

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL CARVALHO CORREA

**TÍTULO DO TRABALHO: LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE
UMA LINHA DE SUBTRANSMISSÃO – ESTUDO DE CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

GABRIEL CARVALHO CORREA

**Levantamento dos parâmetros elétricos de uma linha de
subtransmissão - Estudo de caso**

Proposta para Trabalho de Conclusão de
Curso do Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Esp. Ulisses Pereira Rosas
Borges

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Carvalho Correa

Levantamento dos parâmetros elétricos de uma linha de subtransmissão - Estudo de caso

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:00hs do dia 09/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que sempre esteve me apoiando ao longo destes anos de graduação e ao meu orientador professor Esp. Ulisses Pereira Rosas Borges da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio pelo entendimento da minha situação e pela orientação.

RESUMO

CORREA, Gabriel C. Levantamento dos parâmetros elétricos de uma linha de subtransmissão - Estudo de caso. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

A transmissão de energia elétrica é um dos três pilares do sistema elétrico, sendo vital para o fornecimento de energia elétrica. O principal elemento da transmissão de energia é a linha de transmissão, ela transporta a energia elétrica desde a sua geração, até as subestações dos locais onde está será distribuída. Essas linhas recebem uma classificação de acordo com a faixa de tensão que irá operar. Devido ao material de que é constituído os cabos condutores da linha, tem-se parâmetros como resistência, indutância e capacitância, que geram a impedância ao longo da linha e em decorrência disso se tem quedas de tensão e perdas de energia, além disso, os parâmetros são fundamentais para os dimensionamentos das proteções que irão atuar na linha. Portanto há uma grande preocupação das empresas responsáveis com o levantamento assertivo destes parâmetros, pois são impactantes para a eficiência da linha de transmissão e conseqüentemente para o aspecto econômico.

Palavras Chave: Linha de transmissão, impedância, cabo condutor

ABSTRACT

CORREA, Gabriel C. Survey of electrical parameters of a subtransmission line. 2018 Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

The transmission of electric energy is one of the three pillars of the electrical system, being vital for the supply of electric energy. The main element of the transmission of energy is the transmission line, It transports the electric energy from it's generation, until of substations of the places where it will be distributed. These lines receive a rating according to the voltage range that will operate. Due to the material of wich the conductive cables of the line are constituted, some parameters such as resistance, inductance and capacitance are generated, wich generate the impedance along of the line and in addition, the parameters are fundamental for the project of the protections that will act on the line. Therefore, there is a great concern of the responsible companies with the assertive survey of these parameters, since they are impacting for the efficiency of the transmission line and consequently for the economic aspect.

Keywords: transmission line, impedance, conductor cable.

Lista de Figuras

Figura 01 – Cabo CAA.....	10
Figura 02 - Cordoalha de Aço.....	11
Figura 03 - Cadeira de Isoladores.....	12
Figura 04 - Estrutura de Ancoragem.....	14
Figura 05 - Estruturas de Suspensão.....	14
Figura 06 - Estrutura para Ângulos.....	15
Figura 07 – Gráfico de Temperatura x Resistência em Corrente Contínua.....	23
Figura 08 – Configuração dos Condutores em uma LT com Circuito Duplo nas Diferentes Fases de um Ciclo de Transposição.....	25
Figura 09 – Circuito Equivalente de uma LT Curta.....	28
Figura 10 - Circuito Equivalente de uma LT Média.....	29
Figura 11 – Triângulo de Potência.....	33
Figura 12 - Torre do tipo SP Suspensão Reforçada e suas medidas (vista frontal).....	38
Figura 13 - Corte das Mísulas e Torre do tipo SP Suspensão Reforçada (vista lateral).....	39
Figura 14 – Tela Inicial da Rotina LCC do ATPDraw.....	44
Figura 15 – Modelagem da Estrutura e dos Condutores na Rotina LCC ATPDraw....	44
Figura 16 – Resultados das Impedâncias de Linha para o Cabo Oriole.....	45
Figura 17 - Matriz de Impedância de uma LT com Circuito Duplo e Cabo Guarda.....	47
Figura 18 - Matriz Final Simplificada.....	47
Figura 19 - Interface PWS com o Sistema Modelado.....	48
Figura 20 - Entrada dos Parâmetros de Linha em p.u.....	49
Figura 21 - Valores de Tensão, Corrente e Potência Encontrados.....	49

Lista de Tabelas

Tabela 01 - Previsões de Aumento de Carga.....	16
Tabela 02 - Valores de Ampacidade pelo Método de Balanço de Calor.....	35
Tabela 03 - Valores de Resistência CC a 20°C.....	36
Tabela 04 - Valores de Rcc a 75°C e Rca.....	37
Tabela 05 - Distancias Entre os Condutores.....	40
Tabela 06 - Distancia Média Geométrica (m).....	40
Tabela 07 - Raio Médio Geométrico (RMG) dos Condutores em Metros.....	41
Tabela 08 - Distância Média Geométrica (m).....	41
Tabela 09 - Valores Indutivos.....	42
Tabela 10 - Raio Externo Equivalente (m).....	42
Tabela 11 - Valores Capacitivos.....	43
Tabela 12 - Parâmetros Calculados no Software ATPDraw.....	46
Tabela 13 - Valores de Tensão e Corrente.....	50
Tabela 14 - Valores de Potência Gerada.....	51
Tabela 15 - Valores de Regulação de Tensão e Perdas de Potência.....	52

Lista de Abreviatura

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CA: Corrente Alternada

CC: Corrente Contínua

Deq: Distância média geométrica equivalente entre todos os condutores do sistema

Ds: Raio médio geométrico entre os condutores

Dseq: Raio médio geométrico equivalente para todos os condutores do sistema

Dab: Distância média geométrica equivalente entre os condutores a e b

Dbc: Distância média geométrica equivalente entre os condutores b e c

Dca: Distância média geométrica equivalente entre os condutores c e a

Ds(a-a'): Raio médio geométrico equivalente entre os condutores a e a'

Ds(b-b'): Raio médio geométrico equivalente entre os condutores b e b'

Ds(c-c'): Raio médio geométrico equivalente entre os condutores c e c'

DIT: Demais instalações da Transmissora

DMG: Distância Média Geométrica

LT: Linha de Transmissão

RMG: Raio Médio Geométrico

Req: Raio externo equivalente dos condutores do sistema

Sumário

1. INTRODUÇÃO

1.1 O sistema Elétrico.....	08
1.2 Linhas de transmissão	09
1.2.1 Cabos condutores	10
1.2.2 Cabos Pára-Raio	11
1.2.3 Isoladores	12
1.2.4 Estruturas.....	12
1.3 Estudo de caso: Construção de Linha de Subtransmissão em 138kV.....	15
1.4 Fundamentos Teóricos.....	17
1.4.1 Condutor.....	17
1.4.2 LT Editais ANEEL.....	17
1.4.3 Linhas de Subtransmissão (DIT's e obras de expansão).....	17
1.5 Levantamento de parâmetros.....	21
1.5.1 Resistência.....	22
1.5.2 Indutância.....	24
1.5.3 Capacitância.....	26
1.6 Modelagem.....	28
2. Resultados	
2.1 Pré Condição da Concessionária de Energia.....	34
2.2 Cálculo da Corrente de Projeto.....	34
2.3 Cálculo de Ampacidade dos Cabos.....	34
2.4 Cálculo dos Parâmetros de Linha.....	36
2.4.1 Cálculo de Resistência.....	36
2.4.2 Cálculo de Indutância e Capacitância.....	37
2.4.3 Simulação ATPDraw.....	43
2.4.4 Análise dos Resultados.....	46
2.5 Cálculo de Modelagem de Linha de Transmissão.....	48
3. Conclusão.....	54

1. INTRODUÇÃO

Nesta seção serão abordados assuntos introdutórios sobre o sistema elétrico, as definições de linha de transmissão e os principais componentes que a compõem, bem como conceitos para cálculos de seus parâmetros elétricos.

1.1 O Sistema Elétrico

“Um sistema elétrico de potência consiste em três divisões principais, as centrais geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição.” (STEVENSON, 1986)

De acordo com Zanetta Junior, (2005)

“As usinas geradoras estão localizadas próximo dos recursos naturais energéticos, como as usinas hidroelétricas estabelecidas nos pontos favoráveis para o aproveitamento dos desníveis e quedas de água dos rios, assim como locais propícios para a formação de lagos e o armazenamento da água. Da mesma forma, as usinas térmicas localizam-se próximo das reservas de combustíveis fósseis como o carvão ou gás. Cabe mencionar que pode ser mais econômico fazer o aproveitamento desses combustíveis por meio de sua queima, geração de calor e sua transformação em energia elétrica, transportando-a via linhas de alta tensão até os centros de consumo, do que efetuar o transporte do combustível por veículos, ferrovias ou embarcações. Até mesmo as usinas nucleares, que eventualmente poderiam se localizar próximo aos centros de consumo, por razões de segurança são instaladas em regiões afastadas das grandes cidades.”

Em uma sociedade tão dependente da energia elétrica, nota-se a grande importância das linhas de transmissão, sendo assim, pertinentes os estudos realizados sobre o assunto, para um melhor entendimento, busca por melhorias e máxima eficiência.

1.2 Linhas de transmissão

O sistema de transmissão é dividido em redes de transmissão e subtransmissão, sendo a rede primária é responsável pela transmissão da energia produzida nas geradoras até os grandes centros consumidores, já a rede secundária de subtransmissão que é basicamente uma extensão da transmissão, visa suprir ou apoiar o fornecimento de energia de centros consumidores menores ou consumidores industriais de grande porte. (ANEEL)

Segundo a ANEEL, são consideradas linhas de transmissão aquelas que operam com tensão maior ou igual a 230kV e subtransmissão ou linhas de distribuição aquelas que operam de 13,8 a 138kV. As obras de linhas de subtransmissão que tem a responsabilidade atribuída as concessionárias de distribuição de energia pela ANEEL são chamadas de "DIT's" (demais instalações da transmissão).

Apesar da classificação como linha de distribuição, as linhas que operam com tensão entre 69kV e 138kV geralmente recebem uma atenção especial dentro das concessionárias de energia, possuindo um departamento de engenharia e obras separado da área de redes de distribuição que é específica para as linhas de 13,8kV e 34,5kV. Isso ocorre principalmente devido aos valores e dimensões maiores que envolvem as obras das linhas com essa faixa de tensão, bem como a necessidade de grande interação entre a concessionária de energia e empresas transmissoras de energia.

A transmissão de energia pode ser realizada através de linhas aéreas, subterrâneas ou subaquáticas, sendo a primeira a mais utilizada devido ao menor custo e uma maior facilidade para eventuais manutenções.

Os elementos básicos de uma linha de transmissão são os condutores de fase, cabos pára-raios ou cabos de guarda, estrutura e isoladores.

1.2.1 Cabos condutores

Segundo Labegalini P.R., Labegalini J.A, De Almeida e Fuchs, 1992, os responsáveis pelo transporte de energia são os campos elétricos e magnéticos, sendo os cabos condutores meios físicos para estes fenômenos. O seu dimensionamento é de extrema importância para a linha de transmissão, pois é decisivo para limitar perdas por efeito joule ou por efeito corona, além de controlar a radio interferência e os ruídos causados.

Para Zanetta Junior, (2005)

“Os condutores de fase de uma linha de transmissão aérea, são condutores nus e não possuem isolamento, podendo ser de cobre, alumínio, liga alumínio-aço e alumínio com alma de aço. O principal aspecto para a escolha do condutor é o econômico, porém o fluxo de carga a ser transportado e a carga mecânica de ruptura também são analisados.”

Ainda para Zanetta Junior, (2005), os principais tipos de cabos condutores empregados em linhas de transmissão, são:

- CA: condutor de alumínio puro.
- AAAC: condutor de liga de alumínio, de all aluminium alloy conductor.
- CAA: condutor de alumínio com alma de aço, cuja denominação muito conhecida em inglês é ACSR, de aluminium cable steel reinforced.
- ACAR: condutor de alumínio com alma de liga de alumínio, de aluminium conductor alloy reinforced.

Figura 01 – Cabo CAA



Fonte: Catálogo Jundy Cabos

1.2.2 Cabos Pára-Raio

“A função principal dos cabos pára-raios das LT's, é a de interceptar as descargas atmosféricas e evitar que atinjam os condutores, reduzindo assim as ocorrências de interrupções no fornecimento de energia pelas linhas.” (LABEGALI P.R., LABEGALINI J.A., DE ALMEIDA E FUCHS, 1992)

Para Labegalini, Labegalini, De Almeida e Fuchs, 1992, os tipos de cabos comumente utilizados como para-raios são:

- Cordoalha de fios de aço, zincada – forte resistência mecânica
- Cabos CAA extra-fortes – quando se deseja cabos com menor atenuação, empregam-se cabos CAA extra-fortes, que se distinguem por uma menor relação área de alumínio/área de aço.
- Cabos Aço-alumínio – confeccionado com fios de aço extra-fortes revestidos de espessa camada de alumínio. Indicado para atmosferas agressivas ao aço galvanizado.

Figura 02 - Cordoalha de aço



Fonte: Catálogo Prysmian

1.2.3 Isoladores

Os isoladores, como o próprio nome sugere, isolam eletricamente os cabos condutores de seus suportes e do solo. São feitos de materiais dielétricos e seu dimensionamento depende das solicitações elétricas que são submetidos e das dimensões dos suportes nas estruturas em que serão alocados. (LABEGALI P.R., LABEGALINI J.A., DE ALMEIDA E FUCHS, 1992)

Segundo LABEGALI P.R., LABEGALINI J.A., DE ALMEIDA E FUCHS, 1992, os principais isoladores empregados em linhas de transmissão aéreas são feitos de:

- Porcelana vitrificada
- Vidro temperado
- Material sintético compost

Figura 03 - Cadeia de Isoladores



Fonte: <http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/363.pdf>

1.2.4 Estruturas

São utilizadas como ponto de apoio para os cabos condutores e os isoladores, mantendo-os afastados entre si, do próprio suporte e ainda há uma distância considerada segura do solo. Através das fundações feitas de maneira prévia a sua

construção, as forças resultantes vindas dos esforços a que são submetidas são dissipadas para o solo (LABEGALI P.R., LABEGALI J.A., DE ALMEIDA E FUCHS, 1992).

Ainda de acordo com LABEGALI, LABEGALINI, DE ALMEIDA E FUCHS, 1992, os suportes podem ser classificados com os seguintes tipos, que normalmente integram uma “família de estruturas”:

- Tipo suspensão – são suportes dimensionados para, em condições normais de operação, resistir aos esforços verticais devido ao peso dos cabos, isoladores e suas ferragens.
- Tipo ancoragem – constituem os suportes usados no início e no fim das linhas, cabendo-lhes a responsabilidade de manter os cabos esticados. São solicitados unilateralmente pelas mesmas forças que atuam nos suportes de suspensão e adicionalmente pelas forças axiais longitudinais na condição de maior intensidade de vento. São os suportes mais solicitados, sendo, portanto os mais reforçados.
- Tipo “ancoragem intermediária” – semelhante ao tipo anterior, porém empregados no meio das linhas, com trações longitudinais equilibradas à frente e à ré. São menos reforçados que os anteriores, pois devem resistir unilateralmente apenas aos esforços decorrentes do tensionamento dos cabos durante a montagem, ou ap[os a ruptura de alguns deles, supondo-se ausência de ventos de máxima intensidade.
- Para “ângulos” – são estruturas dimensionadas para suportar, além dos esforços verticais e transversais, também as forças decorrentes da resultante das forças de tração nos cabos nos dois alinhamentos que se cruzam. Faz-se a utilização quando é necessário mudar a direção da linha.
- Para “transposição” – a fim de se assegurar o equilíbrio eletromagnético das linhas, e com isso a igualdade das quedas de tensão nas três fases, efetua – se a transposição de fases, o que exige estruturas especiais.
- Para “derivação” – freqüentemente se efetuam “sangrias” ou derivações nas linhas para alimentar um ramal, sem necessidade de algum pátio de seccionamento e manobras. Nesses casos, uma estrutura especialmente projetada para esse fim é utilizada.

Abaixo é possível observar alguns exemplos dos diferentes tipos de estruturas de transmissão de energia elétrica.

Figura 04 - Estrutura de Ancoragem



Fonte: EngTower

Figura 05 - Estruturas de Suspensão



Fonte: Agência Brasil - EBC

Figura 06 - Estrutura para Ângulos



Fonte: Brasil Elétrica

1.3 Estudo de caso: Construção de Linha de Subtransmissão em 138kV

O estudo de caso proposto é uma obra de uma concessionária de distribuição de energia do estado de São Paulo, que visa a melhoria e estabilidade do seu sistema, antecipando problemas como o futuro aumento de carga previsto para a região e manutenções recorrentes efetuadas na linha já existente.

A linha que visa a expansão do sistema da concessionária, será projetada para suportar uma tensão de 138kV, considerando as temperaturas do condutor e de ambiente de 75°C e 30°C respectivamente. Terá uma capacidade de transporte de 130MVA de Potência com fator de potencia de 0,92. A regulação de tensão máxima estipulada é de 12% e o limite de perdas por efeito joule de até 6,7%. Apesar do dimensionamento para uma tensão mais elevada inicialmente a linha irá operar em 69kV, devido a questões financeiras e práticas, já que hoje já existe uma subestação que receberá a linha e esta opera em 69kV, sendo esse cenário suficiente para atender as necessidades do sistema elétrico da região. A idéia de se construir uma outra

subestação em 138kV para receber essa linha em condições nominais é descartada por hora, mas podendo futuramente, em uma eventual necessidade, haver uma transição de maneira mais prática.

As previsões de aumento de carga, podem ser vistas a seguir:

Tabela 1 – Previsões de Aumento de Carga

CARGAS EM 69kV	2018	2019	2027
SUBESTAÇÕES	MVA	MVA	MVA
A	17	19,2	21,6
B	23,6	Migração 138kV	Migração 138kV
C	6,2	6,3	8
D	6	6,1	8,2
E	10,2	12,5	15,2
F	10,9	11,1	12,8

Fonte: Concessionária de energia

Como pode-se observar o aumento da demanda das subestações C,D,E e F é significativo e o circuito simples, vindo da linha de distribuição atual, não suportará essa nova situação. Portanto, tem-se o primeiro e principal motivo para a construção dos novos empreendimentos na região, já que o fornecimento de energia com qualidade ao cliente é o objetivo número um de qualquer concessionária de distribuição de energia elétrica, pois é fator decisivo para as vindas de mais lucros ou prejuízos para a empresa.

Um outro fator que contribuiu para o projeto da nova linha é o fato de que a linha de subtransmissão atual, entre a subestação X e as subestações C,D,E e F é bem antiga, necessita constantemente de manutenções para continuar funcionando, e contudo, em alguns momentos há ocorrência de interrupções, e já que a região é alimentada apenas por esse circuito, a unidade de subestação móvel constantemente tem de ser deslocada para a região, podendo gerar transtornos para a empresa e para o cliente.

1.4 Fundamentos Teóricos

1.4.1 Condutor

O método de dimensionamento elétrico do condutor se difere quando se trata das linhas de transmissão, presentes nos leilões da ANEEL, das DIT's, e de obras de expansão do sistema da concessionária, devido a exigências e regulamentações diferentes entre os mesmos.

1.4.2 LT Editais ANEEL

Para as linhas de transmissão acima de 230kV, a ANEEL, conforme os documentos de leilão 006/2008, estabelece alguns critérios específicos elétricos que devem ser levados em conta para o dimensionamentos dos condutores, tais como:

- Tensão nominal da LT;
- Capacidade de condução de corrente de longa e de curta duração;
- Especificação da resistência de seqüência positiva por unidade de comprimento da linha de transmissão para a freqüência nominal de 60Hz e a temperatura de 50°C;
- Limite de perdas por efeito joule.

1.4.3 Linhas de Subtransmissão (DIT's e obras de expansão)

Para o dimensionamento do cabo condutor de uma linha de subtransmissão, deve-se considerar que como dados, se tem a potência aparente a ser transportada, o nível de tensão para a qual será projetada, e a máxima perda admissível. Calcula-se então a corrente a ser transportada, a partir da equação (1) (KIESSLING, 2003)

$$I_{nom} = \frac{S_m}{\sqrt{3} \cdot V_{nom}} \quad (1)$$

Onde:

S_m – potência aparente a ser transportada [kVA];

V_{nom} – Tensão nominal de projeto [kV];

I_{nom} - Corrente nominal da linha [A].

Após se calcular a corrente nominal, deve-se verificar a ampacidade dos cabos, para isso deve se fazer o balanço de calor no mesmo. Os fatores que influenciam nesse cálculo são (KIESSLING, 2003):

- Efeito Joule N_j , por conta da corrente [W/m];
- Radiação solar [W/m];
- Perdas magnéticas N_m [W/m];
- Perdas de energia por convecção N_c [W/m];
- Perdas de energia por radiação N_r [W/m].

Então, pode-se descrever o balanço de calor pela equação (2) (KIESSLING, 2003):

$$mc \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = N_j + N_s + N_m - N_r - N_c \quad (2)$$

Onde:

mc : massa do condutor por unidade de comprimento [kg/m];

c : calor específico [$\frac{1}{kg \cdot ^\circ C} J$];

T : temperatura do condutor [$^{\circ}\text{C}$];

Dt : termo derivativo em relação ao tempo [adimensional].

Como a temperatura do condutor é constante, a sua derivada no tempo, expressa pelo termo $\frac{dT}{dt}$ será igual a zero, portanto tem-se a equação (3):

$$N_j + N_s + N_m = N_r + N_c \quad (3)$$

Como o efeito joule N_j e as perdas magnéticas N_m são dependentes da corrente, pode-se expressar a equação (4):

$$N_j + N_m = R_{ac} + I^2 \quad (4)$$

Onde:

R_{ac} : Resistência do condutor em corrente alternada [Ohm];

Pode-se definir a radiação solar N_s , pela equação (5)

$$N_s = d \cdot N_{sh} \cdot k_a \quad (5)$$

Onde:

d : diâmetro do condutor [m];

N_{sh} : radiação solar, a norma ABNT NBR 5422 sugere para projetos adotar tal valor como 1000 W/m^2 ;

K_a : coeficiente de absorção dependente do material, segundo a Nota Técnica nº0038/2005 da ANEEL, o valor sugerido é de 0,5.

As perdas de energia devido a radiação solar, são encontradas através da equação (6):

$$Nr = ks . ke . d . \pi . (T^4 - T_{amb}^4) \quad (6)$$

Onde:

T : temperatura do condutor [K];

T_{amb} : temperatura do ambiente [K];

ks : constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2.K^4}$;

ke : coeficiente de emissividade, segundo a Nota Técnica nº0038/2005 da ANEEL, o valor sugerido é 0,5.

A perda por convecção, pode ser expressa pelas equações (7), (8) e (9).

$$Nc = \pi . Nu . \lambda (T - T_{amb}) \quad (7)$$

$$Nu = 0,65 . Re^{0,2} + 0,23 . Re^{0,61} \quad (8)$$

$$Re = 1,644 . 10^9 . v . d . (T_{amb} + 0,5 . (T - T_{amb}))^{-1,78} \quad (9)$$

Onde:

λ : condutividade térmica do ar [W/km];

Nu : número de NuBelt;

Re : número de Reynolds;

v : velocidade do vento [m/s]. Seguindo a NBR 5422, adota-se a velocidade do vento como 1m/s.

Portanto, se chega a equação (10) que descreve a ampacidade do condutor como:

$$I = \sqrt{\frac{Nr + Nc - Ns}{R_{ac}}} \quad (10)$$

Para que o cabo condutor tenha uma ampacidade que atenda a necessidade, a seguinte inequação deve ser atendida:

$$I > I_{nom} \quad (11)$$

1.5 Levantamento de parâmetros

Um assunto de suma importância para o projeto de linhas de transmissão, são os parâmetros elétricos, resistência, indutância e capacitância, introduzindo a metodologia utilizada para os cálculos dos mesmos. Ressalta-se que os efeitos do solo e do cabo para raio sobre os parâmetros não serão estudados neste trabalho.

1.5.1 Resistência

Os cabos de alumínio com alma de aço (CAA) apresentam algumas características elétricas. Stevenson (1986) cita a presença de uma resistência em corrente contínua e outra resistência diferente em corrente alternada, e para ele, isso se deve ao fato de que a distribuição de corrente de uma maneira uniforme na seção do condutor, apenas ocorre em corrente contínua, e já em uma corrente que varia com o tempo a uma elevação da corrente não uniforme, que se acentua conforme aumenta a frequência.

As perdas nos condutores em corrente contínua, devido ao efeito joule, são representadas por meio de resistências, com a seguinte expressão conhecida:

$$R_{cc} = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (12)$$

Onde:

ρ = resistividade do condutor

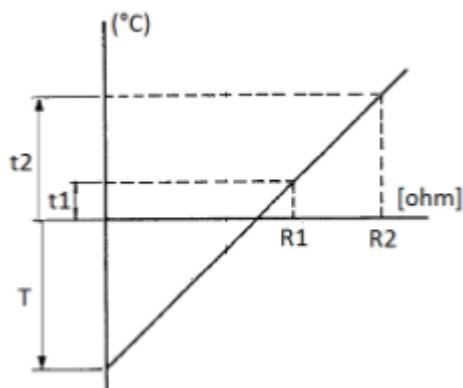
l = comprimento

A = área da seção transversal

Stevenson (1986) ainda diz que pode haver um aumento da resistência em 1% devido ao encordoamento de cabos de 3 fios, e em 2% para encordoamento de cabos concêntricos.

Zanetta Junior (2005) ressalta o comportamento linear que se tem entre a resistência em corrente contínua e temperatura, de acordo com o gráfico da figura (07).

Figura 07 – Gráfico de Temperatura x Resistência em Corrente Contínua



Fonte: Zanetta Junior, 2005

Desta forma, conclui-se que:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \quad (13)$$

Onde R_1 e R_2 são as resistências do condutor nas temperaturas t_1 e t_2 respectivamente, em graus celsius e T é uma constante que varia de acordo com o material do condutor. (Stevenson, 1986)

Zanetta Junior (2005) menciona que para se encontrar o valor real da resistência em corrente alternada (R_{ac}) do condutor, é considerado o efeito pelicular. A discussão sobre o efeito pelicular e suas descrições matemáticas não serão abordados neste trabalho, portanto é utilizado o auxílio dos fabricantes que costumam fornecer em seus catálogos o valor da R_{ac} .

1.5.2 Indutância

A principal equação que descreve a indutância nos condutores de uma linha de transmissão é (STEVENSON, 1986) :

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \text{ [Henrys/km]} \quad (14)$$

Onde:

L: indutância por fase

D_{eq} : distância média geométrica entre os condutores (DMG)

D_s : raio médio geométrico do condutor (RMG)

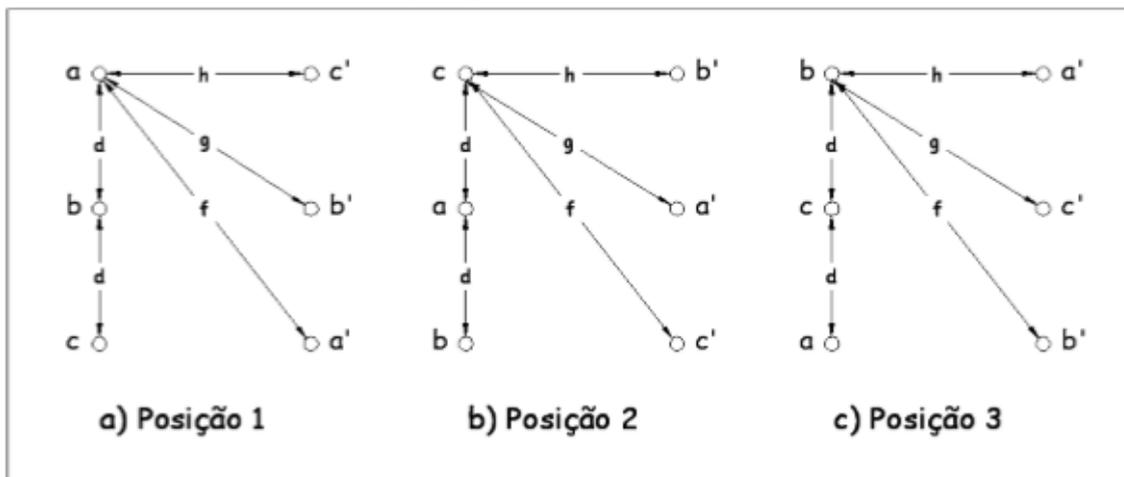
Sendo:

$$D_s = 0,7788 \cdot r \quad (15)$$

r = raio do condutor

Em uma LT trifásica com circuito duplo com a configuração dos condutores em paralelo e apoiados em uma mesma estrutura, conforme a figura (08), pode-se notar que a distância entre as mesmas fases é a maior possível, com o objetivo de diminuir a indutância mútua.

Figura 08 – Configuração dos Condutores em uma LT com Circuito Duplo nas Diferentes Fases de um Ciclo de Transposição.



Fonte: STEVENSON, 1986.

O valor da indutância das linhas também pode ser calculada pela equação (14), porém, deve-se atentar aos cálculos da D_{eq} e do D_s , como descreve Stevenson (1986), a partir da posição original dos cabos:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} \quad [m] \quad (16)$$

Sendo:

$$D_{ab} = D_{bc} = \sqrt[4]{(d \cdot g)^2} \quad [m] \quad (17)$$

$$D_{ca} = \sqrt[4]{(2d \cdot h)^2} \quad [m] \quad (18)$$

e

$$D_{s(a-a')} = D_{s(c-c')} = \sqrt{f \cdot D_s} \quad [m] \quad (19)$$

$$D_{s(b-b')} = \sqrt{h \cdot D_s} \quad [m] \quad (20)$$

Assim:

$$D_{seq} = \sqrt[3]{D_{s(a-a')} \cdot D_{s(b-b')} \cdot D_{s(c-c')}} \quad [m] \quad (21)$$

Portanto o valor da indutância se da por (STEVENSON, 1986):

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_{eq}}{D_{seq}} \text{ [Henrys/km]} \quad (22)$$

O valor da reatância indutiva é dado por:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \text{ [Ohm/km]} \quad (23)$$

Onde:

f : frequência em Hz

1.5.3 Capacitância

A capacitância de uma linha de transmissão resulta da diferença de potencial entre os condutores, e seu efeito os carrega de modo semelhante as placas de um capacitor entre as quais existia uma diferença de potencial (STEVENSON,1986).

A equação que define a capacitância entre fase e neutro de uma LT é (STEVENSON, 19886):

$$C = \frac{5,56 \cdot 10^{-8}}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \text{ [F/km]} \quad (24)$$

Onde:

C: capacitância entre uma fase e o neutro;

D_{eq} : distância média geométrica entre os condutores;

r: raio externo do condutor.

Para uma LT com circuito duplo e cabos em paralelo, como na figura (08), também pode-se utilizar a equação (24), porém deve-se atentar ao cálculo do D_{eq} e do raio médio, de acordo com as distâncias que os mesmos possuem entre si, porém diferentemente do cálculo da indutância, onde nessa etapa se era utilizado o seu RMG, para a capacitância apenas o raio externo do condutor será levado em conta. Portanto, sendo o D_{eq} já descrito pelas equações (16), (17) e (18), o r_{eq} será dado pelas equação (25):

$$R_{eq} = [(\sqrt{r \cdot f}) \cdot (\sqrt{r \cdot h}) \cdot (\sqrt{r \cdot f})]^{1/3} \text{ [m]} \quad (25)$$

Logo:

$$C = \frac{5,56 \cdot 10^{-8}}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{R_{eq}}\right)} \text{ [F/km]} \quad (26)$$

A reatância capacitiva é dada por:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \text{ [Ohm/km]} \quad (27)$$

Então, com os valores de capacitância, tem-se a possibilidade de encontrar a susceptância em derivação ou shunt do cabo através da equação (28) (NEXANS,2013):

$$B_{sh} = \frac{1}{X_c} = \omega \cdot C \text{ [Siemens/m]} \quad (28)$$

Onde:

Bsh: susceptância capacitiva;

Xc: reatância capacitiva;

ω : velocidade angular;

C: capacitância.

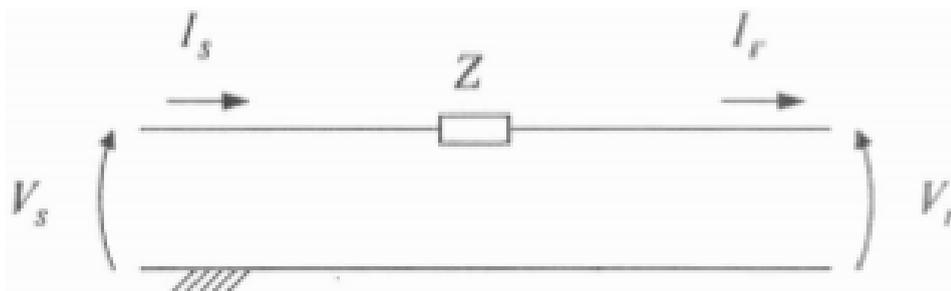
1.6 Modelagem de linhas de transmissão

A modelagem de uma linha de transmissão permite a análise de seu comportamento e estimativa teórica dos valores de suas grandezas como tensão, corrente, potências e ângulo.

Para a construção do modelo de uma linha de transmissão, leva-se em consideração o comprimento da mesma. Neste trabalho serão tratados os modelos para linhas curtas e linhas médias.

Para linhas curtas, com comprimento de até 80km, a susceptância capacitiva é tão pequena que pode ser omitida (GOMES, 2011). Logo, o circuito equivalente é mostrado pela figura (09):

Figura 09 – Circuito Equivalente de uma LT Curta.



Fonte: Zanetta Junior, 2005.

Onde:

V_s : tensão do emissor;

I_s : corrente que sai do emissor;

Z : impedância série da linha, dada pela resistência e indutância;

I_r : corrente que chega no receptor;

V_r : tensão do receptor.

As equações que descrevem esse modelo são:

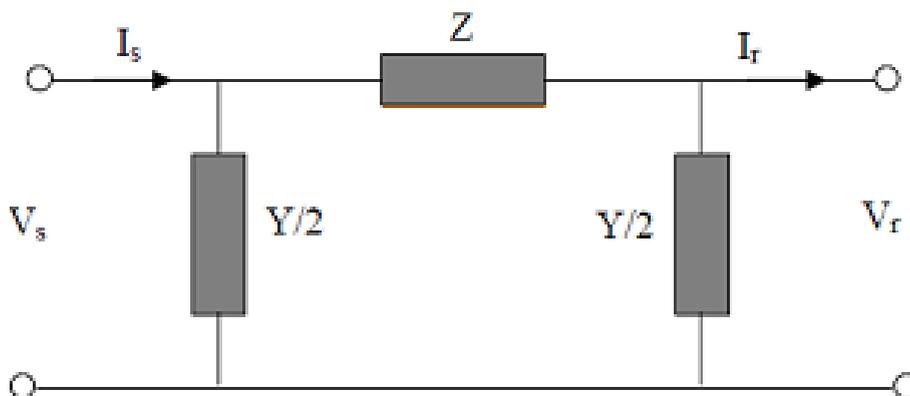
$$I_s = I_r \quad (29)$$

e

$$V_s = V_r + I_r \cdot Z \quad (30)$$

Para as linhas médias, com comprimento entre 80km e 240km, tem-se o circuito equivalente no modelo pi nominal mostrado na figura (10) (STEVENSON, 1986):

Figura 10 - Circuito Equivalente de uma LT Média



Fonte: Kiessling, 2003.

Onde:

Y: Admitância.

A equação que descreve a tensão de entrada V_S é dada por (STEVENSON, 1986):

$$V_S = \left(\frac{Z \cdot Y}{2} + 1 \right) \cdot V_r + Z \cdot I_R \quad (31)$$

e

$$I_S = V_r \cdot Y \cdot \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right) + I_R \cdot \left(\frac{Z \cdot Y}{2} + 1 \right) \quad (32)$$

As equações (31) e (32) podem ser representadas na forma geral como (STEVENSON, 1986):

$$V_S = A \cdot V_r + B \cdot I_R \quad (33)$$

e

$$I_S = C \cdot V_r + D \cdot I_R \quad (34)$$

Onde:

$$A = D = \frac{Z \cdot Y}{2} + 1 \quad (35)$$

$$B = Z \quad (36)$$

$$C = Y \cdot \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right) \quad (37)$$

As constantes ABCD são chamadas “constantes generalizadas da LT”. A e D são adimensionais e B e C são medidos em Ohms ou Siemens (GOMES, 2011).

A regulação de tensão é dada pela equação (38) (STEVENSON):

$$Reg\% = \frac{\left| \frac{V_s}{A} \right| - |V_r^{PC}|}{|V_r^{PC}|} \quad (38)$$

Onde:

$\left| \frac{V_s}{A} \right|$: tensão de saída a vazio;

V_r^{PC} : tensão de saída a plena carga.

A potência aparente transmitida por fase, entregue no ponto receptor, é dada por (ZANETTA JUNIOR, 2005):

$$S_r = P_r + jQ_r = V_r \cdot I_r^* \quad (39)$$

Trabalhando com os fasores de tensão, representados em módulo e fase, escreve-se (ZANETTA JUNIOR, 2005):

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= |V_s| \angle \beta ; \\ \dot{V}_r &= |V_r| \angle 0^\circ \end{aligned}$$

Desse modo:

$$\begin{aligned} A &= |A| \angle a ; \\ B &= |B| \angle b ; \end{aligned}$$

Reescreve-se a corrente I_R como (ZANETTA JUNIOR, 2005):

$$I_R = \frac{|V_S|}{|B|} \angle(\beta - b)^0 - \frac{|A| \cdot |V_r|}{|B|} \angle(a - b)^0 \quad (40)$$

Lembrando que $V_r = |V_r| \angle 0^0$. A potência complexa no receptor também pode ser expressa como (ZANETTA JUNIOR, 2005):

$$P_C + jQ_C = \frac{|V_r| \cdot |V_S| \angle(b - \beta)^0}{|B|} - \frac{|A| \cdot |V_r|^2 \angle(b - a)^0}{|B|} \quad (41)$$

Onde a parcela ativa e reativa, são dadas respectivamente por:

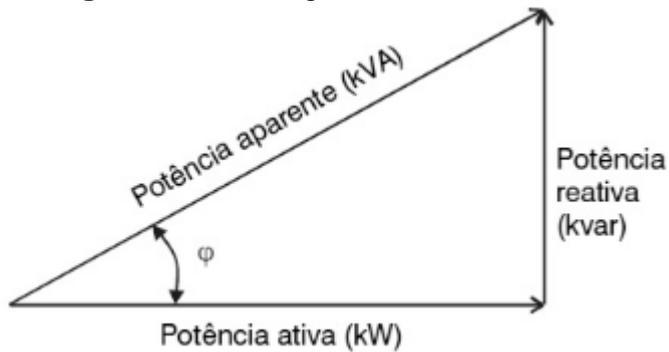
$$P_C = V_r \cdot I_R \cdot FP = \frac{|V_r| \cdot |V_S|}{|B|} \cdot \cos(b - \beta) - \frac{|A| \cdot |V_r|^2}{|B|} \cdot \cos(b - a) \quad (42)$$

e

$$Q_C = V_r \cdot I_R \cdot \text{sen}[\cos^{-1}FP] = \frac{|V_r| \cdot |V_S|}{|B|} \cdot \text{sen}(b - \beta) - \frac{|A| \cdot |V_r|^2}{|B|} \cdot \text{sen}(b - a) \quad (43)$$

Configurando então, o triângulo de potência da linha.

Figura 11 – Triângulo de Potência



Fonte: <http://www.engeletrica.com.br/>

Onde:

P: Potência ativa [W]

Q: Potência reativa [Var]

S_m : Potência aparente

φ : Ângulo do fator de potência

A perda de potência na linha de transmissão é dada por (KIESSLING, 2003):

$$Perdas = 3 \cdot I_Z^2 \cdot R_{cond} \quad (44)$$

e

$$Perdas \% = 100 \cdot \frac{Perdas}{S_m \cdot FP} \quad (45)$$

Onde:

I_Z : corrente que passa pela impedância Z;

R_{cond} : resistência AC corrigida para a temperatura de projeto.

2. RESULTADOS

2.1 Pré Condição da Concessionária de Energia.

A concessionária adota um padrão de cabo condutor, o que facilita a manutenção e traz vantagens econômicas na hora da compra deste material. Portanto, pode-se haver uma faixa de condutores entre o que tem as mínimas condições de atender as exigências do projeto e o padronizado pela concessionária. Este trabalho propõem a análise e comparação dos parâmetros elétricos destes cabos, bem como o funcionamento da linha de subtransmissão de energia com cada um deles.

2.2 Cálculo da Corrente de Projeto

Como descrito nos itens anteriormente, a linha de subtransmissão deverá atender uma potencia de 130MVA, que será dividida em dois circuitos com 65MVA cada um. Utilizando a equação (1) chega-se a uma corrente de projeto de 271,94 A para cada circuito.

2.3 Cálculo de Ampacidade dos Cabos

Para essa etapa, oito cabos do catálogo da NEXANS que atendiam ao valor de corrente nominal da linha foram escolhidos para as comparações. As características elétricas e mecânicas destes cabos foram listadas e utilizadas para verificação da ampacidade de acordo com o método de balanço de calor mostrado pelas equações (2),(3),(4),(5),(6),(7),(8),(9),(10).

Os resultados encontrados para os oito cabos ficaram dentro da faixa mínima para atender a corrente nominal da linha e também atingiram valores próximos aos do catálogo do fabricante com a diferença expressa em porcentagem, como pode-se observar na tabela abaixo.

Tabela 02 - Valores de Ampacidade pelo Método de Balanço de Calor.

Cabos	Amp calc (A)	Nexans (A)	%
PINGEON	322,956	354	9
PENGUIN	372,598	408	9
WAXWIN	461,527	504	8
PARTRIDGE	470,379	514	8
OSTRICH	507,367	553	8
MERLIN	531,841	583	8
LINNET	545,481	594	8
ORIOLE	552,361	601	8

Fonte: Próprio Autor

2.4 Cálculo dos Parâmetros de Linha

2.4.1 Cálculo de Resistência

O estudo se inicia com o cálculo da resistência série da linha. Utilizando-se a equação (12) obteve-se a resistência elétrica da linha em corrente contínua a 20°C. Para isso o valor da resistividade elétrica do alumínio é considerado $\rho=0,028659$, o comprimento da linha de 47,6 km e a área de seção transversal variando de acordo com o condutor. Os valores para os oito cabos condutores são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 03 - Valores de Resistência CC a 20°C

Cabos	Area (mm ²)	Rcc1 Ohm	Rcc (Ohm/km)
PINGEON	85,000	16,0490	0,3372
PENGUIN	107,220	12,7230	0,2673
WAXWIN	135,070	10,1000	0,2122
PARTRIDGE	135,190	10,0910	0,2120
OSTRICH	151,970	8,9760	0,1885
MERLIN	170,420	8,0050	0,1682
LINNET	170,320	8,0090	0,1683
ORIOLE	170,500	8,0010	0,1681

Fonte: Próprio Autor

Com os valores das resistências em corrente contínua, a equação (13) é utilizada de maneira a corrigir os valores encontrados para a temperatura especificada, que no caso é 75°C. Em relação ao efeito pelicular que gera a pequena diferença entre a Rcc e a Rca os meios para seu cálculo não foram abordados por este trabalho, portanto para dar seqüência, adotou-se um acréscimo de 2% no valor da Rcc corrigida, conforme orienta STEVENSON, 1986. Tem-se os novos valores de resistências descritos abaixo:

Tabela 04 - Valores de Rcc a 75°C e Rca

Cabos	Rcc2 (Ohm/km)	Rac (Ohm/km)
PINGEON	0,4119	0,4202
PENGUIN	0,3266	0,3331
WAXWIN	0,2592	0,2644
PARTRIDGE	0,2590	0,2642
OSTRICH	0,2304	0,2350
MERLIN	0,2055	0,2096
LINNET	0,2056	0,2097
ORIOLE	0,2054	0,2095

Fonte: Próprio Autor

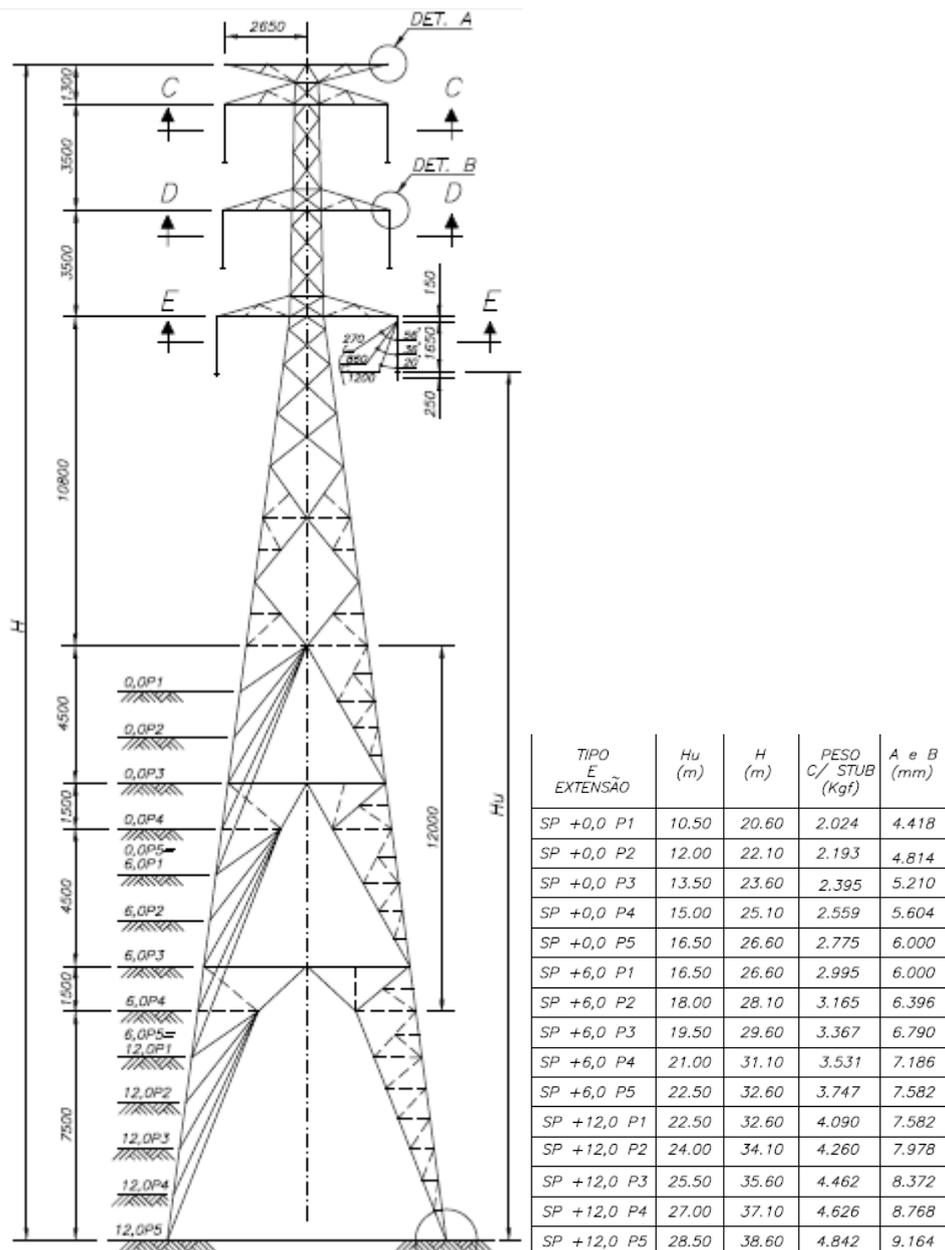
Os resultados obtidos para a resistência elétrica tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada ficaram dentro do esperado, ficando em média 1% menor e 3,5% maior respectivamente em comparação com os valores apresentados pelo catálogo do fabricante. A exceção ficou por conta da Rac dos condutores Pigeon e Penguin, que tiveram uma discrepância de 11% por possuírem um efeito pelicular maior do que o considerado para efeitos de estudo neste trabalho.

2.4.2. Cálculo de Indutância e Capacitância

Neste tópico compara-se o método simplificado de cálculo de indutâncias e capacitâncias em linhas de transmissão, com os resultados apresentados pelo software ATPdraw, que considera todas as matrizes de impedância do sistema. Assim é possível analisar a eficácia do método simplificado para linhas trifásicas com circuito duplo e cabo para-raio.

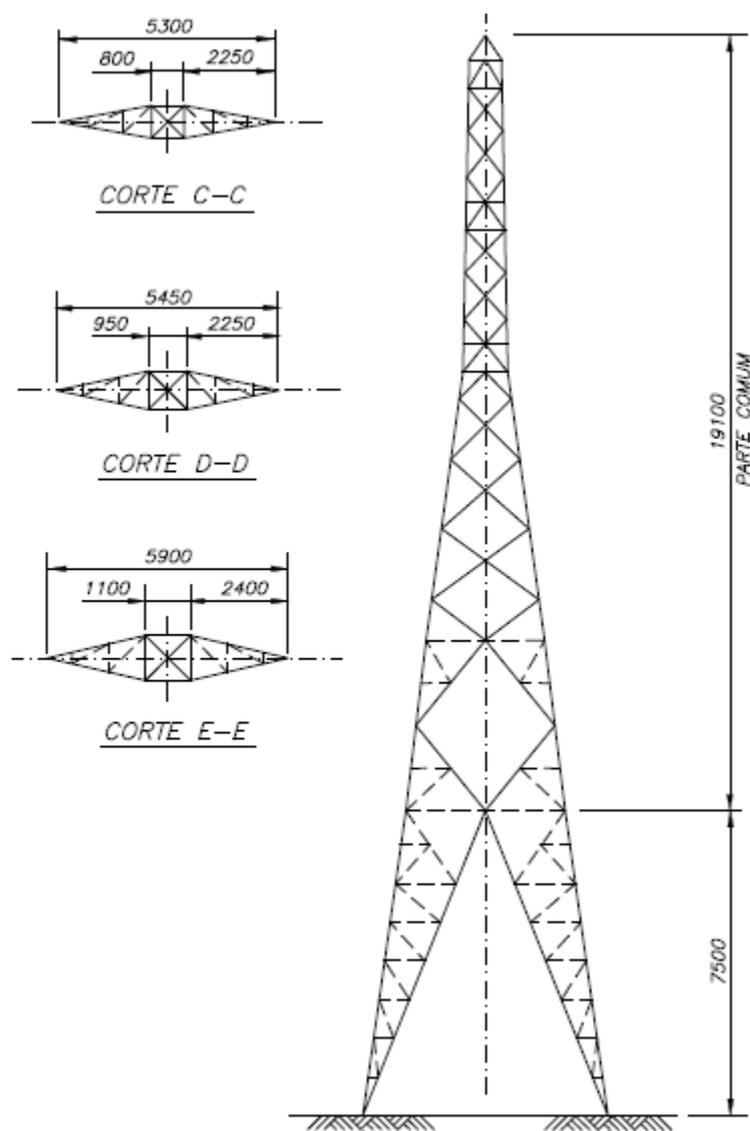
Para o início do cálculo se faz necessário o estudo das estruturas utilizadas ao longo da linha, para este caso a estrutura ao qual serão baseados os cálculos geométricos será uma torre autoportante do tipo “SP+6,0P5 suspensão reforçada”, cujo todas as geometrias podem ser observadas nas imagens a seguir.

Figura 12 - Torre do tipo SP Suspensão Reforçada e suas medidas (vista frontal)



Fonte: Concessionária de Energia

Figura 13 - Corte das Mísulas e Torre do tipo SP Suspensão Reforçada (vista lateral)



Fonte: Concessionária de Energia

Pode-se fazer a relação entre as distancias apresentadas na figura 08 (d,f,g e h) com as distâncias apresentadas nas geometrias das mísulas da torre, porém, estas não possuem um comprimento idêntico como no exemplo usado na figura para a dedução das fórmulas, portanto as distâncias “d” e “h” são variáveis.

Desta forma, para facilitar o entendimento, as nomenclaturas das distâncias entre a e b, b e c, c e a, serão “d1”, “d2” e “d3” respectivamente e as distâncias entre a e c’, b e b’, c e a’, serão “h1”, “h2” e “h3” respectivamente. Os

valores são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 05 - Distancias entre os Condutores

Nomenclaturas	Distancia (m)
d1	3,5008
d2	3,5072
d3	7,0064
f	8,9647
g	6,4140
h1	5,3000
h2	5,4500
h3	5,9000

Fonte: Próprio Autor

Para o cálculo da distância média geométrica equivalente (Deq), utiliza-se a equação (16), porém, primeiramente deve-se encontrar as distâncias médias geométricas entre os condutores dos dois circuitos utilizando as equações (17) e (18). Com isso os valores são dados por:

Tabela 06 - Distancia Média Geométrica (m)

Deq	Dab	Dbc	Dca
5,154574	4,738579	4,742908	6,093761

Fonte: Próprio Autor

Utilizando-se da equação (15) os raios geométricos dos condutores são dados pelos valores abaixo:

Tabela 07 - Raio Médio Geométrico (RMG) dos Condutores em Metros

Cabos	Ds (RMG)
PINGEON	0,00489
PENGUIN	0,00550
WAXWIN	0,00600
PARTRIDGE	0,00610
OSTRICH	0,00701
MERLIN	0,00674
LINNET	0,00742
ORIOLE	0,00778

Fonte: Próprio Autor

Com o RMG dos condutores pode-se fazer uma equivalência para ter-se um RMG equivalente que represente o conjunto como um todo, utilizando a equação (21), porém, primeiramente deve se encontrar suas componentes com as equações (19) e (20), os valores para cada tipo de condutor são dados na tabela a seguir.

Tabela 08 - Distância Média Geométrica (m)

Cabos	Ds	Ds	Ds	DLs
	(a-a')	(b-b')	(c-c')	final
PINGEON	0,2094	0,1632	0,2094	0,1927
PENGUIN	0,2220	0,1731	0,2220	0,2044
WAXWIN	0,2319	0,1808	0,2319	0,2135
PARTRIDGE	0,2338	0,1823	0,2339	0,2152
OSTRICH	0,2507	0,1954	0,2507	0,2307
MERLIN	0,2458	0,1916	0,2458	0,2262
LINNET	0,2579	0,2011	0,2579	0,2374
ORIOLE	0,2641	0,2059	0,2641	0,2431

Fonte: Próprio Autor

Com os dados da DMG equivalente da estrutura e com o RMG final dos condutores, utiliza-se as equações (22) e (23) para se obter a indutância e a reatância indutiva serie da linha respectivamente. Os resultados para os diferentes condutores são dados a seguir:

Tabela 09 - Valores Indutivos

Cabos	L	XL
	(H/KM)	(OHM/KM)
PINGEON	0,000657	0,2478
PENGUIN	0,000646	0,2434
WAXWIN	0,000637	0,2401
PARTRIDGE	0,000635	0,2395
OSTRICH	0,000621	0,2342
MERLIN	0,000625	0,2357
LINNET	0,000616	0,2321
ORIOLE	0,000611	0,2303

Fonte: Próprio Autor

Para o cálculo da capacitância não se utiliza o RMG equivalente do conjunto de condutores e sim um raio externo equivalente, como descrito na equação (25), seus valores para cada condutor são mostrados abaixo.

Tabela 10 - Raio Externo Equivalente (m)

Cabos	R(a-a')	R(b-b')	R(c-c')	Req
PINGEON	0,2390	0,1863	0,2390	0,2199
PENGUIN	0,2533	0,1974	0,2533	0,2331
WAXWIN	0,2632	0,2052	0,2632	0,2423
PARTRIDGE	0,2703	0,2107	0,2703	0,2488
OSTRICH	0,2783	0,2170	0,2783	0,2561
MERLIN	0,2789	0,2175	0,2789	0,2567
LINNET	0,2863	0,2232	0,2863	0,2635
ORIOLE	0,2905	0,2265	0,2905	0,2674

Fonte: Próprio Autor

Em vista que já se sabe o valor da DMG equivalente do conjunto de condutores e de posse do valor do raio externo equivalente, são usadas as equações (26), (27) e (28) para encontrar os valores das capacitâncias, impedâncias capacitivas e susceptâncias. Os resultado são mostrados abaixo:

Tabela 11 - Valores Capacitivos

Cabos	C (F/KM)	XC (MOHM/KM)	S (SIEMENS/KM)
PINGEON	1,76 E-08	0,15048	6,64522 E-06
PENGUIN	1,80 E-08	0,14771	6,76993 E-06
WAXWIN	1,82 E-08	0,14587	6,85551 E-06
PARTRIDGE	1,83 E-08	0,14461	6,91534 E-06
OSTRICH	1,85 E-08	0,14321	6,98259 E-06
MERLIN	1,85 E-08	0,14310	6,98797 E-06
LINNET	1,87 E-08	0,14186	7,04929 E-06
ORIOLE	1,87 E-08	0,14116	7,08395 E-06

Fonte: Próprio Autor

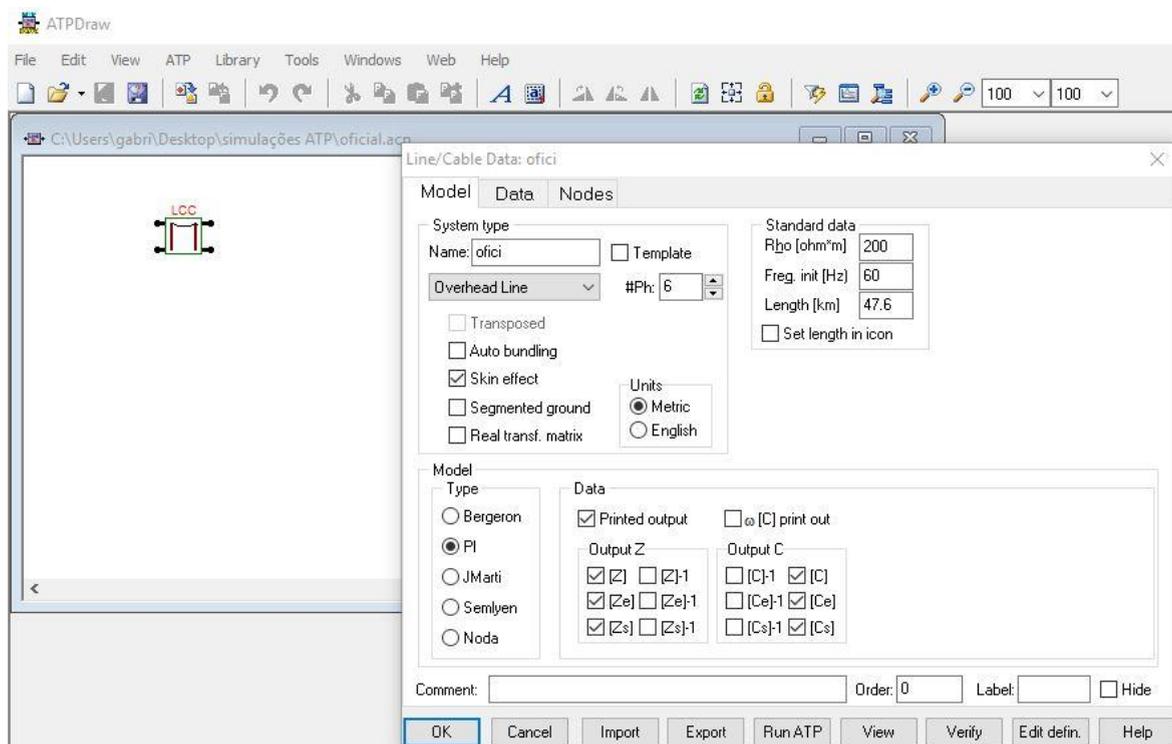
2.4.3. Simulação ATPDraw

Para obter uma base de valores reais dos parâmetros da linha, utiliza-se a rotina “Line Constants” do software ATPDraw para modelar a linha de transmissão estudada.

O Software exige alguns dados de entrada, como mostrado nas figuras abaixo. A figura 14 mostra a tela inicial da rotina, onde são necessários os dados de resistência do solo, frequência e comprimento da linha e quantidade de fase, bem como a escolha do sistema de análise do circuito da linha, no caso o circuito “PI” e as impedâncias e capacitâncias que serão mostradas no resultado. A figura 15 mostra a tela da rotina onde é modelado a geometria da estrutura e as características dos condutores, que foram obtidos do projeto da estrutura e do catálogo da fabricante Nexans respectivamente.

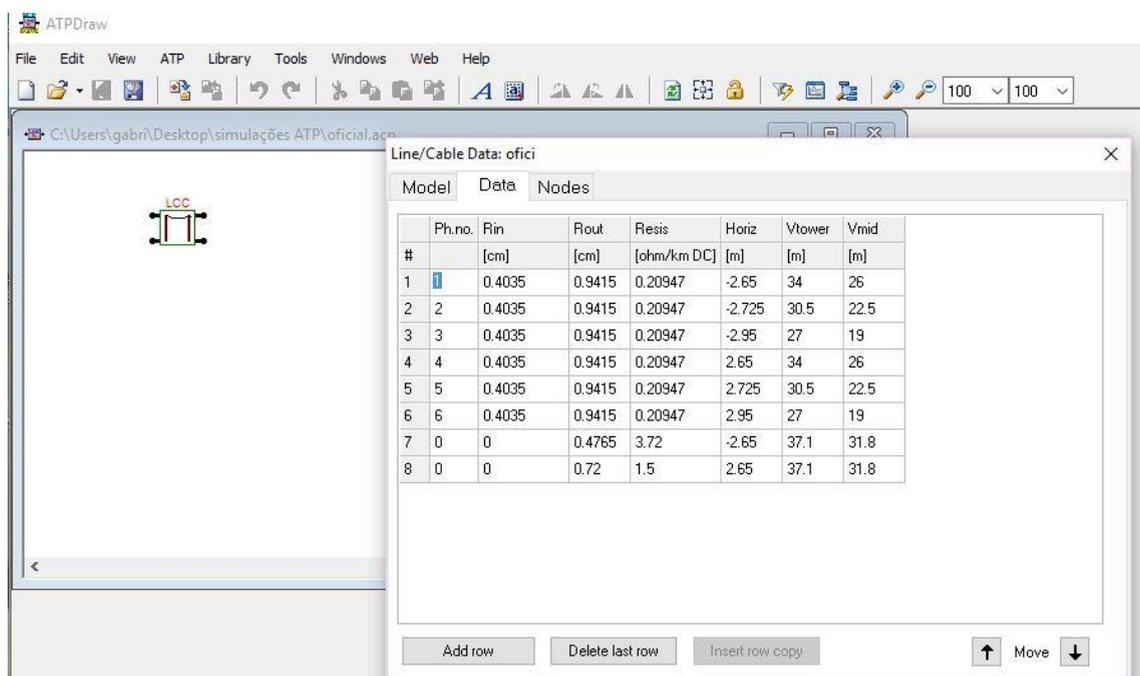
Os cabos guardas utilizados na simulação foram o OPGW (Rcc a 75°C de 1,5 Ohms) e a cordoalha de Aço 3/8 polegadas (Rcc a 75°C de 3,72 Ohms), cujo os dados foram adquiridos do data sheet da Prysmian e do Catálogo da Belgo Bakert respectivamente, que se encontram referenciados neste trabalho.

Figura 14 – Tela Inicial da Rotina LCC do ATPDraw



Fonte: Próprio autor

Figura 15 – Modelagem da Estrutura e dos Condutores na Rotina LCC ATPDraw



Fonte: Próprio autor

Sendo cada campo descrito abaixo:

- Ph.no: Identificação do condutor.
- Rin: Raio interno do condutor.
- Rout: Raio externo do condutor.
- Resis: Valor da Rcc do condutor (caso seja considerado o efeito skin).
- Horiz: Distância horizontal do condutor. Se relaciona a distância horizontal entre o centro do condutor a uma referência dada pelo usuário, sendo esta referência qualquer ponto da silhueta da tosse, porém deve ser padrão para todos os cabos.
- Vtower: Representa a altura vertical do centro do condutor, em metros, medida na torre a partir do solo.
- Vmid: Altura vertical do centro do cabo condutor, medido no meio do vão a partir do solo.

Ao final da simulação o software emite um relatório de passo a passo dos cálculos matriciais com os resultados dos parâmetros, conforme a figura 16 que mostra os resultados do cálculo com o cabo Oriole.

Figura 16 – Resultados das Impedâncias de Linha para o Cabo Oriole

```

Sequence      Surge impedance      Attenuation      velocity      Wavelength      Resistance      Reactance      Susceptance
      magnitude(ohm)  angle(degr.)    db/km          km/sec          km              ohm/km         ohm/km         mho/km
Zero : 8.59408E+02 -1.09747E+01  3.10684E-03    2.04388E+05    3.40646E+03    6.03557E-01    1.49766E+00    2.18622E-06
Positive: 3.87463E+02 -1.19012E+01  2.41012E-03    2.86342E+05    4.77237E+03    2.10401E-01    4.76988E-01    3.47258E-06
Request for flushing of punch buffer.      |$PUNCH

A listing of 80-column card images now being flushed from punch buffer follows.
=====
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
=====
C <+++++> Cards punched by support routine on 11-Nov-18 11.00.00 <+++++>
C LINE CONSTANTS
C $ERASE
C $UNITS, 60., 0.0
C BRANCH IN  AOUT  AIN  BOUT  BIN  COUT  CIN  DOUT  DIN  EOUT  EIN  FOUT_
C METRIC
C 10.286 0.20947 4      1.883 -2.65  34.  15.5
C 20.286 0.20947 4      1.883 -2.725 30.5  12.
C 30.286 0.20947 4      1.883 -2.95  27.  8.5
C 40.286 0.20947 4      1.883  2.65  34.  15.5
C 50.286 0.20947 4      1.883  2.725 30.5  12.
C 60.286 0.20947 4      1.883  2.95  27.  8.5
C 0 0.5  3.72 4      0.953 -2.65 37.1  18.6
C 0 0.5  1.5 4      1.44  2.65 37.1  18.6

```

Fonte: Próprio Autor

A seguir são exibidos os valores dos parâmetros calculados pelo ATPDraw para cada cabo condutor utilizado.

Tabela 12 - Parâmetros Calculados no software ATPDraw

Cabos	Rac (OHM/KM)	L (H/KM)	C (F/KM)
PINGEON	0,4112	0,001348	8,64740 E-09
PENGUIN	0,3274	0,001325	8,80655 E-09
WAXWIN	0,2602	0,001315	8,91266 E-09
PARTRIDGE	0,2599	0,001300	8,96571 E-09
OSTRICH	0,2313	0,001285	9,07181 E-09
MERLIN	0,2065	0,001292	9,07181 E-09
LINNET	0,2065	0,001283	9,15139 E-09
ORIOLE	0,2112	0,001265	9,17791 E-09

Fonte: Próprio Autor

2.4.4 Análise dos resultados

Com a comparação entre os resultados do método simplificado de cálculo dos parâmetros elétricos e os resultados obtidos pela simulação no software ATPDraw, é possível observar a diferença dos valores de indutância e capacitância quando se é considerado todos os fatores.

Zanetta Junior (2005) ressalta que uma análise mais precisa dos parâmetros elétricos é feita apenas pelo método da “imagem” e as formulações matriciais, principalmente para linhas de transmissão trifásicas com circuito duplo e/ou com mais de um condutor por fase e cabo para raio, devido ao maior número de condutores e impedâncias de acoplamento.

Zanetta Junior (2005) evidencia a diferença entre os dois métodos em seus cálculos, deixando claro que as simplificações feitas no primeiro caso, onde apenas o cálculo do RMG e do DMG entre os condutores representa uma média das contribuições de cada condutor para os parâmetros de indutância e capacitância e a não consideração dos cabos guardas e do solo fazem diferença nos valores finais. Para ilustrar essa diferença, as figuras (17) e (18) mostram as matrizes de uma análise completa feita por Zanetta Junior, em um caso com geometria idêntica ao analisado por este trabalho. Na primeira matriz é mostrado

todas as contribuições de impedância série e impedância mútua que um condutor gera no outro, incluindo os cabos guardas, sendo os condutores a,b,c, a',b',c', cabo guarda e cabo guarda' representados pelos números 1,2,3,4,5,6,7 e 8 respectivamente. Na segunda imagem já se vê a matriz final simplificada com as médias das impedâncias series, "Zp" e com as impedâncias mútuas calculadas, "Zm".

Figura 17 - Matriz de Impedância de uma LT com Circuito Duplo e Cabo Guarda

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} & z_{15} & z_{16} & z_{17} & z_{18} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} & z_{25} & z_{26} & z_{27} & z_{28} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} & z_{35} & z_{36} & z_{37} & z_{38} \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & z_{44} & z_{45} & z_{46} & z_{47} & z_{48} \\ z_{51} & z_{52} & z_{53} & z_{54} & z_{55} & z_{56} & z_{57} & z_{58} \\ z_{61} & z_{62} & z_{63} & z_{64} & z_{65} & z_{66} & z_{67} & z_{68} \\ z_{71} & z_{72} & z_{73} & z_{74} & z_{75} & z_{76} & z_{77} & z_{78} \\ z_{81} & z_{82} & z_{83} & z_{84} & z_{85} & z_{86} & z_{87} & z_{88} \end{bmatrix}$$

Fonte: Zanetta Junior, 2005.

Figura 18 - Matriz Final Simplificada

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{p1} & z_{m1} & z_{m1} & z_{p12} & z_{m12} & z_{m12} \\ z_{m1} & z_{p1} & z_{m1} & z_{m12} & z_{p12} & z_{m12} \\ z_{m1} & z_{m1} & z_{p1} & z_{m12} & z_{m12} & z_{p12} \\ \hline z_{p12} & z_{m12} & z_{m12} & z_{p2} & z_{m2} & z_{m2} \\ z_{m12} & z_{p12} & z_{m12} & z_{m2} & z_{p2} & z_{m2} \\ z_{m12} & z_{m12} & z_{p12} & z_{m2} & z_{m2} & z_{p2} \end{bmatrix}$$

Fonte: Zanetta Junior, 2005.

Portanto, os valores obtidos pelo ATPDraw serão utilizados para a análise do fluxo de potência e as perdas do sistema.

2.5 Cálculo de Modelagem de Linha de Transmissão

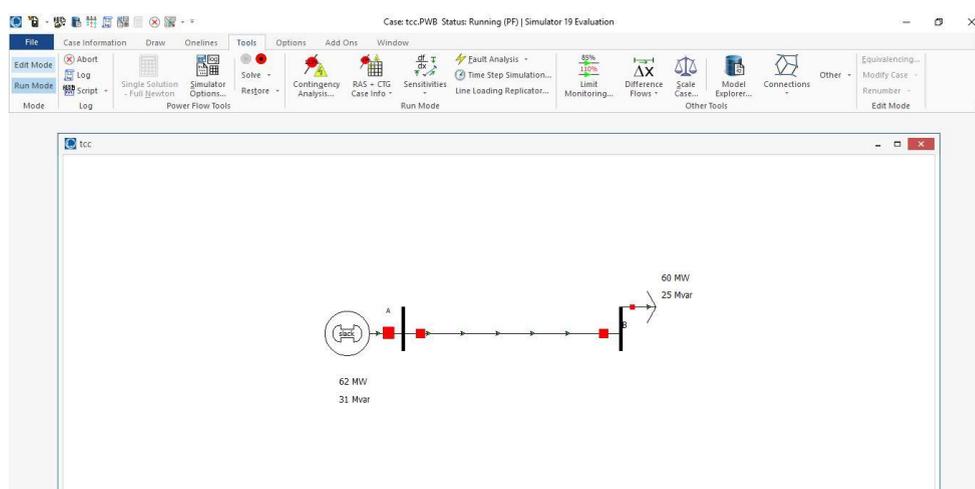
A partir dos parâmetros elétricos encontrados no tópico anterior, se faz a modelagem da linha de transmissão e o cálculo de suas grandezas elétricas.

Como há um problema de fluxo de potência, já que é conhecido a tensão do emissor e os valores nominais de potência do receptor, foi utilizado a versão acadêmica do software Power World Simulation a fim de conseguir os resultados de potência no emissor e tensão no receptor, bem como a corrente circulante no circuito para as situações de 50%, 75% e 100% da carga nominal.

Devido a curta distância da linha, o que acarreta em uma susceptância shunt muito pequena, a diferença entre as correntes que sai do receptor e chega na carga fica em média 0,04%, conforme resultados do software de simulação de fluxo de potência, portanto, os impactos nos valores de tensão e ângulo da barra de carga são muito pequenos, de maneira que, para dar continuidade ao estudo, foi considerado apenas uma corrente, como um circuito série.

No software os valores dos parâmetros são dados em p.u., sendo utilizado como base a tensão do sistema de 138kV e uma potência de 100MVA. As figuras abaixo ilustram as entradas de dados e a interface do simulador utilizado.

Figura 19 - Interface PWS com o Sistema Modelado



Fonte: Próprio Autor

Figura 20 - Entrada dos Parâmetros de Linha em p.u

Fonte: Próprio Autor

A figura 20 mostra a tela de edição dos parâmetros de linha (resistência, indutância e susceptância) que podem ser inseridos já em p.u ou calculados pelo próprio programa. Também há a opção “Length” para se colocar o comprimento da LT analisada.

Figura 21 - Valores de Tensão, Corrente e Potência Encontrados

Fonte: Próprio Autor

A figura 21 ilustra os resultados de potência de geração, perdas de linha e o valor do fasor de tensão (em p.u), bem como seu ângulo.

Após as simulações para todos os oito tipos de condutores chega-se aos resultados que descrevem o comportamento da linha de subtransmissão estudada.

Os valores de tensão na carga e corrente do sistema são expressos na tabela abaixo:

Tabela 13 – Valores de Tensão e Corrente

Cabos	Carga(%)	Vr(kV)	Ir(A)
PINGEON	100	123,290 L -3,19°	304,38 L-26,27°
PINGEON	75	127,370 L-2,32°	220,98 L-25,39°
PINGEON	50	131,140 L-1,50°	143,08 L-24,57°
PENGUIN	100	125,400 L-3,48°	299,26 L-25,55°
PENGUIN	75	128,850 L-2,54°	218,43 L-26,55°
PENGUIN	50	132,080 L-1,65°	142,06 L-24,73°
WAXWIN	100	127,180 L-3,58°	295,07 L-26,65°
WAXWIN	75	130,120 L-2,62°	216,30 L-25,70°
WAXWIN	50	132,890 L-1,71°	141,18 L-24,78°
PARTRIDGE	100	127,250 L-3,53°	294,90 L-26,60°
PARTRIDGE	75	130,170 L-2,58°	216,22 L-25,63°
PARTRIDGE	50	132,920 L-1,69°	141,16 L-24,76°
OSTRICH	100	128,000 L-3,57°	293,19 L-26,64°
OSTRICH	75	130,710 L-2,62°	215,34 L-25,69°
OSTRICH	50	133,260 L-1,71°	140,80 L-24,785°
MERLIN	100	128,550 L-3,67°	291,90 L-26,74°
MERLIN	75	131,110 L-2,69°	214,68 L-25,77°
MERLIN	50	133,152 L-1,77°	214,68 L-25,77°
LINNET	100	128,590 L-3,64°	291,84 L-26,71°
LINNET	75	131,130 L-2,67°	214,63 L-25,75°
LINNET	50	133,154 L-1,75°	140,52 L-24,87°
ORIOLE	100	128,581 L-3,56°	291,85 L-26,63°
ORIOLE	75	131,130 L-2,62°	214,65 L-25,69°
ORIOLE	50	133,530 L-1,71°	214,65 L-25,69°

Fonte: Próprio Autor

Os valores de potência ativa e reativa gerados no emissor para que a demanda do sistema fosse atendido são expressos na tabela abaixo:

Tabela 14 – Valores de Potência Gerada

Cabos	Carga(%)	P(MW)	Q(MVAr)
PINGEON	100	65,240	32,198
PINGEON	75	47,717	22,650
PINGEON	50	31,102	14,223
PENGUIN	100	63,985	31,973
PENGUIN	75	47,081	22,568
PENGUIN	50	30,843	14,202
WAXWIN	100	63,035	31,637
WAXWIN	75	46,588	22,418
WAXWIN	50	30,641	14,148
PARTRIDGE	100	63,028	31,562
PARTRIDGE	75	48,850	22,378
PARTRIDGE	50	30,639	14,132
OSTRICH	100	62,639	31,424
OSTRICH	75	46,381	22,315
OSTRICH	50	30,555	14,109
MERLIN	100	62,313	31,401
MERLIN	75	46,209	22,311
MERLIN	50	30,482	14,110
LINNET	100	62,311	31,355
LINNET	75	46,208	22,287
LINNET	50	30,411	14,100
ORIOLE	100	62,36	31,270
ORIOLE	75	46,233	22,244
ORIOLE	50	30,493	14,082

Fonte: Próprio Autor

Para se obter regulação de tensão e as perdas do sistema utilizou-se as equações (38) e (44), respectivamente, os valores encontrados são mostrados na tabela a seguir:

Tabela 15 – Valores de Regulação de Tensão e Perdas de Potência

Cabos	Carga (%)	Reg (%)	Perdas (MW)	Perdas (%)
PINGEON	100	12,142	5,44	8
PINGEON	75	8,549	2,867	6
PINGEON	50	5,429	1,202	4
PENGUIN	100	10,255	4,185	7
PENGUIN	75	7,303	2,231	5
PENGUIN	50	4,679	0,943	3
WAXWIN	100	8,713	3,235	5
WAXWIN	75	6,256	1,738	4
WAXWIN	50	4,042	0,741	2
PARTRIDGE	100	8,652	3,228	5
PARTRIDGE	75	6,215	2,000	4
PARTRIDGE	50	4,017	0,739	2
OSTRICH	100	8,015	2,839	5
OSTRICH	75	5,776	1,531	3
OSTRICH	50	3,752	0,655	2
MERLIN	100	7,554	2,513	4
MERLIN	75	5,454	1,359	3
MERLIN	50	3,837	0,582	2
LINNET	100	7,521	2,511	4
LINNET	75	5,438	1,358	3
LINNET	50	3,836	0,511	2
ORIOLE	100	7,527	2,560	4
ORIOLE	75	5,437	1,383	3
ORIOLE	50	3,542	0,593	2

Fonte: Próprio Autor

Os primeiros condutores que possuem uma Resistência elétrica maior devido ao seu menor diâmetro, conseqüentemente tiveram uma maior perda de potência ativa devido ao efeito joule e também uma maior regulação de tensão devido a queda de tensão na impedância de linha.

Dentre os cabos condutores analisados o Pingeon e o Penguin não se adequaram aos valores máximos de regulação de tensão e perdas de potência. Já os condutores Ostrich, Merlin e Linnnet tiveram um comportamento semelhante ao do cabo Oriole que é o padronizado, obtendo valores de regulação de tensão e perdas praticamente iguais para todas as faixas da carga utilizada.

3. CONCLUSÃO

Neste trabalho abordou-se a análise de um estudo de caso de uma linha de subtransmissão e as etapas necessárias para os cálculos dos seus parâmetros e grandezas elétricas, comparando cenários com diferentes cabos condutores.

A determinação dos valores de ampacidade dos cabos condutores através do balanço de calor se mostrou eficaz e apresentou resultados plausíveis e dentro do que era esperado, ficando bem próximos dos apresentados no catálogo do fabricante.

O método simplificado utilizando apenas as médias RMG e DMG para cálculo dos parâmetros elétricos apresentou resultados menos precisos para um caso mais complexo, onde se tem um sistema trifásico com circuito duplo e cabo para-raio, mostrando discrepâncias nos valores de indutância e capacitância com o apresentado pelo ATPDraw, devido aos fatores já comentados na análise dos resultados.

A simulação do fluxo de potência permitiu a análise de todas as grandezas elétricas da linha para todas as hipóteses de cabos condutores, onde pode-se comparar a regulação de tensão e as perdas de potência ativa do condutor padronizado pela concessionária com outros condutores que atenderiam a corrente de projeto, ficando claro a eficiência do mesmo perante os demais e o atendimento das exigências impostas ao funcionamento da linha pela concessionária de energia.

A padronização de um condutor para todas as obras de linhas de subtransmissão na concessionária se dá devido as grandes vantagens econômicas conseguidas junto ao fornecedor quando a compra é em grandes quantidades. A manutenção também é um fator muito importante levado em conta, já que qualquer troca de cabos e recondutoramento em linhas do sistema da empresa exigirá o condutor específico daquela linha e caso a empresa trabalhe sem um padrão de condutor terá que ter em seu estoque vários tipos de condutores, dificultando o controle e previsão deste estoque, afetando assim diretamente o giro e resultando em capital financeiro parado.

A escolha do cabo Oriole frente aos outros três condutores que pelos resultados da simulação são semelhantes a ele em funcionamento, é a facilidade de encontrá-lo juntos aos fornecedores, devido a uma padronização vinda de anos atrás pela antiga Companhia de Energética de São Paulo (CESP), que fornecia energia em todo o estado de São Paulo. Os departamentos de engenharia das empresas privadas que sucederam a estatal, mantiveram o condutor Oriole como padrão, pois o mesmo atende aos padrões de projeto da maioria das obras de linhas de subtransmissão de até 138kV.

Como sugestão para trabalho futuro, o cálculo dos parâmetros elétricos de LT utilizando o método de imagens é um tema que complementa os assuntos tratados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

Alubar. **Catálogo técnico, 2010.**

<https://www.alubar.net.br/downloads/produtos/catalogo_tecnico_2010-2.pdf> Acesso em: 25 de Outubro de 2017

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

<http://www.aneel.gov.br/contratos-de-transmissao> Acesso em: 27 Setembro de 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

Documentos Leilão 006/2008.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

Nota Técnica nº038/2005-SRT/ANEEL. Brasília.2005.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0075_DANIEL_SRD.pdf Acesso em: 27 Setembro de 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – Procedimento.** Brasília, 1985.

Belgo Bakaert Arames, “**Fios e Cordoalhas de Aço Zincado para Eletrificação e**

Telefonia” Disponível em: <<http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Documents/Folder-eletrificacao.pdf>>

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

<<http://www.cepel.br/linhas-de-pesquisa/menu/otimizacao-de-projetos-de-linhas-de-transmissao.htm>> Acesso em: 27 Setembro de 2017.

DEE – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de

Janeiro. <http://www.dee.ufrj.br/~acsl/grad/transm/notas_de_aula/tree2.html> Acesso em: 25 Setembro de 2017.

DENE – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de

Fora. Notas de aula: Transmissão de Energia Elétrica. Professor: Dr.Flavio Vanderson Gomes. <http://www.ufjf.br/flavio_gomes/files/2011/01/Transmiss%C3%A3o-Aula-06.pdf> Acesso em: 13 Outubro de 2017

PERES. Leonardo L., KALUCZ Rafael. **Estudo de Projeto de Linhas de Transmissão Trifásicas com Ênfase nos Cálculos Elétricos.** 2014. Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2014.

FEEC – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP. Guia para a Utilização do ATPDraw, 2003. Professora Dra Maria Cristina.

<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~cristina/pos%20graduacao/GUIA.ATP.pdf>>

FERNANDES, M. A. **Implantação, estudos e avaliação paramétrica de linhas de transmissão.** 2004. 248f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1977.

KIESSLING, F. et al. **Overhead Power lines: Planning, Design, Construction**. In: Section of Conductors. Berlin: Springer, 2003

LABEGALINI, Paulo R.; LABEGALINI, José A.; FUCHS, Rubens D.; DE ALMEIDA, Márcio T. **Projetos Eletromecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MATZENBACHER, Luca S. **Sistema de Dimensionamento de Condutores de Linhas Aéreas de Transmissão e Análise Financeira Preliminar**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

NEXANS, Fornecedora de Cabos Elétricos. "**Alumínio, Condutores Nús**". Catálogo, 2013.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. <[Http://ons.org.br/pt/paginas/energia-no-futuro/transmissao](http://ons.org.br/pt/paginas/energia-no-futuro/transmissao)> Acesso em: 27 setembro de 2017

Paulista Engenharia <<http://paulistaengenharia.com/>> Acesso em: 25 de Outubro de 2017

Prysmian Group, Data Sheet "**Cabo de Guarda com Fibra Óptica OPGW. OPGW 14,4 24FO(OPGW 44F70s)**".

STEVENSON, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2. ed. São Paulo. McGraw-Hill, 1986.

ZANETTA JUNIOR, Luiz Cera. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. São Paulo. Editora Livraria da Física, 2005.