



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

BR/GDS/20  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS**

**INTERFERÊNCIA DE UM SISTEMA HVDC SOBRE OBJETOS NAS PROXIMIDADES (GASODUTO, FERROVIA E LINHAS DE TRANSMISSÃO)**

**J.A. Jardini  
R.L. Vazquez-Arnez (\*)  
FDTE**

**D. Kovarsky  
CONSULTOR**

**R.A. Haik  
IE MADEIRA**

**G. Zarpellon  
A. Saliba, A. Coan  
ABENGOA BRASIL**

**RESUMO**

Neste artigo são apresentados os resultados relacionados à interferência de um sistema HVDC, produto de faltas na linha CC, sobre objetos localizados em suas proximidades. Foram especificamente abordados o efeito da indução sobre gasodutos, ferrovias e linhas CA que cruzam a linha HVDC. A partir dos resultados obtidos considerando o efeito da linha HVDC, e do eletrodo de terra, verificou-se que os níveis de tensão induzidos sobre estes objetos não oferecem risco elevado de dano devido à corrosão (no caso da corrente pelo eletrodo) e tampouco pode haver risco elevado de choque elétrico em pessoas e animais que estiverem em contato com o objeto durante os períodos de falta na linha CC.

**PALAVRAS-CHAVE**

Acoplamento capacitivo, Curto-circuito, Gasoduto, Ferrovia, Indução eletromagnética, Sistema HVDC.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Conceitualmente, as linhas HVDC oferecem menor interferência do que os sistemas CA sobre objetos nas proximidades como ser gasodutos, ferrovias, ou outras linhas de transmissão. Uma das razões é o fato delas gerar, em regime permanente, um fluxo magnético estacionário, não induzindo tensão eletromagnética nos sistemas próximos. Outra razão é o fato das correntes de curto circuito (faltas para terra) nas linhas HVDC serem menores que no caso de linhas CA, uma vez que os controles da corrente nos conversores atuam rapidamente controlando, pelo menos parcialmente, a corrente de curto circuito. Atualmente, existem algumas referências abordando este problema, algumas delas pioneiras no assunto. Em [1], por exemplo, apresenta-se o efeito de indução produto de faltas que ocorrem em linhas HVDC sobre cercas paralelas à mesma (linha CC). Nesta referência conclui-se que os níveis de energia associados a linhas HVDC, por causa de faltas na linha CC e que podem causar choque elétrico, são muito menores aos níveis normalmente considerados perigosos.

Estudos referentes às tensões induzidas sobre gasodutos devido à presença de linhas CA nas proximidades são apresentados em [2] e [3]. Em [4] e [10] é abordado o efeito de indução eletromagnética de linhas CA de transmissão e distribuição sobre dutos de irrigação enterrados. Em [5] e [6] apresenta-se um estudo sobre o acoplamento eletrostático entre objetos (veículos e outros) localizados próximos a linhas CA bem como problemas associados a correntes induzidas por linhas de transmissão. Estudos referentes ao risco devido a choques de curta duração gerados por sistemas CA e equipamentos energizados é apresentado em [7]. Em [8] e [9] apresenta-se uma avaliação sobre as implicações para a saúde por causa da presença de linhas de transmissão HVDC sobre pessoas que residem na proximidade de sistemas HVDC. Uma avaliação teórica sobre o potencial da superfície do solo, quando o sistema HVDC opera com retorno pela terra é apresentado em [11]. Por outro lado, em [12] apresenta-se, entre outros aspectos, um estudo sobre a influência mútua entre dois eletrodos de terra vizinhos de uma linha CC. Em [13] apresenta-se uma análise sobre o efeito de interferência produzido por um sistema HVDC, em regime permanente, sobre uma linha telefônica.

Neste artigo apresenta-se um estudo sobre a interferência (indução) de um sistema bipolar HVDC sobre dutos,

(\*) R. Cap. Otavio Machado, n° 525 – CEP 04718-000 São Paulo, SP – Brasil  
Tel: (+55 11) 2528-3666 – Fax: (+55 11) 2528-3666 – Email: rarniez@fdte.org.br

ferrovias e linhas CA que cruzam a linha CC, durante períodos de falta. Ressalta-se que é justamente nestes períodos quando ocorrem os níveis de interferência mais preocupantes. Outro aspecto de interesse foi o aparecimento de tensões CC sobre objetos durante a operação monopolar do sistema HVDC. O estudo aqui apresentado, cujos resultados fizeram parte da aprovação do cruzamento da linha CC com objetos, está relacionado ao novo sistema HVDC atualmente em construção (Porto Velho - Araraquara) composto de dois bipolos cada um de aproximadamente 2500 km.

## 2.0 - INTERFERÊNCIA DA LINHA HVDC COM OBJETOS NAS PROXIMIDADES

Foram consideradas três condições principais: (i) tensões de acoplamento durante operação normal e durante períodos de falta na linha CC, (ii) tensões no objeto devido ao fluxo de corrente pelos eletrodos (operação monopolar com retorno pela terra) e, (iii) tensões induzidas devido ao efeito eletromagnético por causa do conteúdo harmônico presente na corrente CC. Os principais aspectos a serem considerados são: a possibilidade de choque elétrico devido à tensão de toque ou de passo, no primeiro caso, e o efeito da corrosão, no segundo caso.

Quanto ao choque elétrico, que pode ameaçar a integridade de pessoas e animais, deve-se ressaltar que o nível de tolerância destes (seres) é maior para CC do que para CA. Isto significa que no caso de sistemas CC a corrente mínima perceptível é maior.

Assim, torna-se necessário examinar estas interferências sob os seguintes aspectos:

- *Efeito de acoplamento capacitivo*, no qual, caso o objeto esteja aterrado, não haverá tensão de acoplamento.
- *Efeito de acoplamento indutivo*. Pelo fato do campo magnético ser estacionário ( $f=0\text{Hz}$ ) praticamente não haverá tensões induzidas sobre o objeto. Durante o período transitório (ocorrência de curto-circuitos) a corrente na linha HVDC aumenta, voltando a zero depois de um tempo finito graças aos controles estabelecidos nos conversores. Como esta componente de corrente varia no tempo ( $di/dt \neq 0$ ), induzirá correntes transitórias no objeto próximo. Serão também analisadas as tensões induzidas produto do conteúdo harmônico presente na corrente CC.
- *Efeito devido ao aumento do potencial na terra*. Este efeito é devido a faltas na linha CC bem como a correntes nos eletrodos de terra.
- *Sobretensões devido à ocorrência de curto-circuitos (início da falta) na linha CC* [1]. No instante em que ocorre o curto-circuito aparecem sobretensões que rapidamente viajam pela linha CC refletindo-se em suas extremidades e induzindo tensões transitórias no objeto. A simulação destas ondas trafegantes requer de um modelo apropriado do sistema HVDC (conversores e linha) assim como dos objetos na vizinhança.

### 2.1 Dutos que Cruzam a Linha CC

Estes objetos podem estar situados sob o solo ou na superfície. Podem conter uma camada isolante (por exemplo, betume ou polietileno), juntas isolantes (é o caso de gasodutos e oleodutos) ou não ter nenhum destes materiais (é o caso de dutos de água). Entre as consequências dessas induções de tensão no gasoduto estão:

- Ruptura da isolamento, devido à operação em regime permanente ou transitório da linha interferente.
- Corrosão, cujo efeito é mais predominante durante a operação monopolar da linha CC (regime permanente) devido ao seu efeito cumulativo.
- Choques elétricos, devido à transferência de tensões do duto para os seres em contato com este.

De fato, quanto mais perto o objeto (duto) esteja da linha HVDC, maior será a interferência sobre este. Isto também é válido no caso dos eletrodos (operação monopolar da linha CC). Na Figura 1 mostra-se o efeito do eletrodo de terra sobre o potencial do solo. Nota-se que o potencial é maior na superfície do eletrodo propriamente dito. Os resultados dos estudos referentes ao acoplamento com ferrovias e linhas CA que cruzam a linha CC serão apresentados mais adiante.

## 3.0 - MODELAGEM DO ACOPLAMENTO ENTRE A LINHA HVDC E O GASODUTO.

O sistema HVDC mostrado na Figura 2 foi modelado considerando o valor  $di/dt$  real que pode existir assim como o acoplamento com o objeto. O seu sistema de controle (sistema HVDC) foi representado da forma clássica [14], ou seja, não foi utilizado modelo algum de qualquer fabricante em particular visto que para fins do presente estudo não é necessário o uso de modelos de controle e proteção altamente detalhados.

Nas estações inversoras a tensão é controlada através da variação do ângulo de extinção ( $\gamma$ ), enquanto que a corrente é controlada através da variação do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) nas estações retificadoras. Estes ângulos estão limitados a determinados valores mínimos pré-definidos ( $\gamma_{\min}$  nos inversores e  $\alpha_{\min}$  nos retificadores). As condições operativas nominais da linha HVDC são:  $\pm 600\text{ kV}$  e  $3.150\text{ MW}$  (isto é,  $1.575\text{ MW/pólo}$ ). Em ambos extremos do sistema HVDC foram conectadas fontes CA equivalentes. A potência de curto-circuito no lado do inversor é semelhante ao do lado do retificador. Os principais parâmetros obtidos durante as simulações (regime permanente) são os apresentados na Tabela 1.

Diferentemente de uma linha CA, durante a ocorrência de um curto-circuito, os controles do sistema HVDC identificam a variação da corrente e começam a reduzir a tensão CC, afetando (reduzindo) também a magnitude da corrente de falta. De forma simultânea, o sistema de proteção detecta a corrente de falta, por causa da variação da tensão CC, e com um atraso de cerca de 75 a 100 ms modifica o valor do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) nas estações de

envio e recepção a um valor acima de  $90^\circ$ . Isso faz com que ambas as estações passem a operar como inversoras na tentativa de descarregar a corrente de linha.

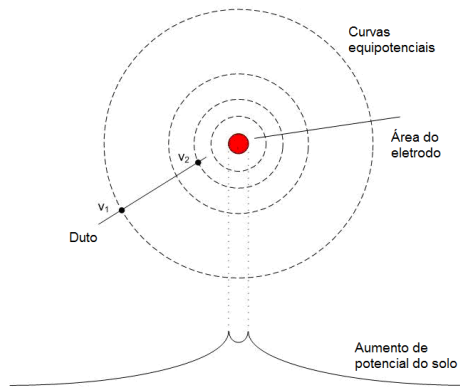


Figura 1 - Efeito do eletrodo de terra sobre a superfície do solo.

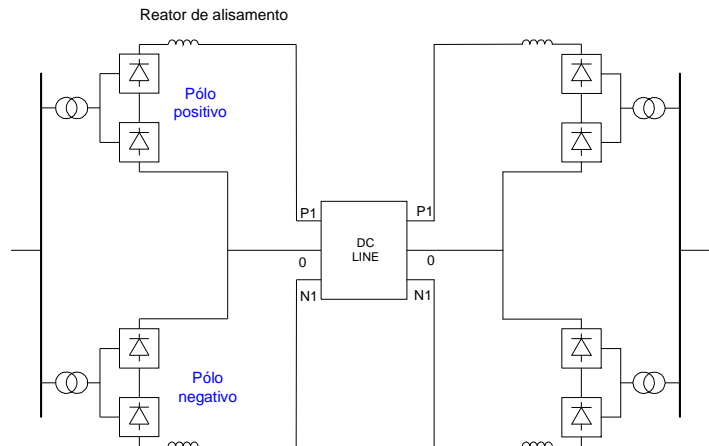


Figura 2 - Sistema bipolar HVDC montado no PSCAD/EMTDC®.

Tabela 1 – Resultados das Simulações (Regime Permanente) no sistema Bipolar HVDC Considerado

Variável	Valor
Tensão no retificador	601.0 kV
Tensão no inversor	561.3 kV
Corrente	2.6 kA
$\alpha$ retificador (Alpha)	$20.7^\circ$
$\gamma$ retificador (Gamma)	$15.3^\circ$

Na Figuras 3(a) e 3(b) mostram-se a posição da falta na linha CC, a representação dos pólos positivos e negativos, os cabos guarda utilizados nas simulações e as resistências de aterramento das torres. Na Figura 3(c) mostra-se a representação de cada um dos segmentos do gasoduto ( $INDTL_i$ ) paralelo a cada segmento de linha ( $TL_i$ ). O subscrito  $i$  representa qualquer um dos segmentos ou tensões mostradas na Figura 3. É nestes segmentos ( $INDTL_i$ ) onde serão medidas as tensões induzidas devido à variação do  $di/dt$ .

Com o objetivo de verificar o efeito devido à proximidade do objeto ao pólo positivo ou negativo será colocado um segmento específico de gasoduto (por exemplo,  $INDTL_2$ ) no meio e a determinadas distâncias (paralelas) ao centro da linha HVDC. O gasoduto cruza a linha CC a 60 km da estação inversora formando um ângulo de aproximadamente  $75^\circ$  (ver Figura 5).

O modelo foi implementado no PSCAD/EMTDC® utilizando a opção *mutual coupling* disponível na sua biblioteca. Conforme mostrado na Figura 4, o gasoduto foi modelado como um condutor oco localizado a 0,5 m do solo com um diâmetro exterior igual a 0,5 m (espessura 0,05 m). O modelamento da resistência de aterramento do gasoduto requereu das seguintes características:

- Resistividade média do solo:  $500 \Omega \text{ m}$ .
- Resistividade média da isolação:  $28.600 \Omega \text{ m}^2$ .
- Modelo com três resistências paralelas (Figura 5):
  - $50 \Omega$  no meio do gasoduto (equivale a 600 m de comprimento).
  - $20 \Omega$  em cada extremidade do gasoduto (cada resistência representando aproximadamente 1,5 km).

A diferença de tensão entre as extremidades do objeto (pontos A-B na Figura 5.) representa a tensão induzida longitudinal sobre o gasoduto, enquanto  $E_{coupl,i}$  representa a tensão para terra do objeto. Cada um dos segmentos representando o gasoduto tem um comprimento de 20 m (Figura 5). Inicialmente, assume-se que o curto circuito (aplicado em  $t=1,0\text{s}$  e removido após 100 ms) ocorre no pólo negativo da linha HVDC. Curto-circuitos ocorrendo no pólo positivo foram também simulados.

### 3.1 Tensão Induzida devido ao Acoplamento Harmônico

Em regime permanente, além da corrente contínua, circularão na linha HVDC harmônicos sendo maior o  $12^\circ$ . Os filtros CC reduzem a amplitude destes harmônicos na linha, porém deve-se verificar o efeito destas correntes do ponto de vista de indução, embora se possa prever que sejam de pequena monta visto o valor da amplitude dos harmônicos. Na Figura 6 mostra-se a tensão induzida longitudinal ( $E_{a2}$ ) sobre o segmento de 20 m (no gasoduto) quando este está localizado no meio da linha. Observa-se que o valor médio da tensão, devido especificamente à ondulação (*ripple*) em regime permanente, é de aproximadamente 1,25V. Conforme este segmento ( $E_{a2}$ ) é deslocado para qualquer lado da linha CC as tensões induzidas diminuem.

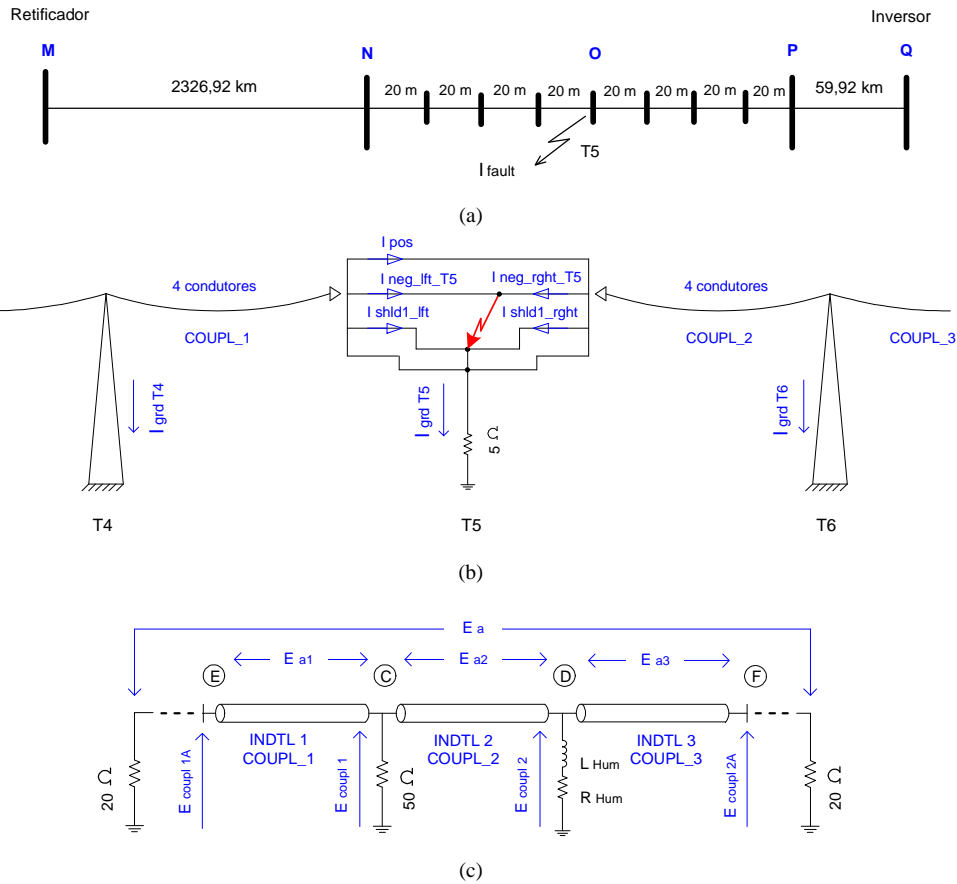


Figura 3 - (a) Representação da linha DC com o ponto em falta, (b) correntes envolta do ponto em falta na torre  $T_5$ , (c) representação dos segmentos  $C-D$  (em baixo da LT),  $E-C$  (à esquerda da LT) e  $D-F$  (à direita da LT).

### 3.2 Tensão induzida devido à ocorrência de faltas

Na Figura 7 mostram-se as correntes medidas em volta do ponto em falta (vide Figura 3b). Observa-se que as contribuições de corrente de falta no pólo negativo ( $I_{neg\_lft\ T5}$  and  $I_{neg\_right\ T5}$ ) são maiores às do pólo positivo ( $I_{pos}$ ). Nota-se ademais que a falta (linha-terra) ocorre na torre T<sub>5</sub>. Mostra-se também a corrente de falta pelas torres adjacentes ( $I_{grd\ T4}$  and  $I_{grd\ T6}$ ).

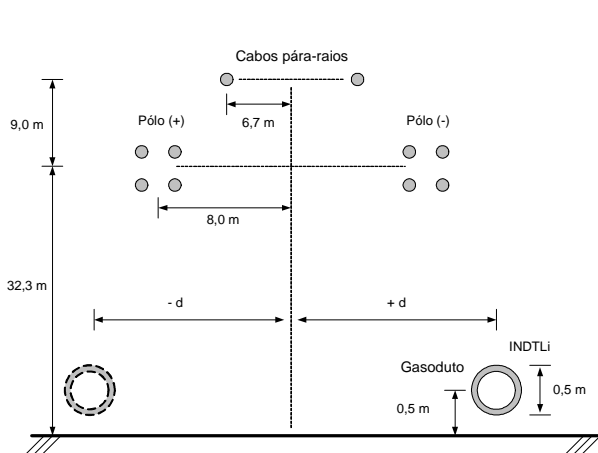


Figura 4 - Geometria dos condutores na linha CC e posição do gasoduto.

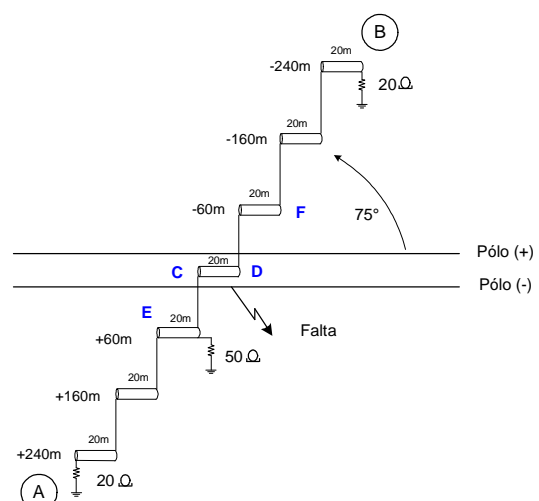


Figura 5 - Representação do gasoduto e linha HVDC.

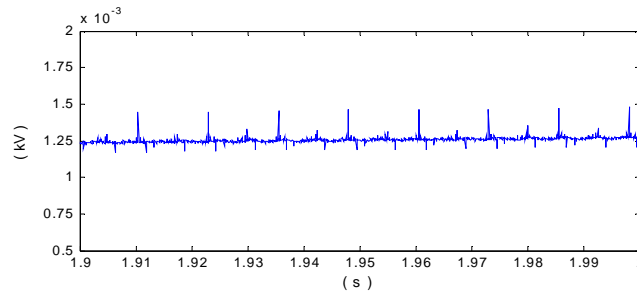


Figura 6 - Tensão induzida ( $E_{a2}$ ) em regime permanente ( $d=0$  m).

Nas Figuras 8 e 9 mostram-se as tensões longitudinais (valores máximos) e as tensões do gasoduto para terra, respectivamente. A tensão longitudinal entre os pontos de  $E-C$  ( $E_{a1}$ ) é  $\leq 0,7$  kV. As tensões longitudinais entre os pontos de  $C-D$  e  $D-F$  ( $E_{a3}$ ) são  $\leq 8,11$  kV. Lembra-se que o segmento  $C-D$  encontra-se bem no meio e debaixo da linha CC. A tensão longitudinal (valor de pico) entre os pontos  $A-B$  (Figura 5) é 0,15 kV (valor absoluto). Quanto aos valores de tensão do gasoduto para terra mostrados na Figura 9, estes apresentam valores inferiores a 0,7 kV com exceção do ponto  $D$  ( $E_{coupl2}$ ) que tem um valor de pico igual a 8,12 kV. A onda trafegante refletida no terminal inversor após 0,4 ms ( $t_1$ ) e a onda refletida no terminal retificador após 16 ms ( $t_2$ ), são também mostradas na Figura 9.

Foi também obtida a energia que poderia ser descarregada sobre uma pessoa em contato com o gasoduto no momento em que ocorre a falta. Para tal, foi escolhido o segmento do gasoduto com maior tensão para terra. O mesmo, no caso em análise, resultou ser o extremo não aterrado do segmento bem no meio da linha HVDC (ponto D situado a  $d = 0$  m). Neste ponto (vide Figura 3c) foi colocada uma resistência equivalente de 1500  $\Omega$  em série com uma indutância  $L = 0,5$  H. Estes valores representam a impedância média de uma pessoa [15]. No caso da ocorrência de um curto circuito no pólo negativo, a máxima energia obtida foi igual a 21,85 Joules (pior caso) que é um valor inferior ao nível marginal de segurança (50 Joules) recomendado em [7] e [16]. Assim, pode-se dizer que o risco desta energia provocar fibrilação ventricular em pessoas seria bem baixo. As tensões induzidas produto de curto circuitos ocorrendo no pólo positivo apresentaram valores muito próximos aos mencionados no caso do pólo negativo. Isto também é válido no caso da máxima energia que poderia ser descarregada sobre uma pessoa.

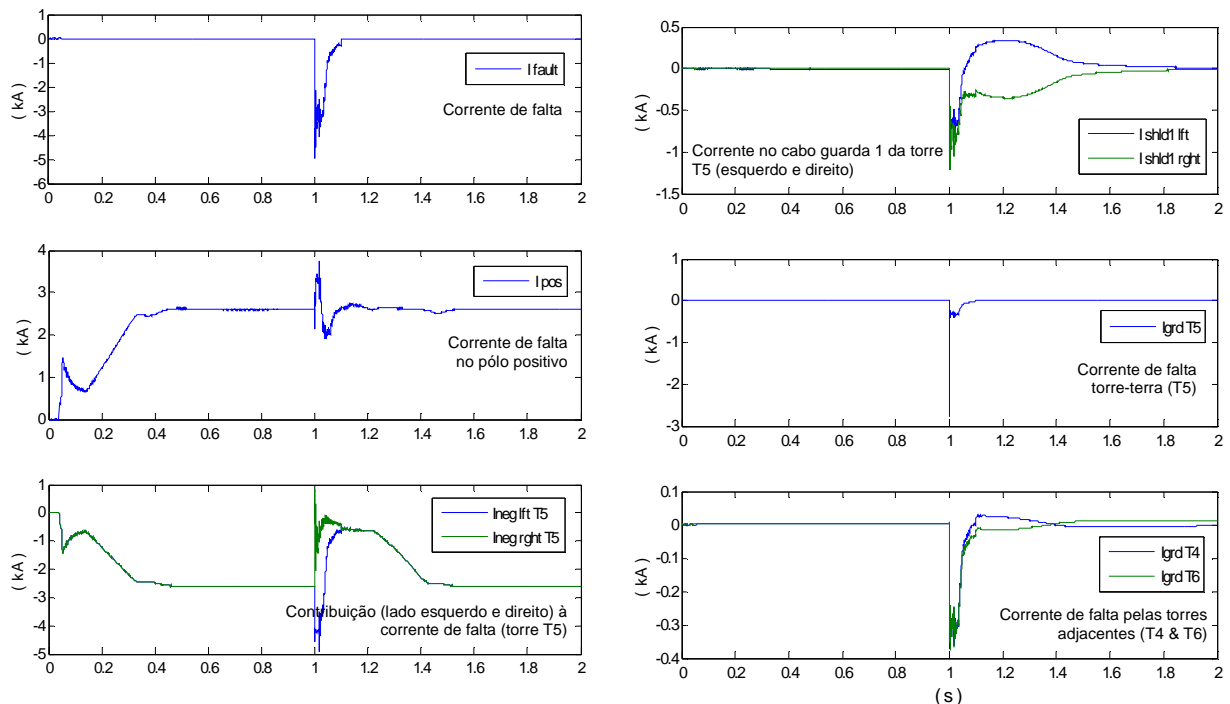


Figura 7 - Correntes e tensões no ponto em falta e nos elementos envolta da torre afetada T5.

### 3.3 Aumento da Tensão devido a Falta Linha CC-Terra

A corrente máxima para terra, através da torre em falta, foi de aproximadamente 3,0 kA. Esta corrente aumenta o potencial da terra afetando as tensões no gasoduto. Com o intuito de simular condições ainda piores podem ser

utilizadas correntes de falta maiores. Por exemplo, na Figura 10 mostra-se os potenciais de terra correspondentes à torre T-2588-1 (nome real da torre com cruzamento na nova linha HVDC mencionada na Seção I) para uma corrente de falta igual a 4 kA. Como a distância desta torre ao gasoduto é de aproximadamente 194 m, a tensão do gasoduto para terra (remota) resulta estar em torno de 790 V (Figura 10), assim, o potencial de transferência efetivo do gasoduto será menor a este valor. Isto não iria ameaçar o isolamento do gasoduto e nem o potencial de toque, já que a energia descarregada (criada por esta tensão) sobre a resistência que emula uma pessoa seria de aproximadamente 20 Joules.

#### 4.0 - EFEITO DE ACOPLAMENTO ENTRE A LINHA HVDC E A FERROVIA

O cruzamento entre a linha HVDC e a ferrovia foi modelado de forma análoga ao caso do gasoduto. Porém, neste caso, o cruzamento ocorre a aproximadamente 320 km da estação inversora (ponto E na Figura 3a). O objeto (ferrovia) foi representado por um condutor sólido (de ferro) localizado a 0,30 m acima do solo com um diâmetro igual a 0,1 m. Praticamente todos os resultados obtidos através do modelo que representa a ferrovia apresentaram valores próximos aos mostrados no caso do gasoduto. Isto é válido também no caso das energias descarregadas sobre pessoas em contato com a ferrovia no momento do curto.

#### 5.0 - ACOPLAMENTO ENTRE A LINHA HVDC E A LINHA CA

No caso do “acoplamento capacitivo”, a linha HVDC irá acoplar uma tensão na linha CA. Este valor pode ser importante durante a manutenção da linha CA desenergizada quando não aterrada ou no instante de aterramento. Se esta manutenção for feita em linha viva pode-se verificar que o valor de tensão adicionada é pequeno (a margem de distância para manutenção em linha viva deve cobrir este aspecto). No caso do “acoplamento indutivo”, esta (tensão) é maior, quanto mais próximo estiverem os pólos da linha HVDC (vide Figura 11). No caso de interferência do eletrodo na operação monopolar esta será maior quanto mais próxima a linha CA estiver do eletrodo e maior for a corrente CC em operação monopolar com retorno pela terra.

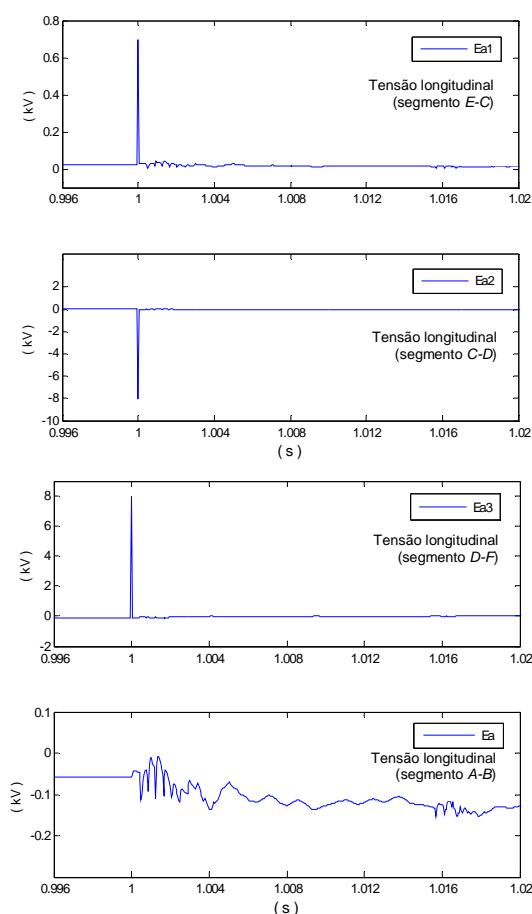


Figura 8 - Tensões longitudinais nos vários segmentos do gasoduto

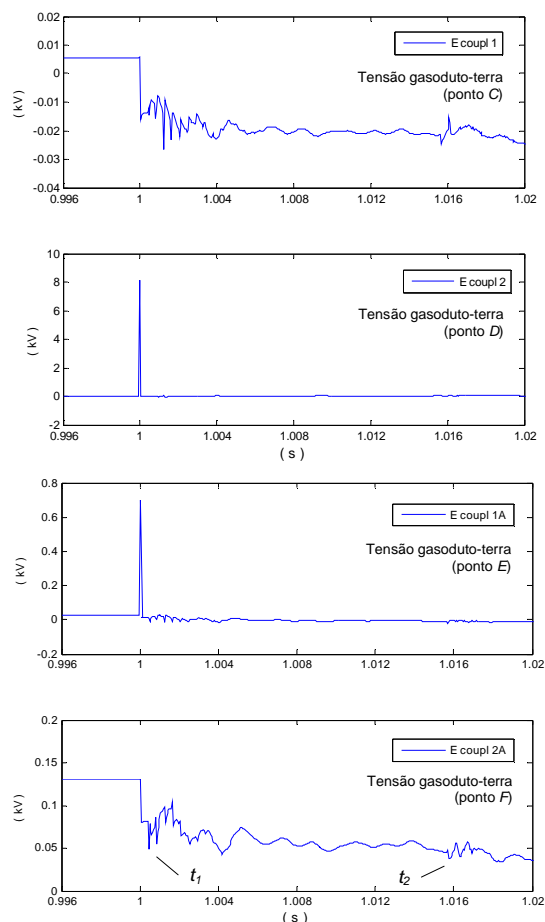


Figura 9 - Tensões gasoduto-terra durante o curto-circuito.

A modelagem do acoplamento entre a linha HVDC e a linha CA foi realizada de forma análoga ao caso do gasoduto, isto é, o cruzamento da linha CA foi representado através de pequenos segmentos representativos. A altura dos condutores da linha CA deverá ser devidamente especificada. A indução (contribuição) da linha HVDC pode ser determinada com a linha CA sem energia. Caso seja necessário determinar a sobretensão instantânea na

linha CA, por causa do acoplamento com a linha HVDC, a linha CA poderá estar energizada. Foram analisados casos de cruzamento de linhas CA em 440 kV (ângulo de cruzamento aproximado de 45°) e em 138 kV (ângulos de cruzamento aproximados de 45°, 60° e 90°). Para estes casos não foram encontrados valores de tensão significativos que possam comprometer a operação da linha CA.

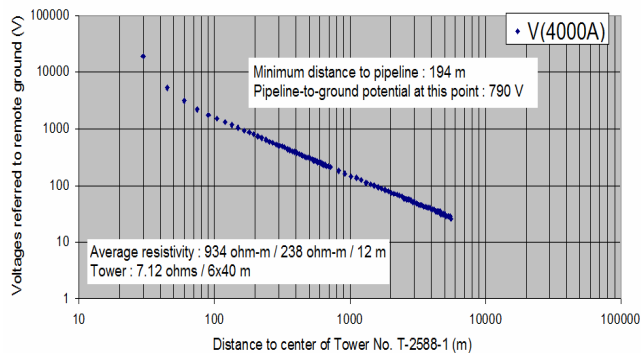


Figura 10 - Tensões envolta da intersecção da linha HVDC com o gasoduto.

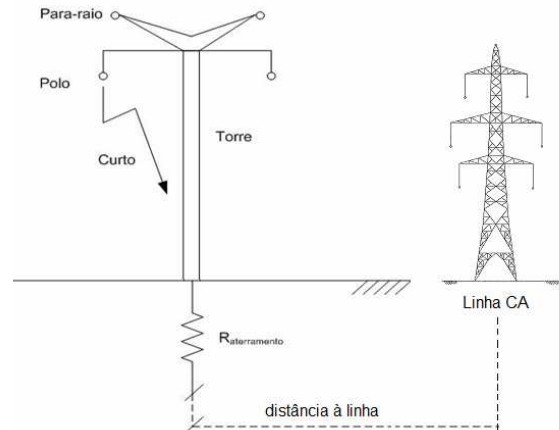


Figura 11. Modelagem para cálculo.

## 6.0 - OPERAÇÃO MONOPOLAR E O EFEITO DO ELETRODO DE TERRA

Previas experiências e medições da resistividade do solo e suas respectivas análises para a localização e dimensionamento dos eletrodos de terra, durante a operação monopolar, possibilitaram a geração das tensões equipotenciais na superfície do solo (que serão verificados durante o comissionamento do projeto) conforme mostrados na Figura 12. Observa-se que os maiores potenciais (75 V) encontram-se em volta do eletrodo. Neste caso, a corrente máxima considerada, incluindo condições de sobrecarga, foi de  $1,33 \cdot I_n = 3.491,0 \text{ A}$ .

Da Figura 12 podem ser obtidos os valores de potencial (V) e distância (km) ao longo da linha NE (vide Figura 13). Estas curvas de potencial correspondem aos valores esperados (para este novo sistema HVDC) e para fins de comparação reproduzem-se também os potenciais de solo do inversor (em Ibiúna) e do retificador (em Foz) do sistema Itaipu. Estes eletrodos estão em operação há mais de 30 anos. O motivo pelo qual foram incluídas estas curvas deve-se à necessidade de se obter uma nova curva (extrapolada) que satisfaça as condições do presente estudo, determinando assim a deterioração dos eletrodos ao longo do tempo. A curva vermelha com pontos quadrados corresponde ao potencial de terra calculada para o Bipolo I do novo sistema HVDC (projeto Madeira). Por outro lado, segundo informações de uma das concessionárias de gás, as juntas de isolamento dos segmentos do duto operam normalmente jampeadas através de um material metálico, mas que existe uma junta isolante (não jumpeada) no início do duto por onde esta é alimentada. Assim, nestas condições, a maior tensão gasoduto-terra que pode aparecer é de 3,5 V a aproximadamente 20 km do eletrodo, conforme mostrado na Figura 13 (linha tracejada); enquanto que a menor tensão (3,2 V) ocorre a aproximadamente 30,5 km. A diferença entre estes valores constitui-se no potencial máximo que aparece entre dois pontos do gasoduto. Esta diferença (pequena), na ordem de tensões naturais presentes no solo, poderá ser neutralizada pelo sistema de proteção catódica.

### 6.1 Corrosão dos Contrapesos da linha CA pela Operação Monopolar

As diferenças de potencial no solo devido à corrente monopolar no eletrodo (tempo máximo de operação de 220 horas/ano) dependem das distâncias das linhas CA ao eletrodo, e da curva de potenciais mostrada na Figura 12. Verificou-se que para as distâncias do eletrodo às linhas CA em análise as tensões foram praticamente nulas indicando ser desprezível a corrente que nelas poderia circular.

Quanto à corrosão dos contrapesos na linha CA que apresenta a menor distância ao eletrodo (116 km), e, portanto a maior tensão dentre todas as travessias, esta tensão é de aproximadamente 0,7 V (valor estimado a partir da Figura 13) sendo que para distâncias acima de 100 km o valor do potencial é menor a 1,0 V. Nestas condições, somente 0,1% do aço, e 6% do zinco, seria corroído durante sua vida útil. Estes valores foram obtidos considerando hipóteses conservativas (pessimistas); assim, na realidade estas porcentagens poderão ser menores.

## 7.0 - CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nas simulações pode-se estabelecer que as tensões induzidas sobre objetos localizados nas proximidades da linha HVDC de  $\pm 600 \text{ kV}$  apresentaram valores que não são suficientemente elevadas para causar danos, tais como corrosão ou falha no isolamento destes objetos. A energia induzida nestes objetos (gasoduto e ferrovia), e que pode ser descarregada sobre a impedância que representa uma pessoa em contato com estes objetos, quando da ocorrência de uma falta na linha CC, é inferior aos níveis considerados como perigosos. A localização desses objetos nas simulações foi altamente conservativa, visando criar as piores condições de indução, de modo que, na prática, valores ainda menores serão encontrados. A indução de tensões



na linha CA não mostrou valores significativos que possam comprometer a operação da mesma. Assim também, a porcentagem de corrosão dos contrapesos das linhas CA, ao longo de sua vida útil, mostrou valores pequenos. Finalmente, no relacionado à operação dos segmentos que representam os objetos próximos da linha HVDC verificou-se que com o aterramento de ambos os extremos do segmento, a tensão induzida é reduzida a metade do valor quando comparado com o caso no qual apenas um extremo tem conexão a terra.

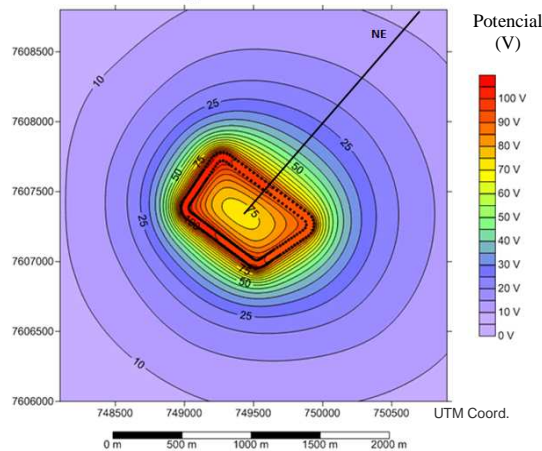


Figura 12 - Aumento do potencial no solo devido ao eletrodo (lado do retificador).

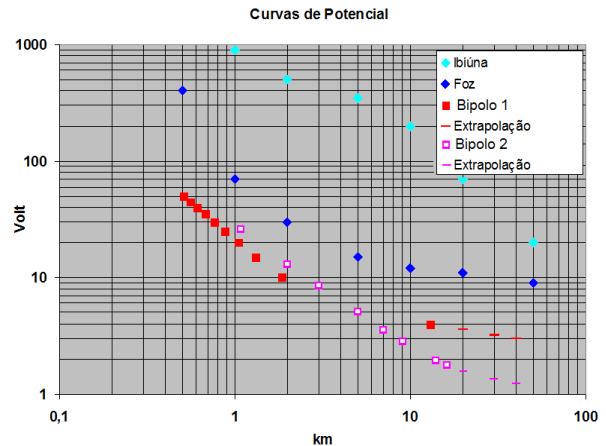


Figura 13 - Comportamento do potencial de terra devido à atividade do eletrodo.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Mohan, F. S. Mahjouri, J. R. Gemayel, "Electrical Induction on Fences Due to Faults on Adjacent HVDC Transmission Lines," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 8, pp. 2851-2859, Aug. 1982.
- [2] A. Taflove and J. Dabkowski, "Predication Method for Buried Pipeline Voltages Due to 60 Hz AC Inductive Coupling, Part I, Analysis," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, pp. 780-787, 1979.
- [3] J. Dabkowski and A. Taflove, "Predication Method for Buried Pipeline Voltages Due to 60 Hz AC Inductive Coupling, Part II, Field Test Verification," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, pp. 788-794, 1979.
- [4] K. C. Jaffa and J. B. Steward, "Magnetic Field Induction from Overhead Transmission and Distribution Power Lines on Buried Irrigation Pipelines," in Proc. IEEE Summer Power Meeting, Vancouver, Canada, Jul. 1979.
- [5] IEEE Working Group Report, "Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines, Part II - Methods of Calculation," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp. 426, 1444.
- [6] IEEE Working Group Report, "Electromagnetic Effects of Overhead Transmission Lines Practical Problems, Safeguards, and Methods of Calculation," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp. 892-904.
- [7] C. F. Dalziel, "A Study of the Hazards of Impulse Currents," AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, Vol. 72, pp. 1032-1043, Oct. 1953.
- [8] R. S. Banks, A. N. Williams, "The Public Health Implications of HVDC Transmission Lines: An Assessment of the Available Evidence," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-102, Issue: 8, pp. 2640 - 2648, Aug. 1983.
- [9] CIGRE Joint Working Group B4/C3/B2.50, "Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Overhead Transmission Lines," No. 473, Aug. 2011.
- [10] A. L. Verhiel, "The Effects of High-Voltage DC Power Transmission Systems on Buried Metallic Pipelines," IEEE Trans. on Industry and General Applications, Vol. IGA-7, No. 3, pp. 403 - 415, May 1971.
- [11] D. Kovarsky, J.L. Pinto, C. E. Caroli, N. Santos, "Soil Surface Potentials Induced by Itaipu HVDC Ground Return Current -- I: Theoretical Evaluation," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, Issue 3, pp. 1204-1210, Jul. 1988.
- [12] C. E. Caroli, N. Santos, D. Kovarsky, L. J. Pinto, "Itaipu HVDC Ground Electrodes: Interference Considerations and Potential Curve Measurements During Bipole II Commissioning," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, Issue 3, pp. 1583-1590, Jul. 1990.
- [13] A.V. Johansson, A. Ekstrom, "Telephone Interference Criteria for HVDC Transmission Lines," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, Apr. 1989.
- [14] M. Szechtman, T. Wess, C. V. Thio, "First Benchmark Model for HVDC Control Studies," Electra, No. 135, Apr. 1991.
- [15] M. A. Kelly, G. E. Servais and T. V. Pfaffenbach, "An Investigation of Human Body Electrostatic Discharge," in Proc. 19th Int. Symposium for Testing & Failure Analysis - ISTFA '93, pp. 167 - 173, Los Angeles, California, 15-19 Nov. 1993.
- [16] C. F. Dalziel, "Electric Shock Hazard," IEEE Spectrum, Vol. 9, No. 2, pp. 41-50, Feb. 1972.



## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

José Antonio Jardini (M'66–SM'78–F'90) nasceu em São Paulo em 27 de março de 1941. Obteve os graus de Engenheiro



Elétrico, Mestre e Doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1963, 1970 e 1973, respectivamente. De 1964 a 1991 trabalhou na Themag Eng. Ltda. desenvolvendo projetos de Linhas de Transmissão e Automação de Sistemas de Potência. Atualmente trabalha como professor titular no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica da Universidade de São Paulo. É membro do CIGRE sendo o representante Brasileiro na SC38 da CIGRE. É fellow member da IEEE e Distinguished Lecturer da IAS/IEEE. Entre suas áreas de interesse destacam-se a Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.

Ricardo Leon Vasquez-Arnez, nasceu na Bolívia em 1966. Obteve o grau Engenheiro Eletricista em 1994 pela Universidade Técnica de Oruro (Bolívia), o grau de Mestre em 1998 pela Universidade de Birmingham (UK) e o grau de Doutor em 2004 pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente trabalha como pesquisador para a FDTE abordando diversos tópicos dentro dos Sistemas de Potência incluindo os sistemas FACTS.

Daniel Kovarsky nasceu em São Paulo, Brasil, em 14 de junho de 1941. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) em 1963. Entre 1965 e 1967 foi professor assistente nas áreas de medições e máquinas elétricas no Instituto Technion de Israel. De 1972 a 1974 foi professor assistente de conversão eletromecânica de energia na EPUSP. De 1975 a 1991, trabalhou na Themag Eng. Ltd. na área de aterramento de subestação e eletrodos de aterramento para o sistema de Itaipu HVDC. Desde 1992, tem desenvolvido vários trabalhos de consultoria relacionados a eletrodos de aterramento HVDC, curto-circuitos em sistemas de potência e cálculo de quedas de tensão. Entre suas áreas de interesse estão o projeto e interferências de eletrodos HVDC. Ele é membro do CIGRE e IEEE.

Romeu Abifadel Haik, obteve o grau de engenheiro elétrico da Universidade de São Paulo - São Carlos em 1989, e o grau de MBA da Fundação Armando Álvares Penteado em 1994 (São Paulo). Entre suas áreas de interesse estão o desenvolvimento de projetos de linhas de transmissão e áreas afins com os Sistemas de Potência.

Amaury Saliba, nasceu em São Paulo, graduou-se em Engenharia Civil em 1977 pela Faculdade de Engenharia de Barretos-SP e pós-graduou no Mestrado de Hidrologia no INPE-Instituto de Pesquisas Espaciais, SJ Campos, SP. Trabalhou 7 anos como Engenheiro Residente de obras de construção de linhas de transmissão em duas Empreiteiras brasileiras. É funcionário de carreira da Eletrobrás Eletronorte desde 1985, onde trabalhou na Área de Construção e Montagem Eletromecânica e exerceu o cargo de Gerente de Projetos de Linhas de Transmissão. Desde 2009, exerce o cargo de Diretor nas SPEs Manaus Construtora (LT-500 kV- Oriximiná/Silves/Lechuga-Manaus) e Construtora Integração (LT +/- 600 kV – Porto Velho /Araraquara-Bipolo 2).

Gabriel Norberto Zarpellon, nasceu em Punta Alta (Buenos Aires, Argentina) em 1966. Obteve o grau de Engenheiro Eletricista em 1992 pela Universidade Tecnológica Nacional UTN em La Plata (Buenos Aires). Diretor pela Abengoa Brasil, atualmente trabalha como Diretor da Construtora Integração no projeto 600 kVcc Porto Velho - Araraquara.