

Sistemas de Segurança Contra Rompimento de Cabos Condutores em Linhas de Distribuição

C. G. Filippin, LACTEC, R.A.Penteado Neto, LACTEC, J.N. Stenzel, LACTEC, E. Mancini Filho, LACTEC, L.R.A. Gamboa, LACTEC, e P.C. Scarassati, CPFL

RESUMO

A configuração do sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro tem por base linhas de distribuição aéreas. Esta configuração traz vantagens na redução de custos de implantação, de manutenção e de custos operacionais. Apresenta, porém, desvantagens como a necessidade de adequação à topologia dos demais equipamentos e estruturas urbanas, além de influir na forma estética da arquitetura das regiões por onde passa. Mas uma das principais desvantagens da linha de distribuição aérea são os riscos inerentes a essa configuração. Uma linha de distribuição convencional apresenta condutores não isolados fixados em postes instalados na calçada. Uma falha mecânica que ocorra em um condutor, no sistema de fixação ao poste ou mesmo no poste, colocará a população circunvizinha à região onde ocorreu a falha exposta a uma condição de risco de acidentes com potencial de fatalidade elevado. Apresenta-se, neste trabalho, o estágio atual do projeto para aumentar a segurança operacional de LD's.

PALAVRAS-CHAVE

Falta de alta impedância. Rompimento de condutores. Segurança Operacional.

I. INTRODUÇÃO

A solução dos problemas de segurança operacional é uma necessidade intrínseca ao processo de distribuição de energia elétrica. Tanto a segurança envolvendo equipes de instalação e manutenção como a segurança de uso do produto junto ao consumidor. Um aspecto envolvendo a segurança do processo de distribuição de energia elétrica está relacionado a falhas que venham a ocorrer no sistema que ponham em risco a população circunvizinha da região onde ocorreu a falha. Este aspecto tem preocupado as concessionárias de energia e não apresenta, ainda, solução adequada. A metodologia a ser empregada neste trabalho tem por princípio o estudo e análise do problema e das possíveis soluções de forma ampla,

C. G. Filippin trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: filippin@lactec.org.br).

R.A.Penteado Neto trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: renato@lactec.org.br).

J.N. Stenzel trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: stenzel@lactec.org.br).

E. Mancini Filho trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: mancini@lactec.org.br).

L.R.A. Gamboa trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: gamboa@lactec.org.br).

P.C. Scarassati trabalha na Companhia Paulista de Força e Luz (e-mail: pcsca@cpfl.com.br).

de maneira a se ter uma visão sistêmica da situação. Não se espera obter uma solução de aplicação universal e sim a melhor solução para cada aplicação, se esta existir.

Esta abordagem sistêmica necessita de informações consistentes quanto ao problema, devendo-se conhecer: os tipos de falha, a frequência com que as falhas ocorrem, a localização das falhas por topologia de linha de distribuição, de densidade populacional e da ocorrência de outros equipamentos e estruturas urbanas. Ainda, se faz necessário conhecer a maneira como a falha é tratada, particularmente no aspecto de prover segurança à população. Em seguida, determina-se o maior elenco possível de princípios físicos que podem gerar soluções para o problema, como, por exemplo, aspectos elétricos do processo de distribuição de energia, aspectos mecânicos do sistema estrutural de distribuição de energia, aspectos óticos, aspectos magnéticos, dentre outros que possam ocorrer. O passo seguinte envolve a seleção dos princípios físicos que se mostrem mais adequados, estudando-os de forma mais profunda quanto a sua aplicação em uma solução ao problema. Provavelmente alguma característica já foi estudada, como, por exemplo, proteções sensíveis à faltas de alta impedância, que ainda não solucionam o problema. Ao menos três aspectos provavelmente surgirão desta seleção, que seriam: faltas de baixa impedância, carga mecânica e sinais eletromagnéticos. Neste passo surge o caráter inovador da pesquisa, onde o problema em questão até o momento tem soluções não eficazes com base nas faltas de alta impedância.

A obtenção de soluções técnica e economicamente factíveis de implantação exige um grande volume de testes em laboratório e em campo para a determinação dos parâmetros físicos e de suas respectivas tolerâncias para o desenvolvimento de dispositivos e/ou sistemas que, ao serem implantados em uma linha de distribuição, resolvam o problema de segurança em presença de uma falha mecânica no sistema. Os testes necessários envolvem quatro grupos: testes de cabos, teste eletromecânicos em protótipos de dispositivos, testes em campo para avaliação das características particulares das linhas de distribuição e testes em laboratório de linhas de distribuição, a ser implantado com recursos deste projeto de P&D.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A preocupação das concessionárias de distribuição de energia elétrica com o rompimento de um cabo energizado que cai ao solo é constante. A corrente de falta de um cabo

ao solo é muito pequena ou até nula quando este cai sobre asfalto ou terra seca que rapidamente se vitrifica. A detecção desta falta por relés convencionais que dependem de uma corrente alta é, portanto, impossível.

Na bibliografia são discutidos desde dispositivos mecânicos que provocam uma falta de baixa impedância [8] e [9], que fazem com que o relé de sobrecorrente atue, até a detecção de falta de alta impedância usando o conceito de análise fractal [5], passando por relés que analisam a forma de onda provocada pelo arco [1], [2], [5], [6], [8], [9] e [13]. Mesmo assim a detecção da falta depende da concessionária ser comunicada pelo consumidor da localização do cabo rompido e a quase totalidade dos autores são unânimes que as faltas de alta impedância na maioria dos casos não são detectadas [1], [4], [6], [8] e [9].

III. ANÁLISE DE REGISTROS DE FALHAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Faz-se, a seguir, uma apresentação dos registros obtidos junto ao pessoal operacional de manutenção de redes de distribuição da CPFL. Desenvolveu-se uma análise crítica dos dados de modo a tabulá-los conforme a região de atuação da Companhia, Sudeste e Nordeste, a causa da falha, o alimentador, o período da ocorrência da falha e o número de consumidores que sofreram desligamento devido a falhas em condutores. A apresentação está assim disposta:

A. Região Sudeste

Observou-se que as causas que provocam o maior número de interrupções são: árvores, corrosão, defeito na secundária que derruba a primária, descarga atmosférica, desconhecida, não relacionada, outros e papagaio – pipa.

É expressivo o volume atribuído a causas desconhecidas e descargas atmosféricas que provocam “outro defeito com condutores”. Pode-se atribuir ao fato de que nem sempre é possível definir a causa.

“Defeito na secundária que derruba a primária” significa que um defeito na rede secundária provoca a abertura da rede primária, desenergizando-a.

Analisando-se as ocorrências durante os meses do ano pode-se observar a sazonalidade das causas:

- a) Interrupções causadas por árvores e descargas atmosféricas ocorrem principalmente durante o verão.
- b) Interrupções causadas por pipas ocorrem principalmente durante as férias escolares: janeiro, fevereiro e julho e também em agosto.

B. Região Nordeste

Observou-se que as causas que provocam o maior número de interrupções são as mesmas da região sudeste.

Analisando-se as ocorrências durante os meses do ano pode-se observar a sazonalidade das causas: Observa-se, entretanto que:

- a) Interrupções causadas por árvores e descargas atmosféricas ocorrem principalmente durante o verão, porém

em menor incidência que na região sudeste.

- b) Interrupções causadas por pipas ocorrem principalmente durante as férias escolares de julho e também em agosto.

Observa-se que o maior número de consumidores prejudicados devido a falha em condutores se dá devido a árvores, pipas, descargas atmosféricas e corrosão.

IV. PRINCÍPIOS FÍSICOS PRESENTES NO PROBLEMA

Analisam-se as características físicas (mecânicas ou elétricas) do microsistema típico de distribuição – poste, isolador, condutor – buscando identificar como estas características podem ser empregadas para o desenvolvimento de uma metodologia para evitar a falha de um condutor ou monitorar sua continuidade, de modo que seja possível prever uma falha iminente. Estas características físicas estão relacionadas com o princípio de funcionamento desse microsistema e com as causas de rompimentos de condutores, já analisadas em etapas anteriores deste projeto. Como a causa de um rompimento é identificada pelo atendente à ocorrência em função do aspecto da falha e das condições ambientes nesse momento, algumas falhas são classificadas como ocorridas por “causa desconhecida” ou mesmo por “outras causas” (o termo “outras” refere-se a alguma causa não nominalmente oferecida ao atendente como classe).

A. Aceleração da gravidade

Um condutor lançado entre dois postes, fixado por isoladores adequados, assume uma configuração que corresponde a uma catenária (Figura 1). Se o condutor falha mecanicamente, ou seja, se rompe em um certo ponto entre as duas fixações, separando-se em duas porções, cada porção cairá, sob o efeito da aceleração da gravidade, com uma extremidade restrita pelo isolador. Algumas situações podem ocorrer:

- a) A menor extremidade é menor que a altura do poste subtraída de 3,5 m (admitindo-se que uma pessoa naturalmente não alcance a extremidade do condutor 3,5 m acima do piso): considerando-se que o poste é não condutor de eletricidade ocorre uma falta de alta impedância neste ponto, com risco praticamente nulo para uma pessoa sofrer uma descarga;
- b) A menor extremidade é maior que a altura do poste subtraída de 3,5 m (admitindo-se que uma pessoa naturalmente não alcance a extremidade do condutor 3,5 m acima do piso), porém menor que a altura do poste: considerando-se que o poste é não condutor de eletricidade ocorre uma falta de alta impedância neste ponto, com grande risco de uma pessoa sofrer uma descarga;
- c) Uma das extremidades é maior que a altura do poste o cabo toca o solo, podendo ocorrer duas situações:
 - c.1) O piso é adequadamente condutor gerando uma falta de baixa impedância que poderá acionar o sistema de proteção da subestação desligando o ramal onde ocorreu a falha;

c.2) O piso apresenta condutividade insuficiente gerando uma falta de alta impedância que não será capaz de acionar o sistema de proteção da subestação.

Como o vão entre postes normalmente é maior que a altura de um poste (Figura 2), em qualquer situação de ruptura de condutor uma extremidade, pelo menos, tocará o solo. Ainda, os sistemas de distribuição podem ser radiais ou em anel. Nos sistemas radiais duas situações podem ocorrer:

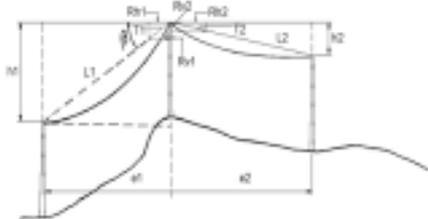


FIGURA 1 - Acomodação do condutor em forma de catenária ao longo do vão formado por dois postes em LD.

- A falha do condutor ocorreu após o último transformador de distribuição da linha, de forma que a extremidade do condutor do lado da carga do vão onde houve a ruptura está desenergizado;
- A falha do condutor ocorreu antes do último transformador de distribuição da linha, de forma que a extremidade do condutor do lado da carga do vão onde houve a ruptura está energizado.



FIGURA 2 - Configuração típica de Linha de Distribuição.

Nos sistemas em anel cada extremidade do condutor rompido deve ser analisada individualmente, pela possibilidade de que cada poste esteja instalado em terrenos com diferentes condutividades e as duas extremidades do condutor estarão energizadas. Poderão ocorrer as combinações apresentadas na Tabela 1 entre sistema de distribuição, resistividade do solo sobre o qual repousará o condutor e comprimento das extremidades do condutor rompido, identificando-se se a falta é de alta ou baixa impedância.

A falha de alta impedância sendo convertida em uma falha de baixa impedância reduz sensivelmente o risco de acidentes envolvendo condutores ao solo. Esta conversão pode ser feita com a instalação de dispositivos mecânicos que sejam atuados pelo próprio cabo ao longo de sua queda, após a ocorrência de uma falha com ruptura do cabo. Estes dispositi-

vos estarão adequadamente aterrados para permitir que o sistema de proteção da subestação atue. Deve-se manter o Nível Básico de Isolamento – NBI – da linha, que poderia levar à ocorrência de falhas por falta de isolamento.

B. Rigidez

Os condutores em uma linha de distribuição são lançados em um vão, de um poste a outro, e acomodam-se segundo uma catenária. Por questões operacionais e de segurança é definida uma altura mínima para o ponto mais baixo da catenária, em relação ao solo. Para satisfazer esta especificação os condutores são tracionados até a altura limite. Portanto, para manter a posição especificada o condutor estará submetido a uma tensão de tração, que será função do peso específico do condutor, do tamanho do vão e da altura dos postes. Alterações de rigidez do condutor farão com que, sob a mesma condição de fixação inicial – ou seja, mesma condição de restrição geométrica dos extremos do vão – a carga de tração se altere de forma a atender aos modelos constitutivos do material. Conseqüentemente, a configuração geométrica apresentada pelo condutor será ainda uma catenária, porém com cota mínima diferente da inicial.

Deve-se levar em conta que a configuração geométrica também será alterada pela dilatação térmica do condutor em função da temperatura ambiente e da carga transmitida pela linha de distribuição, por efeito Joule. Portanto, o monitoramento da rigidez somente seria eficiente se for acompanhado do monitoramento da temperatura do condutor, para que se possa separar a influência da temperatura na alteração de rigidez por falha mecânica do condutor.

A rigidez do condutor será alterada devido à redução de seção transversal (rompimento de tentos do condutor, vincos, escoamento ou corrosão) e/ou por variação no comprimento (alongamento por fluência ou por escoamento). Podem-se identificar alguns defeitos geométricos no condutor como vincos ou *pitting*. Vincos podem ser gerados pela ação de galhos de árvores, que além da ação mecânica sobre os tentos do condutor provocam abertura de arco elétrico, ainda que de pequena intensidade em função da impedância do complexo árvore / solo, ou pela ação abrasiva de cordões revestidos com cerol (pequenos fragmentos de vidro colados na superfície de cordões usados para controlar pipas em vôo). *Pitting* pode ser originado pela ação corrosiva do meio sobre o condutor ou por uma descarga atmosférica que atingiu o condutor de forma a danificá-lo superficialmente, porém sem o rompimento de tentos. Em qualquer dos casos, vincos ou *pitting*, ocorre uma variação de geometria que vem a ocasionar uma concentração de tensões mecânicas na região. Esta concentração será tão maior quanto mais severo for o gradiente de variação de geometria. A concentração de tensões pode ser apresentada em relação às tensões reinantes na vizinhança da região afetada através de um fator de concentração de tensões – K_t – maior que a unidade, aplicado aos valores de tensões da vizinhança. Em princípio, uma estrutura mecânica é projetada para apresentar vida infinita quanto à fadiga. Porém, materiais não ferrosos, como é o caso do alumínio,

com o qual são produzidos os condutores de distribuição e transmissão, não apresentam a possibilidade de vida infinita à fadiga. A vida quanto à fadiga é função primária dos níveis de tensão reinantes no componente – a tensão média e a tensão alternante. As tensões, por sua vez, são função primária dos carregamentos aplicados sobre o componente, da geometria e do material do componente. Uma variação de geometria gera um aumento de tensões poderá alterar a vida útil prevista para o componente. No caso de componentes de alumínio, como o cabo condutor, a vida útil, que de projeto já não seria infinita, será reduzida.

Outro fator que pode alterar a rigidez de um condutor é o encruamento gerado por ciclos de altas temperaturas, como o que ocorre em uma descarga atmosférica, drenada pelo condutor, sem que este se rompa. Ainda, uma conexão inadequadamente instalada pode apresentar superaquecimento e provocar stress térmico no condutor. Nestas situações a rigidez e o alongamento do material mudam. Com a mudança do alongamento do material ocorrem diferenciações de deformações específicas sob carga entre as regiões com encruamento e as regiões não afetadas. Logo, as deformações transversais, devidas ao efeito de Poisson, também são modificadas produzindo variações nas seções transversais deformadas sob carga. Estas modificações de seção transversais equivalem a uma concentração de tensões.

Para se avaliar quantitativamente a influência de defeitos geométricos inseridos em um condutor, foram realizadas algumas simulações numéricas em um tento de condutor de alumínio com quatro tipos de defeitos: vinco circunferencial, vinco semi-circunferencial, *pitting* e duplo *pitting*. O valor do concentrador de tensões pode ser obtido pela razão entre a tensão máxima no defeito geométrico e a tensão nominal na vizinhança suficientemente afastada do defeito, ou a tensão no mesmo ponto para o mesmo carregamento sem o defeito, como no caso da ação do peso próprio, onde o carregamento não é axialmente constante (Equações 1) a (11). Portanto, para os defeitos analisados, tem-se o seguinte (tensões mecânicas em Pa e deformações em $\mu\epsilon$):

a) *Vinco circunferencial*

Deformação sob tração uniaxial

$$K_t = \frac{\text{Deformação máxima}}{\text{Deformação nominal}} = \frac{0,001728}{,000790} = 2,18 \quad (1)$$

Tensão axial sob tração uniaxial

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,211 \text{ E}09}{,679 \text{ E}08} = 3,11 \quad (2)$$

Tensão de von Mises sob tração axial (Figura 3)

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,114 \text{ E}09}{,521 \text{ E}08} = 2,18 \quad (3)$$

Tensões de von Mises sob peso próprio (Figura 4)

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{29315}{15703} = 1,87 \quad (4)$$

Tensões axiais sob peso próprio

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{48615}{16725} = 2,91 \quad (5)$$

b) *Vinco semi-circunferencial*

Tensão de von Mises sob tração axial

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,154 \text{ E}09}{0,527 \text{ E}08} = 2,92 \quad (6)$$

Tensões axiais sob tração axial

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,222 \text{ E}09}{0,487 \text{ E}08} = 4,55 \quad (7)$$

c) *Pitting*

Tensões de von Mises sob tração axial

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,846 \text{ E}08}{0,555 \text{ E}08} = 1,52 \quad (8)$$

Tensões axiais sob tração axial

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,111 \text{ E}09}{0,559 \text{ E}08} = 1,98 \quad (9)$$

d) *Duplo pitting*

Tensões de von Mises sob tração axial (Figura 5)

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,922 \text{ E}08}{0,526 \text{ E}08} = 1,75 \quad (10)$$

Tensões axiais sob tração axial

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,131 \text{ E}09}{0,524 \text{ E}08} = 2,50 \quad (11)$$

Logo, as tensões podem ser até quatro e meia vezes maiores do que seriam se não houvesse defeitos geométricos. Portanto, as tensões de fadiga também são amplificadas, podendo ocorrer uma falha por ruptura do condutor algum tempo depois de nucleado o defeito geométrico. Ou seja, uma árvore pode, em um certo momento, nuclear um defeito geométrico tipo vinco no condutor. Essa mesma árvore pode ser podada e, algum tempo, depois, o condutor sofrer ruptura naquele defeito nucleado. Este tipo de situação pode levar à classificação de falhas com defeito desconhecido ou mesmo como “outros”. Ainda, um defeito que seja nucleado no condutor poderá crescer em função do campo de tensões reinantes de forma que a concentração de tensões poderá ser majorada, levando ao crescimento acelerado do defeito inicial até a falha completa da seção do condutor.

C. Condutividade elétrica

A continuidade do condutor somente é mantida de se o cabo ainda apresentar estrutura suficiente para suportar as cargas aplicadas, mesmo que esteja em processo de falha.

Ou seja, a continuidade do condutor exige que este não esteja rompido. Em situações hipotéticas poderia se considerar flechas excessivas, sem ruptura, que levariam o condutor a oferecer alto risco de descarga elétrica particu-

larmente sobre transeuntes. Logo, um processo que verifique a continuidade do condutor permite seu monitoramento quanto à falha mecânica que leve à ruptura do cabo. Portanto, o princípio físico abordado é a condutividade elétrica. Um sinal enviado pelo condutor somente atingirá seu destino se houver continuidade do cabo. Caso esse sinal não atinja o ponto de controle esperado assume-se que há descontinuidade na linha de distribuição. Deve-se levar em conta as interrupções da linha para manutenção (abertura de chave, troca de condutor) e por eventos que levaram a sobrecarga provocando a abertura de fusíveis. Um monitoramento segundo este princípio não permitiria, porém, a avaliação do grau de comprometimento da estrutura do cabo, caso este esteja afetado mecanicamente sem ruptura total. Apenas seria percebida a falta ou não de continuidade do condutor. Para se monitorar o grau de progressão da falha em um condutor seria necessário o emprego de um sistema com análise de atenuação de sinal, que ocorreria devido a variações de características de condutividade do cabo em uma região onde há uma falha em progressão. É, por outro lado, um princípio útil por ser de aplicação mais ampla, estendendo-se por todo um ramal da linha de distribuição. Ainda é possível a identificação do trecho do ramal onde ocorreu a descontinuidade, com a implantação de repetidores de sinal.

V. REDE DE DISTRIBUIÇÃO EXPERIMENTAL

A rede experimental será construída nas instalações do LEME (Laboratório de Emissões Veiculares) sobre o platô na cota 930 como mostra a Figura 6.

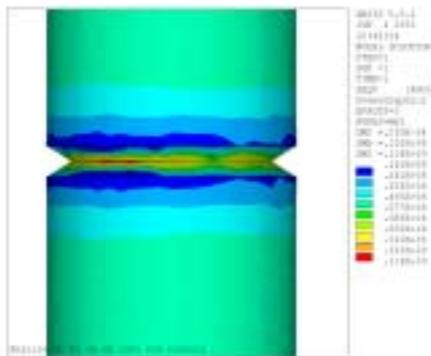


FIGURA 3 - Tensões de von Mises sob carga de tração axial com vinco circunferencial.

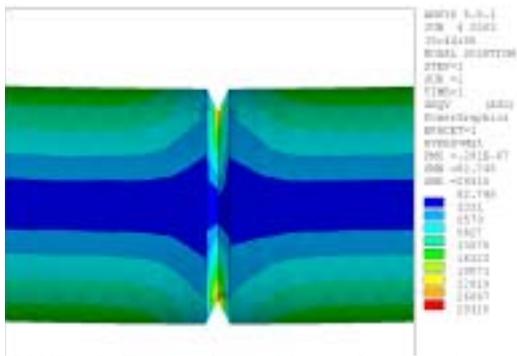


FIGURA 4 - Tensões de von Mises sob peso próprio com vinco circunferencial.

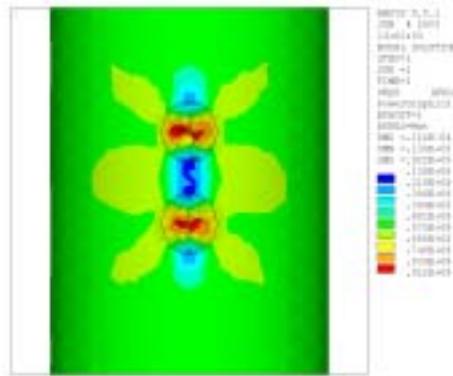


FIGURA 5 - Tensões de von Mises sob tração axial com duplo pitting.

Esta rede será construída conforme os Padrões Técnicos da CPFL que são semelhantes às NTCs da COPEL. Seu comprimento será de 108 m e encabeçada por dois postes N3 (postes 1 e 4). A 4 m do poste 1 será erguido o poste 2 onde estará instalado o transformador elevador de 30 kVA, $14.5 \sqrt{3} / 13.5 \sqrt{3} / 12.5 \sqrt{3}$ kV - 440 V e demais componentes. No vão central será instalado o poste 3, fixado sobre uma base sendo possível deslocá-lo para permitir a variação dos comprimentos do vão bem como produzir um ângulo sobre os postes 2 e 4. O poste 3 será fundido sobre um bloco de concreto munido de rodas que correrão em trilhos, permitindo que o vão possa ser variado de 35 a 60 m de um lado ou 70 a 45 m de outro ou deslocando-o a 90° de modo que cabo faça um ângulo em relação aos postes 2 e 4. O poste 3 será um N2 com isolador de pino duplo. Os trilhos serão chumbados sobre uma laje em forma de T, e estruturada com tela, sobre vigas baldrame e estacas.



FIGURA 6 - Linha de distribuição experimental.

VI. CONTINUIDADE DOS TRABALHOS

As atividades seguintes previstas no projeto passam pela construção da linha de distribuição experimental, no LACTEC, que está projetada e em andamento. Nesta linha serão realizados testes para reproduzir as características e fenômenos observados em campo, além de experimentos para validar as soluções desenvolvidas para o problema de cabos ao solo.

TABELA 1
ANÁLISE DE RISCO DE FALHAS DE CONDUTOR DE DISTRIBUIÇÃO.

Sistema	Resistividade	Lado	Comprimento (L)	Falta	Risco
Radial (falha após o último transformador)	Alta	Fonte	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	Alta	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
			$L > h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
		Carga	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	-	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	-	Nulo
			$L > h_{\text{poste}}$	-	Nulo
	Baixa	Fonte	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	Alta	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
			$L > h_{\text{poste}}$	Baixa	Baixo
		Carga	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	-	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	-	Nulo
			$L > h_{\text{poste}}$	-	Nulo
Radial (falha antes do último transformador)	Alta	Fonte	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	Alta	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
			$L > h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
		Carga	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	Alta	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
			$L > h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
	Baixa	Fonte	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	Alta	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
			$L > h_{\text{poste}}$	Baixa	Baixo
		Carga	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	Alta	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
			$L > h_{\text{poste}}$	Baixa	Baixo
Anel	Alta	Qualquer	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	Alta	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
			$L > h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
	Baixa	Qualquer	$L < h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m}$	Alta	Nulo
			$h_{\text{poste}} - 3,5 \text{ m} < L < h_{\text{poste}}$	Alta	Alto
			$L > h_{\text{poste}}$	Baixa	Baixo

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. M. Aucoin, R. H. Jones, 'High Impedance Fault Detection Implementation Issues', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, n° 1, Jan. 1996.
- [2] D. L. Hickery, E. J. Bartlett e P. J. Moore, 'Investigation into Physical and Electrical Processes of Power System Fault Arcs', Proceedings of 34th UPEC, Leicester University, Sept 1999, Vol. 2, pp 575-578.
- [3] H. Jiali, L. Shanshan, W. Gang, L. Yongli, D. Yuqian, M. Kezunovic, 'Implementation of a Distributed Digital Bus Protection System', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, n° 4, Oct. 1997.
- [4] M. Kezunovic, 'A Survey of Neural Net Applications to Protective Relaying and Fault Analysis', Engineering Intelligent Systems, vol. 5, n° 4, dez. 1997.
- [5] A. V. Mamishev, B. D. Russell, C. I. Benner, 'Analysis of High Impedance Faults Using Fractal Techniques', Power System Automation Laboratory, Department of Electrical Engineering, Texas A&M University, 1995.
- [6] J. Reason, 'Relay Detects Downed Wires by Fault-Current Harmonics', Electrical World, Dec. 1994.
- [7] J. Roberts, D. Hou, F. Calero, H. j. Altuve, 'New Directional Ground-Fault Elements improve Sensitivity in Ungrounded and Compensated Networks', Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman, USA. 2001.
- [8] J. Tengdin, R. Westfall, K. Stephan, 'High Impedance Fault Detection Technology', Report of PSRC Working Group D15, www.pespsrc.org/d/D15MSW60.html. Mar. 1996.
- [9] C. G. Wester, 'High Impedance Fault Detection on Distribution Systems', GE Power Management.
- [10] Proyecto OD98UN18, 'Análisis y Registro de Faltas de Alta Impedancia', Depto. Electrónica y Telecomunicaciones UPV/EHU, 1998 www.spri.es/tecnologia/tic/proyectos/OD98UN18.html
- [11] Report of the CIRED Working Group WG03, 'Fault Management in Electrical Distribution Systems', Espoo, Dec. 1998.
- [12] S. Hänninen, 'Single Phase Earth Fault in High Impedance Grounded Networks. Characteristics, Indication and Location', PhD Thesis, Helsinki University of Technology, Dec. 2001.
- [13] Digital Feeder Monitor, catálogo, General Electric Company – Optima Systems
- [14] ANSYS™, Manual de Referência.
- [15] CPFL, PROJETO DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAL, Norma Técnica, Distribuição, São Paulo, 2000.
- [16] Norton, R.L., Machine Design – An Integrated Approach, Prentice Hall, 2000.
- [17] Fault Management in Electrical Distribution Systems, Report of the CIRED Working Group WG03, Espoo, 22th December 1998.