

# Construction of Transmission Lines Analysis using Aluminium Conductor Composite Core

G. V. Marconato  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria/RS, Brasil  
gustavovmarconato@gmail.com

M. Sperandio  
Departamento de Sistemas Elétricos de Potência  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria/RS, Brasil  
mauricio.sperandio@ufsm.br

**Abstract**— This paper brings a viability analysis of Aluminum Conductor Composite Core (ACCC) application in the construction of new transmission lines. Due to Brazil's geographical extensions and the load growth, it becomes necessary to improve the transmission systems using new technologies. In this scenario, the ACCC Conductors were compared with the widely used Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR) in terms of electromechanical and economical characteristics applied to new transmission lines. There were three different analyzed cases including conductors with the same radius, thousand circular mils and capacity. After comparing those cases it's clear the significant the benefits of using the ACCC conductors instead of ACSR. Besides that, a future analysis will show the impact of repowering existent transmission lines as a solution to improve transmission lines capacity without building new ones.

**Keywords**— *Aluminum Conductor Composite Core, Aluminum Conductor Steel Reinforced, Transmission Lines.*

## I. INTRODUÇÃO

No Brasil, a expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN) é feita por meio do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) e do Programa de Expansão da Transmissão (PET). A seleção de alternativas para os projetos de linhas de transmissão (LTs) é conduzida considerando o desempenho elétrico e socioambiental e o enfoque do mínimo custo global, que considera os custos referentes às perdas elétricas no sistema e os investimentos relativos às obras necessárias. Usualmente, são especificados os condutores de alumínio com alma de aço (ACSR), que fazem parte da grande maioria das linhas de transmissão já existentes no país. Porém, outras alternativas são possíveis, como a utilização de condutores de tecnologias diferentes desenvolvidas nos últimos anos em novas LTs ou até mesmo nas já existentes.

Os condutores de alta temperatura (HTC) são capazes de transmitir elevadas potências operando à 100 °C em regime permanente, ou até mesmo à 150 °C em situações de emergência [1]. Entre eles está o condutor ACSR, que teve seu desenvolvimento iniciado no começo do século XX [2], e desde então tem sido amplamente utilizado por possuir boas características de peso, carga de ruptura e custo. Recentemente, em 2002, surge o condutor ACCC, com distribuição comercial iniciada 3 anos depois. Esse, por sua vez, oferece um aumento de capacidade e temperatura de operação, associado à um menor peso e coeficiente térmico de expansão linear e tendo, portanto, uma redução de flecha, de acordo com [3] e [4].

Tendo em vista esse cenário, este artigo traz análises da construção de novas LTs utilizando o condutor ACCC em comparação ao ACSR, a fim de determinar qual é o mais vantajoso para os estudos de caso propostos.

Na Seção II será apresentada a construção física de cada um dos condutores. Já na Seção III deste artigo é apresentado em detalhe o equacionamento utilizado para o projeto de LTs proposto em [5]. Na seção IV são abordados os Estudos de Caso para a análise em questão. Na Seção V são discutidos os resultados obtidos através dos estudos e, por fim, na Seção VI são apresentadas as conclusões do trabalho.

## II. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS CONDUTORES

Os condutores possuem características construtivas distintas tanto no núcleo quanto no alumínio, o que é perceptível na Fig. 1. Os parâmetros de projeto de cada modelo de condutor foram disponibilizados pelo fabricante e serão utilizados nos cálculos da Seção V.



Fig. 1. Condutor ACSR (à esquerda) e ACCC (à direita). (Fonte: Kozen Cable)

### A. Aluminum Conductor Steel Reinforced

O condutor ACSR é produzido com filamentos circulares dispostos concêntricamente com uma ou mais camadas em torno de um núcleo de aço galvanizado. Esse pode possuir um ou mais filamentos e proteção contra corrosão. A composição descrita une a elevada resistência à tração do aço com a boa condutividade do alumínio a fim de suportar maiores esforços na instalação das linhas e fornecer a potência requerida.

Por estar no mercado há muitos anos, possuir tecnologia de produção já estabelecida e materiais usuais, estes condutores apresentam custo menor em relação ao ACCC e a outros disponíveis.

### B. Aluminum Conductor Composite Core

O condutor ACCC apresenta filamentos em formato trapezoidal de uma ou mais camadas de maneira a aproveitar melhor o espaço em torno do núcleo. Esse por sua vez é feito de fibra de carbono e fibra de vidro, característica a qual permite que a temperatura de operação chegue a 200°C. Ao aquecer, o alumínio dilata mais rapidamente, estando os esforços do cabo suportados pelo núcleo, que possui baixo coeficiente térmico de expansão e alta relação força/peso em relação aos outros condutores existentes atualmente. O resultado é a redução das flechas a altas temperaturas, conforme [6].

## III. ASPECTOS GERAIS DA MODELAGEM

### A. Linha de Transmissão

Para a representação das linhas de transmissão na elaboração de estudos e projetos, pode-se utilizar o modelo PI com os parâmetros impedância séries e admitâncias shunt, ilustrados na Fig. 2.



Fig. 2. Representação do circuito PI equivalente da LT.

Matematicamente, determina-se separadamente a resistência, a reatância indutiva e a susceptância shunt. A resistência em corrente alternada na temperatura de operação é dada em (1).

$$R_{top} = R_{25^\circ} \left( 1 + \alpha (t_{op} - 25^\circ C) \right) \Omega/km \quad (1)$$

Onde  $\alpha$  é o coeficiente de variação de resistência pela temperatura. O valor da resistência em  $\Omega/km$  é fornecida pelo fabricante. O valor da reatância indutiva é calculado utilizando as equações (2) e (3).

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \left( \frac{DMG}{RMG_L} \right) H/km \quad (2)$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \Omega/km \quad (3)$$

Onde DMG é a distância média geométrica entre fases e  $RMG_L$  é o raio médio geométrica indutivo. A susceptância shunt é calculada através das equações (4) e (5).

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,85418 \cdot 10^{-9}}{\ln \left( \frac{DMG}{RMG_C} \right) - \ln \left( \frac{H_m''}{H_s''} \right)} F/km \quad (4)$$

$$B_C = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C S/km \quad (5)$$

Onde  $RMG_C$  é o raio médio geométrica capacitivo e  $H_m''$  e  $H_s''$  determinam o fator de correção do efeito de solo.

### B. Ampacidade e Capacidade

A ampacidade é calculada a partir do equilíbrio térmico do condutor, sendo a seção do cabo um dos parâmetros de maior influência. Determina-se primeiro as equações de calor em (6), (7) e (8).

$$Q_{convecção} = 8,548 \cdot (v \cdot \varphi)^{0,448} W/m \quad (6)$$

$$Q_{radiação} = 178,25 \cdot 10^{-9} \cdot \epsilon \cdot \varphi \cdot ((273 + T_c)^4 - (273 + T_a)^4) W/m \quad (7)$$

$$Q_{solar} = P_s \cdot \varphi W/m \quad (8)$$

Onde  $v$  é a velocidade do vento,  $\epsilon$  a emissividade,  $T_c$  é a temperatura do condutor,  $T_a$  é a temperatura ambiente e  $P_s$  é a potência solar. A corrente máxima é, portanto, descrita em (9).

$$I_{m\acute{a}x(1)} = \sqrt{\frac{Q_{radiação} + Q_{convecção} - Q_{solar}}{R_{CA}}} A \quad (9)$$

Para  $n$  condutores no feixe, a corrente máxima está em (10) e a capacidade máxima da linha em (11).

$$I_{m\acute{a}x(n)} = n \cdot I_{m\acute{a}x} \cdot 0,8 A \quad (10)$$

$$S_{m\acute{a}x} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_{m\acute{a}x} VA \quad (11)$$

### C. Esforços Mecânicos e Flechas

Um condutor entre duas torres forma uma catenária, e a distância em relação ao ponto de mínimo (flecha) é determinada pela tração aplicada ao cabo durante a sua instalação, bem como seu peso. A flecha é calculada em (12), onde  $T_0$  é a tração aplicada nos pontos de ancoragem e  $p$  é o peso do cabo por metro; e em (13) é dada a tração axial.

$$F = \frac{A^2 \cdot p}{8 \cdot T_0} m \quad (12)$$

$$T_{axial} = T_0 + F \cdot p \text{ kgf} \quad (13)$$

### D. Aspectos Econômicos

O custo das perdas na LT em valor presente é calculado pelas equações (14) e (15).

$$F_p = 0,2 \cdot F_C + 0,8 \cdot F_C^2 \quad (14)$$

$$C_p = 8760 \cdot R_{CA} \cdot I^2 \cdot F_p \cdot CME \cdot \sum_{t=1}^N \frac{1}{(1+i)^t} \quad (15)$$

Onde  $F_C$  é o fator de carga, CME é o custo marginal de expansão,  $N$  é o período de análise e  $i$  a taxa de juros.

## IV. ESTUDO DE CASO

Para realizar a comparação entre os condutores ACCC e ACSR, foi tomada como base uma linha de transmissão com tensão de operação 345kV, comprimento de 100km, feixe de 2 condutores e raio 20cm, temperatura de operação 60°C. Já para o cálculo das perdas e seu valor econômico, considera-se um projeto no horizonte de 30 anos, com taxa de juros de 8,8% a.a. com Custo Marginal de Expansão (CME) de 193 R\$/MWh.

A Fig. 3 mostra o modelo de torre utilizada e a Tab. 1 as suas dimensões. Ainda sobre a LT utilizada, essa está sobre um terreno plano, considerando uma altura de segurança mínima entre solo e cabos 8m.

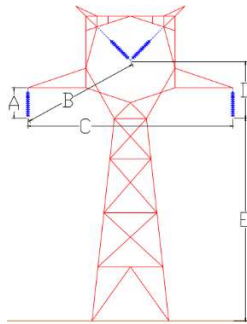


Fig. 3. Torre adotada para projeto.

TABELA I. DIMENSÕES DA TORRE ADOTADA

Variável	Dimensão (m)
A	2,19
B	8,36
C	14,63
D	4,03
E	29,81

Para comparar as características eletromecânicas e econômicas foram desenvolvidos três estudos de caso. O primeiro deles compara condutores de mesmo raio, dimensão que determina o padrão ASTM de nomenclatura, trazendo qual a mudança na capacidade da LT e seu custo com torres e perdas. Na segunda análise compara-se o mesmo do item anterior, porém para condutores de mesmo MCM, isto é, que possuem mesma área útil. Por último, confrontaram-se os cabos que possuem mesma capacidade de condução, a fim de comparar os custos com perdas e torres.

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro caso analisado utilizou 10 valores de raio diferentes para os 2 tipos de cabo, conforme Tab. 2.

TABELA II. RAIO E RESISTÊNCIA DOS CONDUTORES

	Raio externo (cm)	Resistência CA ( $\Omega$ /km)	
		ACSR	ACCC
Linnet	0,9145	0,1729	0,1307
Oriole	0,9410	0,1718	0,1283
Hawk	1,0895	0,1220	0,0923
Dove	1,1775	0,1050	0,0792
Grosbeak	1,2575	0,0918	0,0692
Drake	1,4070	0,0740	0,0554

Cardinal	1,5215	0,0624	0,0473
Bittern	1,7080	0,0481	0,0375
Lapwing	1,9100	0,0393	0,0315
Bluebird	2,2375	0,0300	0,0240

A Fig. 4 mostra a potência máxima que a LT suporta, como resultado do equacionamento da Seção II.

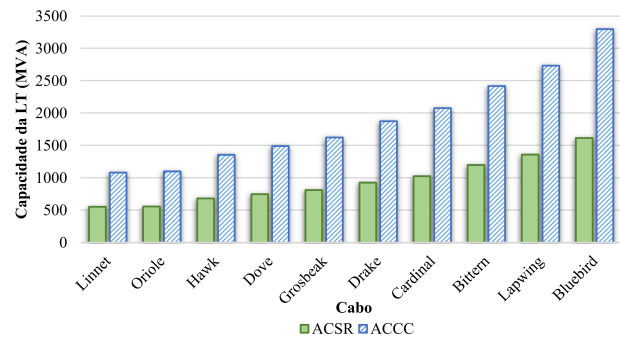


Fig. 4. Capacidade da LT em MVA para mesmo raio.

Pela Fig. 4 observa-se que a capacidade das linhas dobrou para um condutor de mesmo raio. Isso deve-se ao fato de os condutores ACCC terem uma menor resistência elétrica, pois apresentam maior área útil de alumínio devido ao seu núcleo reduzido. Além disso, esses condutores podem operar a até 180°C em regime permanente, contrário aos 100°C máximos dos condutores ACSR, podendo conduzir maiores valores de corrente.

Para este mesmo caso, tem-se na Fig. 5 o custo estimado com perdas e com torres.

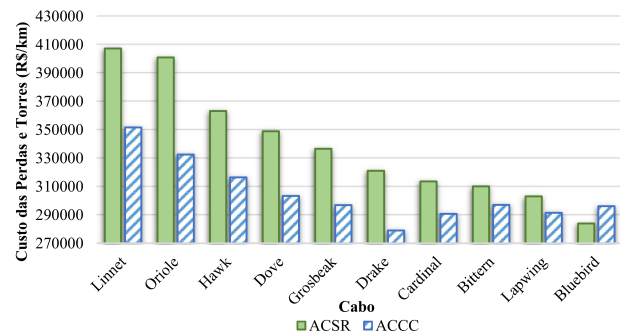


Fig. 5. Custo com Perdas e Torres para mesmo raio.

Também por consequência da menor resistência, o custo com perdas é reduzido nos condutores ACCC. Esses possuem carga de ruptura em média 20% maior que, atrelado ao seu menor peso, permite maior afastamento entre as torres sem violar a altura de segurança. Todavia, nos cabos Cardinal, Bittern, Lapwing e Bluebird, segundo a Fig. 5 tem-se um crescimento de custo no tipo ACCC, que deve-se à carga de ruptura que não aumenta proporcionalmente com o peso do cabo nas maiores seções. Com a utilização deste condutor tem-se em média uma economia de 12% do custo com torres e perdas.

O segundo caso analisado utilizou 8 valores de MCM diferentes para os 2 tipos de cabo, conforme Tab. 2. Buscou-se comparar os condutores de valores o mais próximo possível.

TABELA III. CASO 2 COMPARAÇÃO DE MCM

	Cabo	MCM	Cabo	MCM
ACSR	Ostrich	300,0	Ortolan	1033,5
ACCC	Pasadena	304,7	Curlew	1033,0
ACSR	Pelican	477,0	Bluejay	1113,0
ACCC	Waco	454,0	Corpus Christi	1103,0
ACSR	Osprey	556,5	Bobolink	1431,0
ACCC	Laredo	529,8	Beaumont	1428,6
ACSR	Grosbeak	636,0	Lapwing	1590,0
ACCC	Hawk	611,3	Bittern	1581,6

A Fig. 6 mostra a potência máxima que a LT suporta, como resultado do equacionamento da Seção II.

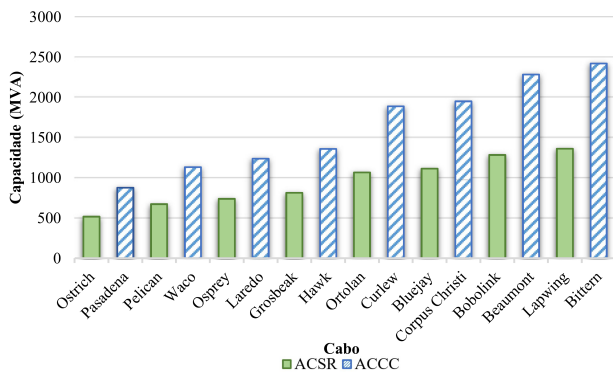


Fig. 6. Capacidade da LT em MVA para mesmo MCM.

Em termos de capacidade, como no caso 1 a potência máxima aumenta pela possibilidade de operar a LT em temperaturas de até 180°C. Porém o aumento da capacidade não é tão significativo quanto no caso 1, pois a resistência entre os condutores comparados é praticamente a mesma.

Para este mesmo caso, tem-se na Fig. 7 o custo estimado com perdas e com torres.

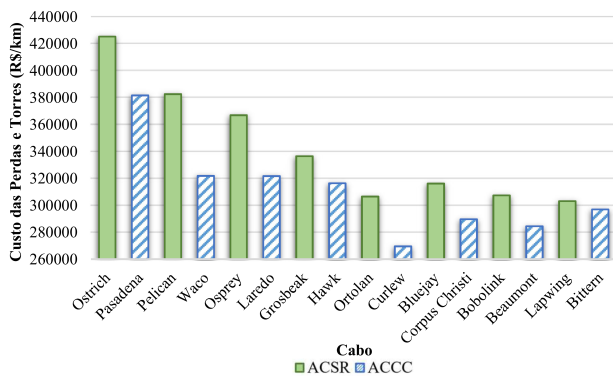


Fig. 7. Custo com Perdas e Torres para mesmo MCM.

Reduzem-se os custos pelos mesmos motivos do caso 1. Entretanto, neste caso a carga de ruptura é em média 22% maior, possibilitando maior espaçamento de torres. Com a utilização deste condutor tem-se em média uma economia de 9% do custo com torres e perdas, valor atraente visto que grande parte do custo da construção das LTs está nas torres.

Por fim, o último caso propõe a comparação de 7 valores de capacidade diferentes para os 2 tipos de cabo, conforme Tab. 2. Buscou-se comparar os condutores de valores o mais próximo possível. Na Fig. 8 mostra o custo com perdas e torres.

TABELA IV. CASO 3 COMPARAÇÃO DE CAPACIDADE

	Cabo	Raio (cm)	Capacidade (MVA)	Cabo	Raio (cm)	Capacidade (MVA)
ACSR	Drake	1,4072	926,8137	Pheasant	1,7551	1213,8512
ACCC	Pasadena	0,7825	875,5878	Laredo	1,0250	1236,3955
ACSR	Ortolan	1,5405	1064,6012	Lapwing	1,9075	1360,2143
ACCC	Linnet	0,9145	1082,1079	Irving	1,1200	1357,6882
ACSR	Bluejay	1,5989	1112,3135	Bluebird	2,2377	1614,5468
ACCC	Oriole	0,9410	1100,6608	Grosbeak	1,2575	1623,1702
ACSR	Finch	1,6421	1120,4168			
ACCC	Waco	0,9780	1130,1171			

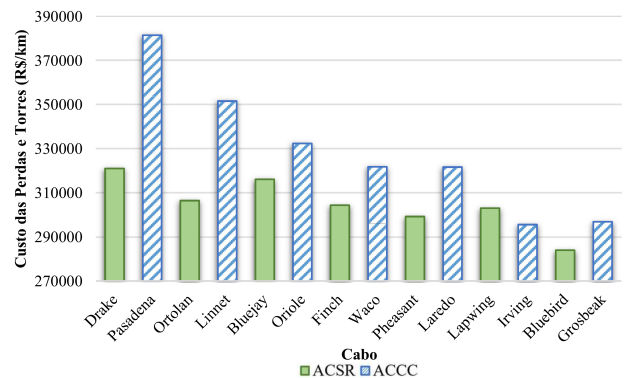


Fig. 8. Custo com Perdas e Torres para mesma Capacidade.

Nesta última análise, observa-se na Fig. 8 que não compensa utilizar o condutor ACCC, pois o custo se torna elevado. Um condutor desse tipo com um raio pequeno pode possuir a mesma capacidade de um ACSR maior, pois o ACCC opera em alta temperatura. Todavia a resistência do ACCC aumenta, e consequentemente cresce o custo com perdas. Além deste fator, acrescenta-se a necessidade de mais torres para o condutor de núcleo em compósito, pois para os modelos selecionados neste caso, a sua carga de ruptura é metade do condutor de núcleo de aço.

## VI. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma análise comparativa da construção de linhas de transmissão utilizando condutores de núcleo de aço e núcleo em compósito em termos de capacidade de transmissão e custo com perdas e torres.

Os 2 primeiros casos, comparando parâmetros de raio ou mesmo MCM, permitem o aumento da potência máxima de transmissão e reduzem os custos com perdas e torres. Em termos de raio pode-se estender a aplicação para linhas existentes, realizando a repotenciação de LTs, pois podem-se aproveitar as mesmas ferragens e demais estruturas. Para o último estudo de caso, não compensa trocar condutores pela mesma ampacidade, pois o condutor equivalente ACCC possui raio inferior e, portanto, resistência maior, trazendo consigo mais perdas. Deve-se, neste caso, realizar a seleção do condutor de acordo com o valor econômico envolvido nas perdas para cada condutor.

Este trabalho abre a possibilidade para estudos do impacto da implementação dos condutores ACCC no planejamento da expansão e nas tarifas de uso do sistema de transmissão hoje vigentes no Brasil.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao INCT-GD e aos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

## REFERÊNCIAS

- [1] Aluminum Electrical Conductor Handbook, Third Edition 1989, The Aluminum Association.
- [2] CIGRE: Results of the questionnaire concerning high temperature conductor fittings Task Force B2.11.03 2004.
- [3] Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC Conductors, CTC Global Corporation, 2011.
- [4] CTC Global, a subsidiary of Composite Technology Corporation: ACCC technology overview CTC web site: <http://www.ctcglobal.com>.
- [5] R. D. Fuchs, Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente, vol. 2. LTC/EFEI, 1977.
- [6] G. Migliavacca, Advanced Technologies for Future Transmission Grids, Springer, 2013.