



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

FI/GLT/17
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

CONDUTORES DE ALUMÍNIO LIGA 1120 E ALTERNATIVAS DE FEIXES PARA 500 kV

João Nelson Hoffmann (*)
COPEL GeT

Freddy Rudi Möllhoff
COPEL GeT

Marco Aurelio Jolandeck
COPEL GeT

André Hoffmann
UFPR

RESUMO

Este Informe Técnico tem por objetivo o estudo de feixes de condutores mais econômicos para linhas de transmissão de 500 kV. Buscam-se feixes de menor peso e custo, e que produzam menores cargas mecânicas transversais e longitudinais nas torres e fundações.

Apresenta-se uma análise detalhada dos cabos AAAC de alumínio ligas 1350 (alumínio comum), 6201 e 1120, além das várias combinações de cabos ACAR. Como resultado, em alternativa ao feixe usual de 4 condutores ACSR 954 MCM sugere-se feixe triplo expandido em 750 mm, com um novo cabo ACAR 1330 MCM, fios 1350/1120, que foi ensaiado mecânica e eletricamente. São propostas também alternativas de feixes para os demais casos usuais de 6x795 MCM e 4x636 MCM.

PALAVRAS-CHAVE:

Linha de Transmissão, Cabo Condutor, Resistência Elétrica, Feixe Expandido, SIL

1.0 - INTRODUÇÃO

A Copel tem participado desde o primeiro certame de linhas de transmissão (LT) da Aneel em 1999, ainda sob a forma de concorrência pública, logo em seguida convertido para a forma de disputa em leilões. Em 2007 intensificamos os estudos na busca por condutores e feixes alternativos aos usuais ACSR e ACAR 1350/6201, nos concentrando em cabos com alumínio liga 1120 [1] e liga Al59 [2]. Com a participação mais intensiva da Copel nos leilões a partir de 2009, e a produção nacional de condutores de alumínio 1120 já nesta data por alguns fabricantes, encontrou-se campo mais adequado para aplicações de cabos condutores AAAC ou ACAR com este material.

É interesse do empreendedor construir a LT de modo a atender aos requisitos técnicos do edital de leilão, com custo mínimo de construção e operação. A escolha do cabo condutor tem papel significativo, pois reflete-se nos custos das torres e das fundações, e com menor influência, reflete-se também no custo das cadeias de isoladores, nos serviços de lançamento dos cabos e na largura da faixa de servidão, sem mencionar ainda a relevância de seu desempenho técnico do sistema elétrico.

Dada esta importância à seleção criteriosa dos condutores, os estudos aqui resumidos se iniciam na seção 2.0 com um breve histórico dos leilões de 500 kV realizados nos últimos 5 anos, norteando assim os estudos que se seguem. Na seção 3.0 descreve-se brevemente as características das ligas de alumínio que podem ser utilizadas, concluindo-se por iminentes vantagens dos condutores de alumínio 1120.

Para nos aprofundarmos nos estudos da seleção do melhor condutor, conclui-se na seção 4.0 pela necessidade de um aplicativo para o cálculo da resistência elétrica de condutores com qualquer formação, permitindo assim a obtenção de condutores AAAC e ACAR especificamente projetados para atender a cada caso.

Na sequência a seção 5.0 descreve o novo critério proposto na definição das trações mecânicas axiais aplicadas aos condutores, em alternativa aos critérios da NBR 5422 [3], denominado "Parâmetro H/w" [4].

(*) Rua José Izidoro Biazetto, 158, Bloco A, CEP 81.200-240, Curitiba, PR – hoffmann@copel.com

Como resultado da aplicação prática dos itens anteriores, na seção 6.0 são estudadas alternativas ao feixe 4x954 MCM (feixe predominante nos editais de leilão), apresentando os resultados para várias hipóteses de feixes e cabos AAAC e cabos ACAR com alumínio 1350 e 6201, e um novo ACAR projetado com ligas 1350 e 1120. Finalizando é sugerida e testada mecânica e eletricamente a melhor alternativa em termos de custos e esforços mecânicos transmitidos às torres e fundações. Na seção 7.0 são apresentadas sugestões de alternativas para os feixes 6x795 e 4x636.

2.0 – HISTÓRICO

A Figura 1 apresenta um resumo histórico dos leilões de linhas de transmissão de 500 kV realizados nos últimos 5 anos. Dos 17.000 km leiloados, 55 % consideravam como alternativa básica a utilização de feixes de cabos 4x954 *Rail*, 25 % feixe 6x795 *Tern*, 10 % feixe 4x636 *Grosbeak* e 10 % outros feixes (3x954, 4x795, 6x795 SIL 1670 MW), todos com condutores tipo ACSR. Quanto à necessidade de linhas de potência natural elevada (LPNE), observou-se que 35 % das LT's foram especificadas com 1200 MW, 25 % com SIL 1460 MW e 4 % com SIL 1670 MW. O condutor *Rail* responde por 65% do total em peso, o *Tern* por 30% e o *Grosbeak* por 5% .

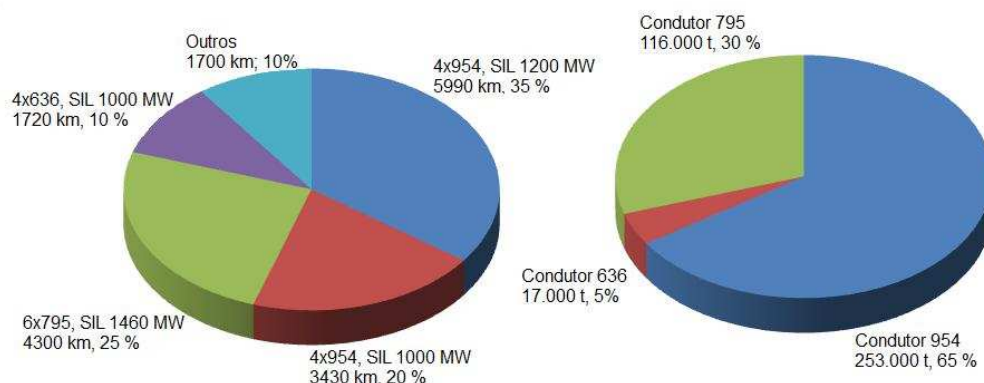


FIGURA 1 – Leilões de LT's de 500 kV no período 2010-2014 (Alternativa básica do relatório R2)

Em complemento, a Tabela 1 destaca valores especificados em grande parte dos Editais nos últimos 5 anos.

TABELA 1 – Histórico de leilões de LT's de 500 kV no período 2010-2014

Feixe da Alternativa Básica do Edital	R1 – Resistência elétrica de sequência positiva, AC, 50 °C (ohm/km)	In - Capacidade Operativa de Longa Duração, <i>Típica</i> (A)	Ie - Capacidade Operativa de Curta Duração, <i>Típica</i> (A)
4x954	0,0174	3800	4500
6x795	0,0139	4800	6000
4x795	0,0208	3200	4000
4x636	0,0258	2800	3300
3x954	0,0232	2800	3300

Cabe observar a diferença entre R1 e os valores da resistência elétrica de um condutor único (singelo), usualmente calculado e que consta em catálogos de fabricantes ou Normas Técnicas: Estes referem-se ao valor da resistência elétrica sem considerar a influência da aproximação dos demais condutores ou da superfície da terra, enquanto que R1 é o valor da resistência elétrica do condutor ou feixe aplicado na LT, e que adicionalmente incorpora esta influência. Tem-se observado diferenças de 1 a 4 %, dependendo da silhueta da torre típica da LT, ou seja, das distâncias entre os diversos condutores ou feixes, para-raios e terra.

Nos estudos de feixes alternativos procura-se em primeiro lugar atender ao valor de R1 máximo especificado, observando-se que a temperatura de projeto do cabo condutor para In e Ie, calculadas conforme [5] ou metodologia similar, não ultrapassem os valores recomendados (usualmente 90 °C para cabos ACSR, AAAC e ACAR).

Além dos requisitos básicos da Tabela 1, há ainda outras questões que podem inviabilizar determinadas alternativas, e que dependem fortemente da geometria das torres que serão utilizadas, tais como o SIL (*Surge Impedance Loading*), o nível de corona visual na superfície dos condutores e a largura da faixa de servidão para atender questões de interferências elétricas (rádio-interferência, ruído-audível e campos eletromagnéticos ao nível do solo). Em complemento e usualmente de menor impacto temos também o limite de *vão máximo* para atender ao balanço dos condutores e para atender ao projeto do sistema de amortecimento conforme recomendado pelo critério do “Parâmetro H/w” (seção 5.0 a seguir).

Como conclusão deste apanhado histórico, este Informe Técnico será direcionado a estudos e alternativas para o feixe mais comum especificado (4x954). Outras alternativas serão também sugeridas para os feixes 6x795 e 4x636.

3.0 APLICAÇÃO DE CONDUTORES AAAC E ACAR

Condutores tipo ACSR, com fios de alumínio 1350 e fios de aço, foram muito utilizados no Brasil nas linhas aéreas de transmissão de 500 kV, porém mais recentemente tem-se utilizado muito os cabos somente com fios de alumínio ligas 1350, 6201, ou 1120 (tipo AAAC – *All Aluminum Alloy Conductor*). Tem-se utilizado também os cabos chamados ACAR (*Aluminum Conductor Alloy Reinforced*), composto por fios 1350 e 6201, nas proporções usuais de 30/7 ou 18/19.

Na Copel e SPE's associadas, os cabos condutores de alumínio 1120 tem apresentado vantagens recentemente, sendo aplicados nos últimos 4 anos conforme mostra a Tabela 2.

TABELA 2 – Empreendimentos da Copel e SPE's, com condutores de alumínio liga 1120

Linha de Transmissão	Tensão (kV)	Extensão (km)	Condutor ou Feixe (MCM)	Formação x Diâmetro do Fio
Londrina - Figueira	230	92	673	37 x 3,42 mm
Ponta Grossa Norte - Figueira	230	140	876	37 x 3,91 mm
Londrina - Assis	500	120	4 x 823	37 x 3,79 mm
Bateias - Curitiba Norte	230	30	806	37 x 3,75 mm
Foz do Chopim - Realeza	230	51	823	37 x 3,79 mm
UHE Baixo Iguaçu - Cascavel	230	60	2 x 1155	61 x 3,50 mm
Assis - Paraguaçu Paulista, circuito duplo	230	2 x 42	673	37 x 3,42 mm
Salto Santiago - Itá - Nova Santa Rita	500	495	4 x 679	37 x 3,44 mm
Nova Santa Rita - Camaquã - Quinta	230	303	2 x 679	37 x 3,44 mm

O alumínio 1120 apresenta características que o posicionam entre o alumínio comum de liga 1350 (possui maior resistência mecânica que este), e o alumínio liga 6201 (possui melhor condutividade). Tais características ficam evidentes na Figura 2, que mostra as propriedades de condutores de seção transversal total de cerca de 1000 MCM. Percebe-se que, para a mesma resistência elétrica, obtém-se maior carga de ruptura com cabos que utilizam fios 1120, sendo um indicio de que condutores com este material podem apresentar melhores propriedades eletromecânicas quando aplicados em projetos de LT's.

Neste estudo serão demonstradas as vantagens do uso de um novo cabo ACAR, composto por fios de alumínio 1350 e 1120, como alternativa ao ACAR usualmente utilizado, de ligas 1350 e 6201. Além do fato de que pode-se esperar que os fios 1350 e 1120 apresentarão melhor desempenho combinado frente à corrosão do que 1350 com 6201, por haver menor diversidade de elementos na fabricação das ligas, questões importantes relativas ao projeto eletromecânico da LT advém do uso deste novo cabo ACAR, como será evidenciado a seguir.

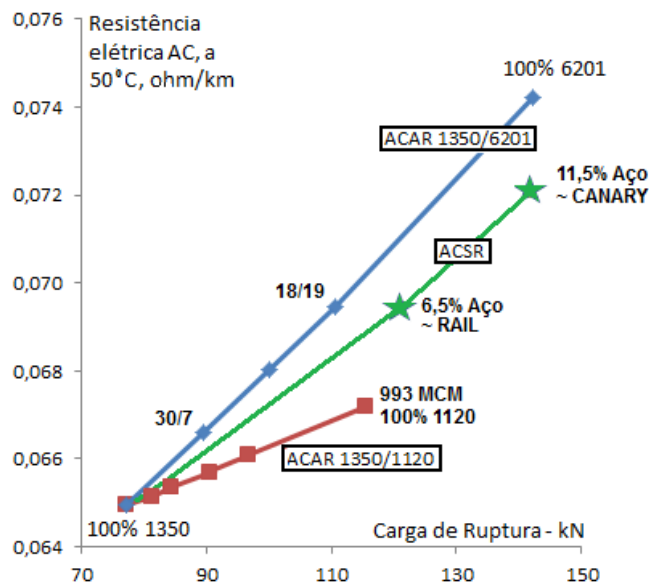


FIGURA 2 – Resistência elétrica e carga de ruptura de um condutor de seção total 1000 MCM (506 mm²)

A seleção de alternativas de condutores e feixes para linhas de transmissão requer aprofundamento dos estudos nas questões elétricas (seção 4.0) e questões mecânicas a serem impostas ao condutor (seção 5.0), como segue.

4.0 RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE CONDUTORES E CUSTO DE AQUISIÇÃO DO FEIXE DE CABOS

Um item básico a ser atendido num edital de leilão é o valor máximo da resistência elétrica de sequência positiva da LT (parâmetro R1), o qual está relacionado às perdas por aquecimento dos condutores. O parâmetro R1 depende essencialmente da resistência elétrica cabo condutor (valor de catálogo do fabricante), sendo porém dependente ainda da geometria dos feixes e das fases, e seu valor é calculado em *softwares* apropriados (ATP, etc.) .

Em corrente alternada, a resistência elétrica de um condutor é uma propriedade de difícil medição [6], sendo usualmente calculada, o que é amplamente estudado em [7]. Essencialmente a resistência do condutor é obtida a partir do cálculo de várias resistências em paralelo, uma para cada fio componente. Os fios apresentam comprimentos diferentes em função do encordoamento e da distância ao centro do condutor, porém esta é uma pequena parte das dificuldades de cálculo pois em seguida se necessitará de ajustes para contemplar, por exemplo, o efeito *Skin* e o efeito de proximidade.

Nos cabos ACSR, complicando ainda mais os cálculos, a resistência elétrica é afetada por fluxos magnéticos produzidos nos fios de aço, podendo haver grandes variações quando estes fluxos não são totalmente compensados internamente. Tais efeitos são mais evidentes em condutores ACSR com número ímpar de camadas de alumínio. A precisão dos cálculos pode ainda ser afetada por fatores adicionais de avaliação ainda mais complexa tais como as diferenças de temperaturas nas diversas camadas de fios, o contato superficial entre fios que depende do grau de oxidação e da tração mecânica do condutor, e variações longitudinais de temperatura ao longo do mesmo.

Em resumo, para uma análise mais precisa dos cabos ACSR, AAAC, ACAR com ligas 1350/6201 e ACAR com ligas 1350/1120, aplicados aos empreendimentos de leilões de linhas de transmissão, foi necessário implementar um programa de computador para o cálculo da resistência elétrica em corrente alternada, em função de um projeto inicial arbitrado para determinado cabo (formação, tipo de liga e diâmetro dos fios componentes).

Deste modo, definido um condutor ou feixe que atenda ao valor de R1 do edital, e que atenda também os requisitos de SIL, corona visual e temperatura de projeto, se conhecerá seu peso e assim, o custo de aquisição dos condutores do feixe. A influência do feixe sobre o custo das torres e fundações é avaliada a seguir.

5.0 “PARÂMETRO H / W” PARA O TRACIONAMENTO DE CABOS E EFEITOS SOBRE OS CUSTOS DA LT

O peso e diâmetro do condutor acima selecionado tem fortes implicações sobre o custo das torres e suas fundações. O primeiro reflete-se nas cargas verticais, e o segundo reflete-se nas cargas transversais devidas ao vento de rajada (que age sobre a seção transversal do feixe, diretamente proporcional à soma dos diâmetros dos condutores), a serem suportadas pelas torres e fundações.

O estudo dos efeitos mecânicos dos condutores sobre as torres e fundações requer ainda a avaliação das cargas axiais aplicadas aos cabos. Esta é inversamente proporcional à flecha dos mesmos e assim afeta diretamente a altura das torres necessárias e o custo da linha de transmissão.

A Tabela 3 apresenta o valor recomendado na NBR [3].

TABELA 3 – Cargas axiais máximas sem dispositivos de proteção contra vibração [3]

Condutor	% da carga de ruptura (EDS)
CAA (ACSR)	20
CA (AAAC liga 1350)	21
CAL (AAAC liga 6201)	18

Embora o critério da NBR seja explicitamente recomendado para uso sem dispositivos de vibração, tem sido utilizado de modo generalizado, inclusive em LT's de 500 kV com espaçadores-amortecedores. Ao aplicarmos este critério da Tabela 3, temos uma variável a mais nas avaliações de custos dos empreendimentos: a altura das torres necessárias para as diferentes alternativas de feixes, já que os percentuais da Tabela 3 levam a diferentes valores de flechas dos condutores. Isto torna um tanto complexas as comparações das diferentes alternativas, as quais somente poderão ser adequadamente avaliadas com a plotagem específica das torres sobre um perfil de terreno representativo.

No entanto, a utilização dos conceitos do chamado “Parâmetro H/w”, recentemente proposto por um grupo de estudos do Cigré [4], tende a eliminar ou reduzir esta dificuldade de análise, uma vez que, ao se utilizar o mesmo H/w (tração axial aplicada no cabo, dividida pelo seu peso/metro) para diferentes condutores, se estará considerando igualdade de flechas, pois na formulação teórica das equações dos cabos suspensos, esta relação é inversamente proporcional à flecha dos cabos.

Em outras palavras, o “Parâmetro H/w” admite que cabos tracionados com a mesma relação H/w terão o mesmo desempenho operacional e vida útil frente às vibrações eólicas, sendo H a tração axial do condutor quando novo, sob temperatura média do mês mais frio, e w seu peso unitário. Como resultado, este critério apresenta uma tendência de se poder aumentar as trações aplicáveis a cabos de menor carga de ruptura.

A Figura 3 apresenta os valores de H/w sugeridos para cabos singelos tipo ACSR, AAAC e ACAR, aplicáveis aos diversos tipos de terreno. Embora ainda hajam pequenas complicações para nossas análises de feixes alternativos pois, por exemplo, o H do critério não é o mesmo H da plotagem das torres (este é tomado como o condutor estando na temperatura de projeto, e não na temperatura média do mês mais frio), mesmo assim estas análises ficam mais facilitadas e pode-se esperar variações insignificantes de custos em função das alturas de torres para as diferentes alternativas que estaremos estudando a seguir.

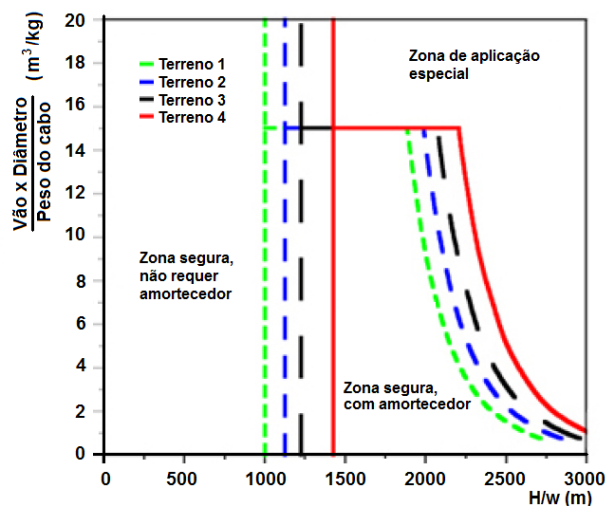


FIGURA 3 – H/w recomendado para cabos singelos

6.0 RESULTADOS DAS ALTERNATIVAS PARA 4x954 MCM

6.1 Esforços mecânicos transmitidos às torres e fundações

O feixe alternativo mais apropriado deverá atender tecnicamente ao edital de leilão, e apresentar o menor custo na avaliação conjunta do preço de aquisição dos condutores, das torres e suas respectivas fundações.

Assim sendo, este feixe deve apresentar resistência elétrica no máximo igual ao valor da Tabela 1 (0,0174 ohm/km, no caso do estudo de alternativas ao feixe 4x954 MCM), e deve apresentar ainda redução de peso, diâmetro dos condutores e tração axial no feixe sob vento máximo, já que estas três variáveis estão diretamente relacionadas às cargas verticais, transversais e longitudinais atuantes nas torres, e que influenciam diretamente seu custo (peso das torres) e o dimensionamento de suas fundações.

Utilizando-se a metodologia de cálculo descrita na seção 4.0, foram projetados feixes com 3 e com 4 cabos condutores, tipo AAAC, ACAR 1350/6201 e ACAR 1350/1120, com o requisito básico de atender à máxima resistência elétrica de sequência positiva da Tabela 1 (0,0174 ohm/km). Os condutores foram projetados variando-se a bitola do fio componente, tendo-se escolhido as formações 54/7 e 33/28, que juntamente com as formações 61/0 e 0/61 (representativas dos cabos AAAC) cobrem uma porção representativa da série de formações dos fios nos cabos ACAR. Poderia se considerar os cabos com 37 fios, estes de maior bitola, cujos resultados seriam similares.

O menor peso terá implicações no custo de aquisição do cabo condutor, uma vez que atualmente não há alteração no custo de cabos em função das diversas ligas. Além disto há reflexos menores no projeto das torres e das cadeias de isoladores de suspensão.

A menor soma dos diâmetros dos condutores terá forte implicação sobre o custo das torres de suspensão, usualmente em alinhamento ou com pequeno ângulo no projeto da LT, já que estas são as torres predominantes (da ordem de 90 %) e são fortemente dependentes das cargas transversais devidas aos ventos que incidem sobre a área transversal do feixe (diâmetro x vão).

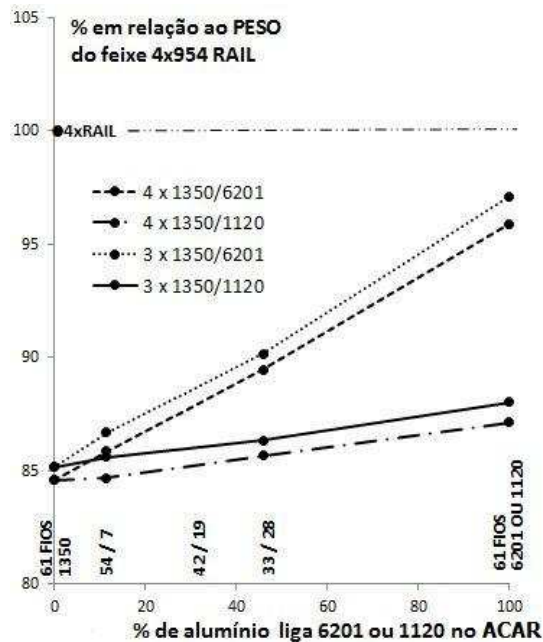


FIGURA 4 – Peso relativo de feixes c/R1<0,0174 Ω/m

A tração axial dos condutores terá maior influência sobre o projeto das torres de ancoragem e das suspensões em ângulo, e ainda sobre o dimensionamento das cadeias de ancoragem. Para a obtenção dessas cargas é

necessário definir a tração a ser imposta aos condutores na condição de maior duração (condição *EDS* – *Everyday Stress*), à luz do “Parâmetro H/w” conforme seção 5.0, minimizando assim a influência da variável *flecha* dos condutores.

Como resultados, os gráficos da Figura 4, 5 e 7 orientam quanto às cargas verticais, transversais e longitudinais impostas às torres, por cada alternativa de feixe considerada. Para a obtenção da Figura 5 considerou-se pressão de vento final nos condutores de 90 kgf/m^2 , valor típico da região do Paraná para a condição de limite de 50 % de carga de ruptura do condutor (com vento de 50 anos, usualmente mais crítico que vento de 250 anos e 70 % da carga de ruptura). Foram avaliados também os valores de 60 kgf/m^2 (MA,BA), 75 kgf/m^2 (MG,GO), 80 kgf/m^2 (SP, MS) e 110 kgf/m^2 (RS), porém não apresentados neste IT.

Analisando as Figuras 4 a 7, que resumem as implicações do uso de todos os feixes com condutores AAAC e ACAR, alternativos ao feixe tradicional com 4 condutores tipo ACSR Rail, 954 MCM, pode-se concluir:

- A Figura 4 mostra que o uso de condutores tipo AAAC reduz em até 15 % o peso de cabos e portanto, esta seria, em princípio a alternativa mais econômica do que condutores ACSR ou ACAR. No entanto, cabos AAAC podem apresentar outras implicações mostradas a seguir.
- O uso de cabos ACAR 1350/1120 leva a um menor peso de condutores quando comparado ao ACAR 1350/6201, chegando a 4 % de redução no caso da formação 33/28.
- A Figura 5 mostra que as cargas transversais devidas ao vento incidentes nas torres serão significativamente menores com feixes triplos, com reduções de até cerca de 15 % dependendo do condutor selecionado.
- A Figura 6 mostra que o uso de AAAC ou ACAR com pouco percentual de fios 6201 ou 1120, por possuírem menor carga de ruptura, e pela premissa deste estudo de se procurar manter as flechas eliminando assim esta variável das análises, levam à necessidade de se adotar um percentual mais significativo de tração dos condutores em relação à sua carga de ruptura, podendo chegar em torno de 26 % na condição *EDS*, em cabos AAAC.
- A Figura 7 mostra que as cargas axiais serão sempre menores com feixes triplos, com reduções da ordem de 15 % com feixe de 3 cabos AAAC, mesmo com o elevado percentual necessário na condição *EDS*, acima citado.
- O uso de condutores AAAC, ou ACAR com pequeno percentual de liga de alumínio, pode eventualmente levar à restrição de tração na condição com vento máximo de 50 %, o que em contrapartida, implicará na necessidade de se reduzir a tração da condição *EDS* para atender a esta condição. Em consequência desta exceção à aplicação do critério H/w, haverá acréscimo de flecha e portanto, custos adicionais devidos ao aumento na altura das torres. Tal situação torna-se crítica em regiões de maior intensidade de vento, e agrava-se com o uso de condutores de menor bitola, ou seja, em feixes com maior número de condutores.

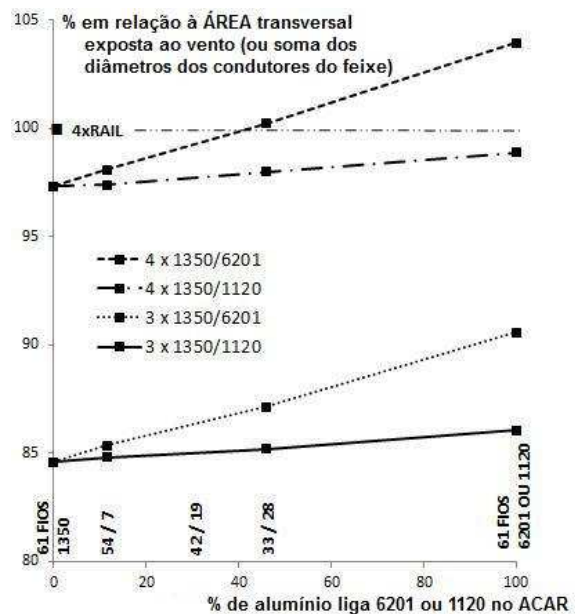


FIGURA 5 – Área relativa exposta ao vento, de feixes com $R1 < 0,0174 \text{ } \Omega/\text{m}$

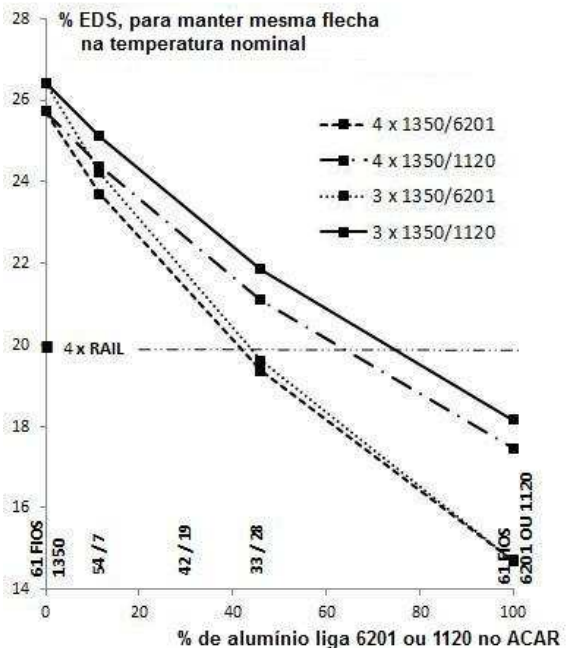


FIGURA 6 – Tração *EDS* de feixes c/ $R1 < 0,0174 \text{ } \Omega/\text{m}$

Conclusões desta seção:

Os itens acima apontam para uma solução com feixe triplo e cabos ACAR com composição mais equilibrada dos fios componentes, sendo sugerida a hipótese de feixe triplo com condutores ACAR de formação 33/28, e fios 1350 e 1120. A análise das figuras leva à conclusão de 14 % de redução no peso, 15 % nas cargas transversais e 15 % nas cargas longitudinais com tração *EDS* de 22 %, sendo que este percentual não representa um valor crítico ao projeto.

Uma pequena melhoria ainda poderia ser obtida utilizando-se o condutor equivalente AAAC, porém isto levaria à necessidade de se adotar tração *EDS* de 26 %, da qual se tem menor experiência prática, além da hipótese crítica de ventos de 50 anos acima citada, e possíveis limitações no vão máximo recomendado pelo critério do “Parâmetro H/w” (Figura 3).

Outra solução muito utilizada recentemente é o feixe com 4 condutores ACAR 30/7, que mostra-se uma boa escolha porém não tão eficiente, já que a consulta às figuras ($7/37 = \sim 19\%$ de alumínio 6201) indica 13 % de redução em peso, mas apenas 2 % nas cargas transversais e 5 % nas cargas longitudinais, com 23 % de tração *EDS*.

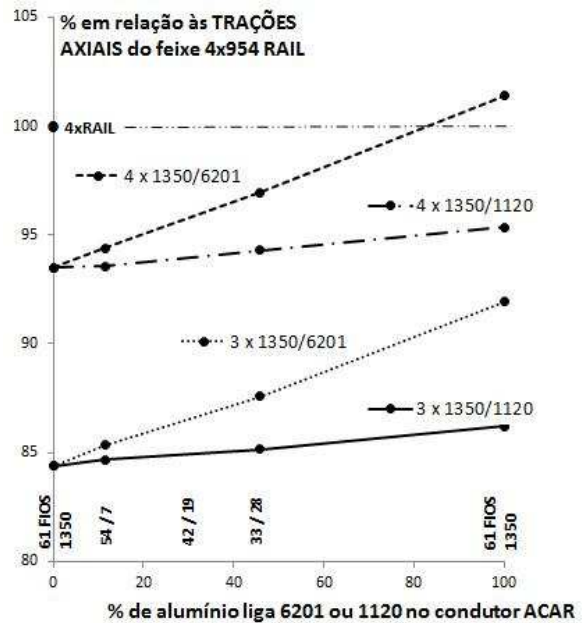


FIGURA 7 - Trações axiais relativas, de feixes com $R_1 < 0,0174 \Omega/m$

6.2 Feixe selecionado como alternativa ao feixe 4x954

O feixe acima selecionado corresponde ao cabo condutor de bitola 1330 MCM, tipo ACAR com 33 fios 1350 mais 28 fios 1120, como alternativa mais promissora ao feixe 4x954. A Tabela 4 mostra os valores de espaçamento entre condutores requerido no feixe para atingir o SIL correspondente, e os valores calculados relativos à verificação de corona visual e temperaturas de projeto.

TABELA 4 – Parâmetros calculados com feixe 3 x 1330 MCM

Espaçamento dos condutores no feixe	SIL	Campo elétrico superficial (E _{crv} = 19,5 kV/cm)	Temperatura para 3800 A (Tabela 1)	Ampacidade para 90 °C
457 mm	960 MW	17,5 kV/cm	75 °C	4500 A
750 mm	1040 MW	18,4 kV/cm		
1500 mm	1180 MW	19,4 kV/cm		

Foi apresentado o projeto do condutor e feixe aos principais fornecedores, dos quais o fornecedor *Nexans* preparou amostras e as encaminhou para ensaios mecânicos de Auto-amortecimento, Fluência, Eficiência, Potência Dissipada em Amortecedor, Ruptura e Tensão-Deformação no *Lactec* [8], e efetuou ensaios de corona visual e RIV no feixe de 750 mm, no *Cepel*. Todos os resultados foram satisfatórios nos aspectos analisados. Da mesma forma, os fornecedores de espaçador-amortecedor para este feixe com 750 mm efetuaram estudos e orçamentos. Na Figura 8 mostra-se um dos projetos apresentados.

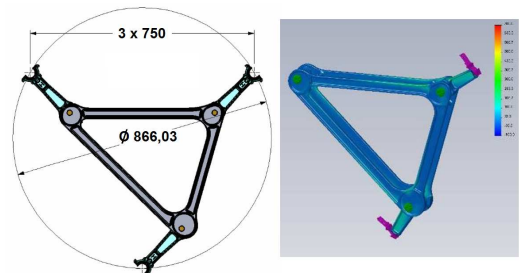


FIGURA 8 – Projeto do espaçador-amortecedor de 750 mm para 3 x 1330 MCM (Ref. *Forjasul*)

O custo de aquisição dos condutores deste feixe 3x1330 é cerca de 8% inferior ao feixe 4x954. Em complemento, foram efetuados estudos com plotagem de torres sobre terrenos típicos, apontando para ganhos da ordem de 8 a 10 % no peso (custo) das torres em relação aos projetos usuais de torres para o feixe 4x954 ACSR. Este percentual não chegou aos 15 % que se poderia concluir a partir da Figura 5, pois um aumento de 15 % no vão médio máximo implica no uso de torres mais altas, fato confirmado nas simulações.

Assim sendo, estima-se que a torre ideal para uso deste feixe seja a torre estaiada *monomastro* [9], por apresentar menor incremento de peso ao se aumentar a altura. Obviamente este ganho no peso (custo) das torres poderá ser otimizado no caso de se elaborar o projeto das torres especificamente orientado ao feixe 3 x 1330 ACAR.

O feixe triplo com 1500 mm de separação para se atingir o SIL da ordem de 1200 MW pode ser mais viável e estável com o uso de todas as cadeias em “V”, sendo o aumento de custo com as cadeias possivelmente compensado com a redução no dimensionamento mecânico das mísulas das torres.

7.0 ALTERNATIVAS PARA 6x795 e 4x636

De modo similar à análise acima, para as LT's de feixe 6x795 *Tern* ACSR pode-se prever como melhores alternativas os feixes com 5 condutores ACAR 18x1350/19x1120, 980 MCM com tração *EDS* 21 %, o qual conduz a 14 % de redução de peso dos condutores em relação ao feixe 6x*Tern*, 10 % de redução nas cargas transversais e 11 % de redução nas cargas longitudinais. Obtém-se SIL 1460 MW com 1,0 m entre condutores (largura do feixe ~1,6 m). Observe-se o recente precedente de LT com feixe de 5 condutores na Ucrânia, LT de 750 kV, Rivne – Kiev.

Outra hipótese seria feixe com 4 condutores ACAR 33x1350/28x1120, 1240 MCM com tração *EDS* 22 %, que conduz a 14 % de redução de peso dos condutores em relação ao feixe 6x*Tern*, 20 % de redução nas cargas transversais e 18 % de redução nas cargas longitudinais. O feixe requer 1,5 m entre condutores para se obter o SIL de 1460 MW.

Para LT's de feixe 4x636 *Grosbeak* ACSR pode-se mostrar que o feixe triplo expandido com 3x900 MCM AAAC liga 1120 é uma das melhores alternativas, com tração *EDS* 20 %, que conduz a 27 % de redução de peso dos condutores em relação ao feixe 4x*Grosbeak*, 17 % de redução nas cargas transversais e 21 % de redução nas cargas longitudinais. Porém, esta alternativa está no limite teórico de corona visual e portanto, ensaios preliminares podem ser requeridos.

8.0 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma análise da aplicação de condutores com alumínio ligas 1350, 6201 e 1120, que compõe os cabos AAAC e ACAR em suas mais variadas combinações, e discutidas as alternativas mais econômicas sugeridas para substituição aos feixes usuais de condutores ACSR 4x954, 6x795 e 4x636.

As melhores alternativas para os feixes de cabos 954 e 795 incluem o desenvolvimento de um novo cabo ACAR, com fios de alumínio 1350 e 1120. No caso de condutores 636, a melhor alternativa de feixe foi com condutor AAAC de alumínio 1120.

Para o feixe 4x954 foi projetado e testado elétrica e mecanicamente um feixe com três condutores de bitola 1330 MCM, ACAR com 33 fios 1350 e 28 fios 1120. Estima-se redução da ordem de 8 a 10 % no custo dos condutores, torres e suas fundações.

9.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] AS 1531, *Conductors - Bare Overhead - Aluminium And Aluminium Alloy, Australian Specification*
- [2] SS 424 08 14, *Aluminium Alloy Stranded Conductors For Overhead Lines – Al59 Conductors, Swedish Specification*
- [3] ABNT NBR 5422, Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão
- [4] CIGRÉ - Brochura 273, *Over Head Conductor Safe Design Tension With Respect to Aeolian Vibrations*
- [5] CIGRÉ - Brochura 207, *Thermal Behavior of Overhead Conductors*
- [6] HOFFMANN, J.N., MANNALA, M., Medição de Parâmetros Elétricos em Condutores de Linhas de Transmissão Sob Condições de Tracionamento e Temperatura Nominais de Operação, XX SNPTEE, 2009, Recife, PE
- [7] CIGRÉ - Brochura 345, *Alternating Current (AC) Resistance of Helically Stranded Conductors*

- [8] LACTEC, Ensaios em Condutor ACAR 1350/1120, 1330 MCM – Auto-amortecimento (DPME 2470/2014), Fluência (DPME 2469/2014), Eficiência e Potência Dissipada em Amortecedor (LECA 2471/2014), Ruptura (DPME 2277/2013) e Tensão-Deformação (DPME 2276/2013)
- [9] MACHADO, V.G. et al, Solução Estrutural Com Torre Estaiada Monomastro e Feixe Expandido, XIX SNPTEE, 2007, Rio de Janeiro, RJ

10.0 DADOS BIOGRÁFICOS



João Nelson Hoffmann é formado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná (1981), com mestrado na Unicamp (1993) e especialização em Formação Gerencial na Puc-PR (2003). Trabalha na Copel Geração e Transmissão SA, subsidiária integral da Copel - Companhia Paranaense de Energia - no Departamento de Engenharia de Linhas de Transmissão, sendo autor de diversos artigos técnicos relacionados a estudos eletromecânicos de Linhas Aéreas de Transmissão.



Freddy Rudi Möllhoff é formado em Engenharia Industrial Elétrica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2001). Trabalha desde 2006 na Copel Geração e Transmissão S.A., subsidiária integral da Copel - Companhia Paranaense de Energia - no Departamento de Engenharia de Linhas de Transmissão, atuando na fiscalização e gestão de contratos de obras de linhas de transmissão até 525 kV.



Marco Aurélio Jolandek é formado em Engenharia Civil na Universidade Federal do Paraná (1998). Trabalha desde 2008 na Copel Geração e Transmissão S.A., subsidiária integral da Copel - Companhia Paranaense de Energia - no Departamento de Engenharia de Linhas de Transmissão, atuando na área de projetos de fundações para linhas de transmissão, e na coordenação de empreendimentos até 525 kV.



André Hoffmann é formado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (2013). Fez estágio no Departamento de Pesquisas em Estruturas Civas do Lactec, em modelagens de torres para cálculo estrutural, instrutor da Isotech para os *softwares Plis-cadd* e *Tower*, trabalha na Fasttel Engenharia Ltda, na Gestão de Obras de Subestações até 525 kV e Linhas de Transmissão até 230 kV.