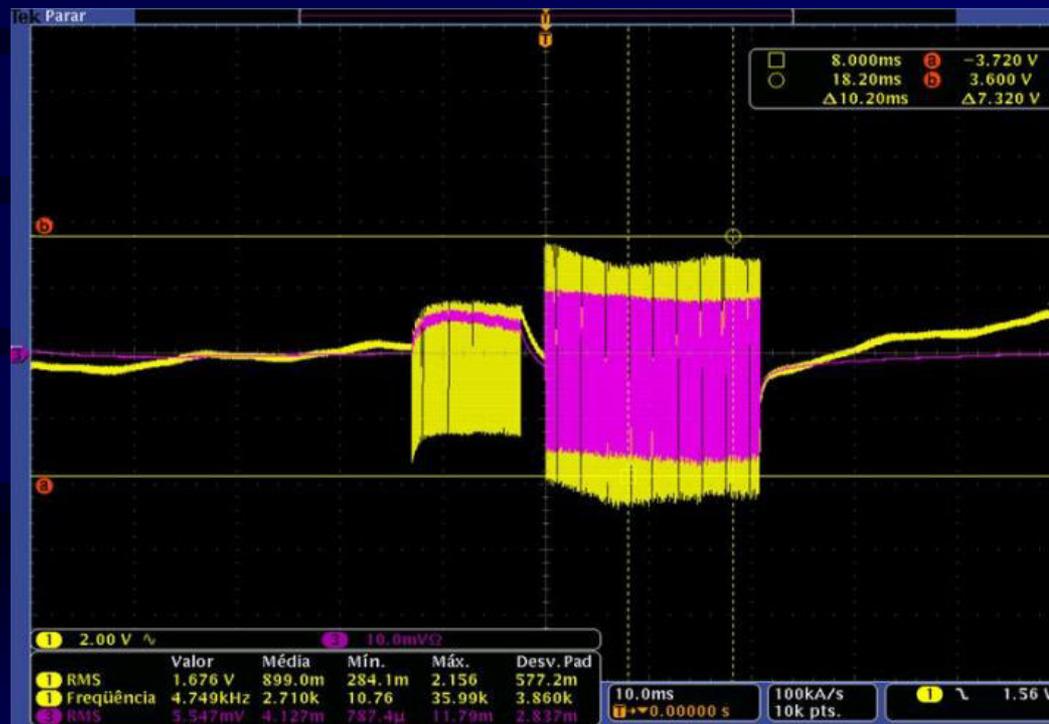
Injeção de ruído

- Modo diferencial



Comunicação ModBus – 9,6 kbs

- Canal amarelo : tensão diferencial no par
- Canal magenta : corrente diferencial no par



- Varredura de frequência entre 10 Hz e 100 kHz

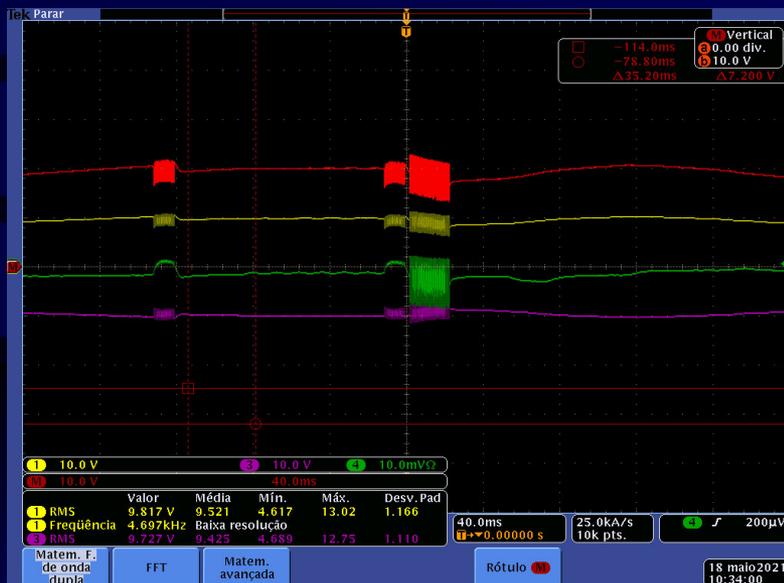
Resultados testes CEM modo comum

- Entre 10 Hz e 10 kHz
 - Não houve falhas de comunicação importantes com nível de modo comum de até 20 V
- Entre 10 kHz e 100 kHz
 - A partir de 30 kHz e ~14 V houve falhas na medida dos parâmetros (temperatura e pressão) embora os pacotes de comunicação parecessem íntegros
 - A partir de 50 kHz houve piora com falha no pacote de resposta do TPT
 - A partir de 60 kHz houve interrupção total da comunicação

Resultados testes CEM modo comum

- 50 kHz

- 60 kHz



Resultados testes CEM modo diferencial

- Entre 30 Hz e 10 kHz
 - Não houve falhas de comunicação com nível de modo diferencial de até 1 V. Este valor é o básico de imunidade e o máximo que o arranjo do laboratório permite
 - Na frequência de 9,6 kHz e em valores próximos houve interrupção dos pacotes para tensões de teste entre 0,4 V e 1,0 V
- Teste em 60 Hz – maior tensão disponível
 - Houve falhas eventuais de comunicação com nível acima de 10 V. Ressalta-se que este valor é elevado para ruído diferencial



Resultados testes CEM modo diferencial

- Entre 10 kHz e 100 kHz
 - Houve falhas de comunicação a partir de 0,4 V em 10 kHz, e, aumentando a frequência até 100 kHz, o nível de imunidade cai até 0,16 V
- Forma de onda em 40 kHz



Comparação com simulação - CEM

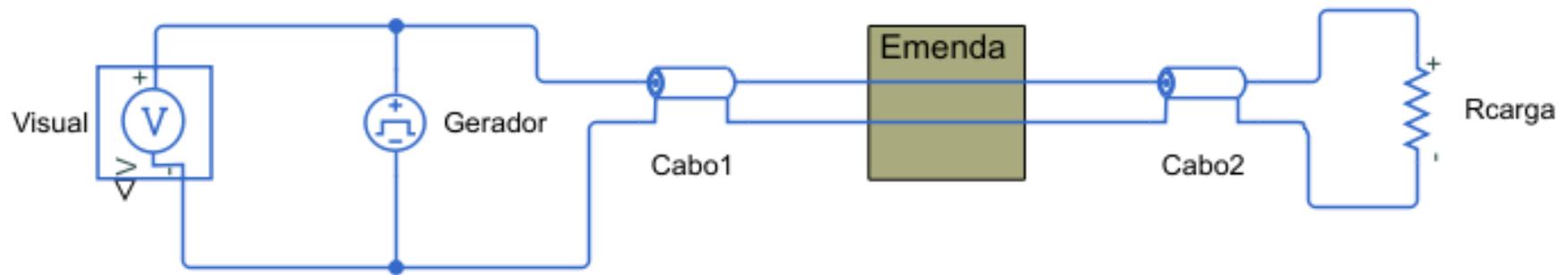
- A comparação deve ser feita com cuidado pois o conteúdo espectral da tensão de saída do inversor de potência não é conhecido, e esta será a origem principal das interferências.
- É possível avaliar que, na frequência fundamental do inversor, entre 10 e 80 Hz, não se espera que haja interferência no sistema sensor / transceptor
- Nas faixas de frequências mais elevadas, associadas a harmônicos provocados pela carga não linear ou pela fundamental do PWM será necessário levantar o conteúdo harmônico do inversor sob carga.

Investigar preliminar de detecção de defeitos

- É desejável uma técnica para localizar defeitos ou, ainda melhor, detectar as condições que antecedem um defeito.
- Estas técnicas são conhecidas como DIF - detecção e isolamento de falhas
- A literatura recomenda pra as condições do umbilical (acesso apenas por uma ponta do umbilical e existência de derivações) a técnica de refletometria

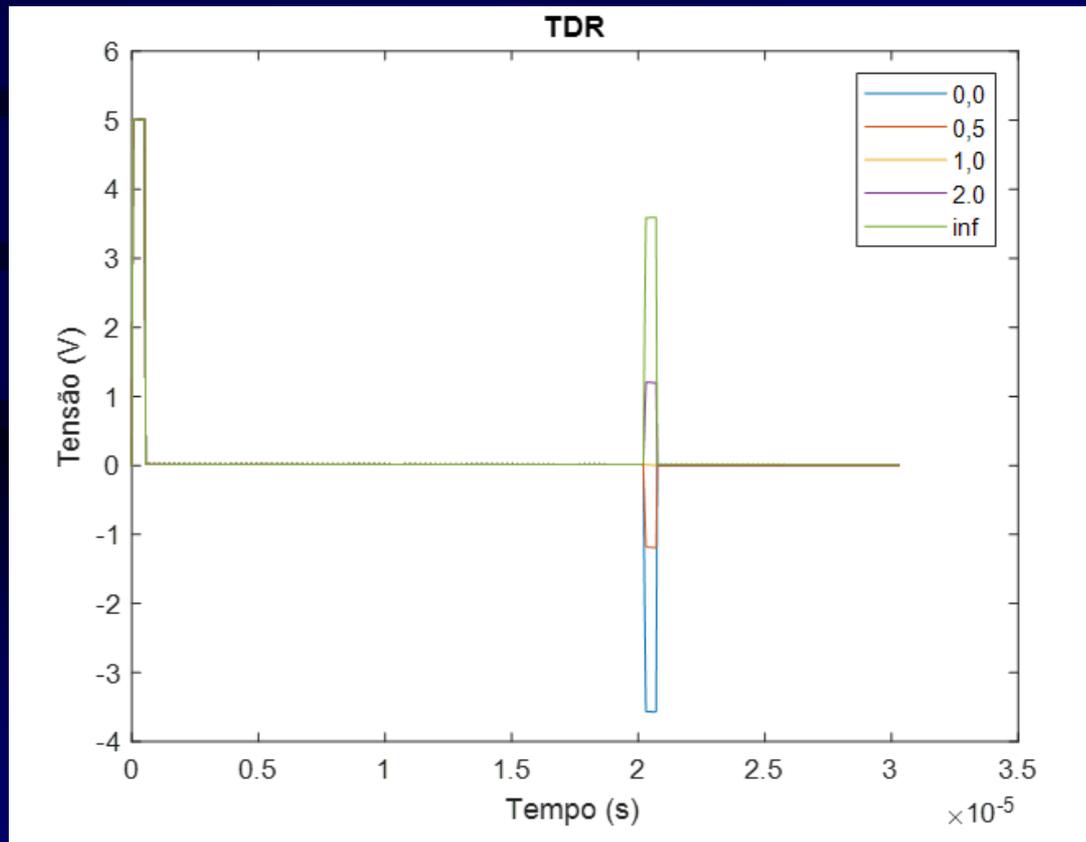
Refletometria

- Há duas formas básicas de refletometria, a mais conhecida é a TDR (time domain reflectometry), no domínio do tempo, houve desenvolvimentos mais recentes em FDR (frequency domain reflectometry) e formas mistas



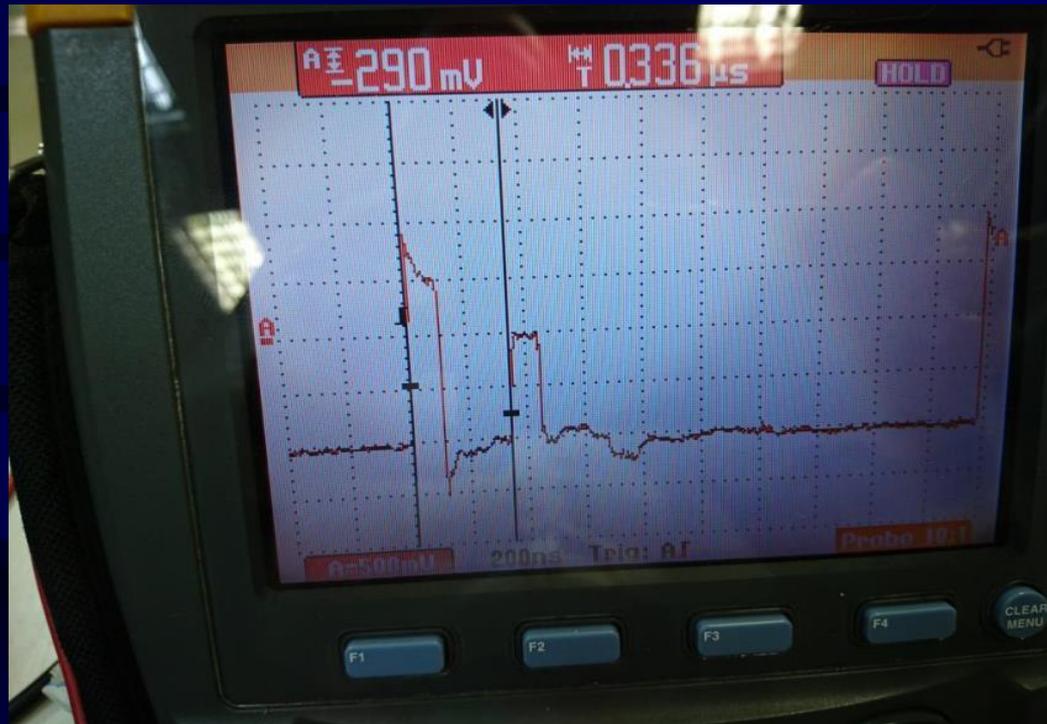
Refletometria

- A figura abaixo mostra uma simulação TDR com a impedância da carga variando de curto-circuito (zero) a aberto (infinito), resultando em fator de reflexão variando de -1 a 1, passando por zero na carga casada



Teste preliminar

- Mesmo cabo usado para verificar a extração de parâmetros dos softwares de simulação foi utilizado. 33 metros de cabo par trançado modbus blindado em aberto



- Atenuação da resposta é o problema, 1,5 vezes em apenas 33 metros de cabo. Viável somente até centena de metros

Equipamentos especializados comerciais

- Identificamos uns poucos modelos que os fabricantes declaram alcance da ordem de quilômetros
 - Cable Guardian da Viper Innovations
 - Tronic da C-Kore
- Recomendável teste nas condições reais, o grau de dificuldade é alto devido à grande atenuação e a presença de ruído elevado

Conclusão

- Projeto atingiu seus objetivos principais;
- Ausência de testes em amostra de umbilical foi compensada parcialmente com testes no cabo de controle modbus;
- Principal recomendação demonstrada é que o setor do trifólio gire em relação ao setor dos cabos de controle;
- Cuidados com balanceamento de carga e simetria na construção
- Desempenho térmico consistente com documentação, ressalta-se grande diferença de capacidade entre ar e água;
- Transceptor TCM precisa ser melhorado em relação a CEM;
- Projeto proporcionou duas publicações em congresso e uma dissertação de mestrado em andamento (atrasos pandemia).

Equipe

- IPT
 - Eng^o Eletricista Dr. Mário Leite Pereira Filho
 - Eng^o Eletricista Marcelo Sanches Dias
 - Eng^o Eletricista Kleber Jesus de Oliveira
 - Eng^o Eletricista Lucas Yukio Nascimento Matsukuma
 - Técnico Eletricista Mário Fernando Barbosa
- PETROBRAS
 - Eng^o Eletricista Dr. José Carlos Leao Veloso Silva
 - Eng^o Eletricista Raphael de Miranda Negri

Obrigado pela atenção!

Mário Leite Pereira Filho
mleite@ipt.br



Seu desafio é nosso!