

## **Reavaliação da Capacidade de Condução de Corrente dos Condutores de Rede de Distribuição**

**Francisco Busico Neto**  
AES Eletropaulo

francisco.busico@aes.com

**Ivo Teixeira Domingues**

AES Eletropaulo

ivo.domingues@aes.com

**Lamberto M. B. Beekhuizen**  
AES Eletropaulo

lamberto.beekhuizen@aes.com

**Jorge André Pregun**  
AES Eletropaulo

jorge.pregun@aes.com

### **Palavras Chaves:**

Capacidade de condução de corrente

Condutor

Reavaliação

### **RESUMO**

Determinar a capacidade de condução de corrente admissível nos condutores de Rede de Distribuição e os níveis recomendáveis de carregamento.

Reavaliar o critério de utilização do condutor de Alumínio nu 336,4MCM, para a finalidade de planejamento e projeto, visando uma abordagem conjunta do ponto de vista das perdas técnicas e dos demais equipamentos utilizados na rede de Distribuição.

Com a utilização deste novo critério para o condutor de alumínio nu 336,4 MCM, a AES Eletropaulo obterá uma economia de 50% nos investimentos no ano de 2008 e de 15% com o adiamento da execução da construção da Estação do Sistema de Distribuição (ESD) Eldorado, do quinquênio 2007-2012.

Conseqüentemente também obteremos um acréscimo de 100MVA de potência no sistema de Distribuição sem necessidade de investimentos.

## **1. INTRODUÇÃO**

Este Trabalho visa reavaliar o critério de utilização do condutor de alumínio nu 336,4 MCM para a finalidade de planejamento e projeto do sistema de Distribuição da AES Eletropaulo.

Através de uma abordagem conjunta do ponto de vista das perdas técnicas, da reavaliação das ampacidades dos condutores de Rede de Distribuição Aérea e Subterrânea e da avaliação dos equipamentos utilizados na rede de Distribuição, pretende-se definir novos parâmetros para operação do condutor 336,4MCM e subsidiar o planejamento do plano de obras do quinquênio 2007-2012.

Com a utilização deste novo critério para o condutor de alumínio nu 336,4MCM, a AES Eletropaulo obterá uma economia de 50% nos investimentos no ano de 2008 e de 15% com o adiamento da execução da construção da Estação do Sistema de Distribuição (ESD) Eldorado, do quinquênio 2007-2012.

Conseqüentemente também obteremos um acréscimo de 100MVA de potência no sistema de Distribuição sem necessidade de investimentos.

## 2. DESENVOLVIMENTO

Para a elaboração do plano de obras do quinquênio vigente, a AES Eletropaulo realiza diagnósticos de sua rede de Distribuição e Subtransmissão no intuito de planejar obras que as mantenham em altos níveis de confiabilidade e qualidade de atendimento. Um destes diagnósticos da rede de Distribuição contempla a adequação do carregamento dos circuitos do sistema de Distribuição dentro de patamares pré-definidos, de acordo com as características de cada componente destes, tais como disjuntor, condutores subterrâneos de saída, condutores aéreos, etc.

Até a conclusão deste trabalho o diagnóstico do carregamento de circuitos do sistema de distribuição admitia o seguinte: para os condutores aéreos nus de alumínio seção 336,4MCM carregamento máximo de corrente elétrica de 400A e como critério de planejamento 300 A; seção para o condutor de cobre subterrâneo utilizado nas saídas de Subestações Subterrâneas de 240mm<sup>2</sup>.

Através do presente trabalho ampliaremos os limites para:

Condutores aéreos nus de alumínio seção 336,4MCM o carregamento máximo passa a ser de 500A e 400A como critério de planejamento, sendo que para os circuitos aéreos operarem com estes limites há necessidade de recondutoramento das saídas subterrâneas das Subestações de 240mm<sup>2</sup> para 500mm<sup>2</sup> e substituição das Chaves Faca de capacidade de 400A, existentes em alguns circuitos, para Chaves Faca com capacidade de 600 A.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DOS CONDUTORES

A tabela 1 abaixo, mostra as características dos condutores padronizados na AES Eletropaulo.

**Tabela 1 - Condutores padronizados na AES Eletropaulo**

Bitola AWG / mcm	Nome	Seção (mm <sup>2</sup> )	Diâmetro (mm)	Resistência	Peso (kg / km)	Preço referência 2007
				(ohm/km)		(R\$/m)
336	TULIP	170,45	16,90	0,206	470,1	4,94
556	DAHLIA	281,98	21,75	0,125	778,6	8,24

### 2.2 AMPACIDADE DOS CONDUTORES AÉREOS

Os condutores de alumínio nú, durante períodos limitados, podem operar com correntes acima da econômica, desde que as mesmas estejam dentro dos limites tecnicamente recomendáveis. Nestes

períodos, eventuais acréscimos de perdas são compensados pela não interrupção do fornecimento dos consumidores. Estes períodos devem ser evitados e medidas devem ser tomadas para que estas operações dos circuitos sejam eliminadas.

Neste trabalho consideraram-se, as condições abaixo:

- Normal: Valores que devem ser utilizados em regimento contínuo e que apresentam o melhor custo benefício, o valor de temperatura do condutor adotado para o cálculo foi de 80°C, conforme recomendação do relatório do CODI (Comitê de Distribuição) - SCEI. 23.02, ainda que tal valor seja conservativo.
- Emergência: É definida como a temperatura na qual o condutor pode ficar submetido durante um certo número de horas(em geral 10.000 horas) na vida útil com perda de tração de ruptura de no máximo de 10%, neste estudo foi considerado a temperatura de 85°C .

Nos cálculos destas correntes foram adotadas:

- Normal: temperatura ambiente: 40°C;  
temperatura do condutor: 80°C;
- emergência : temperatura ambiente: 40 °C;  
temperatura do condutor: 85 °C;
- condutores novo: coeficiente de emissividade do condutor: 0,91;  
coeficiente de absorção do condutor: 0,23;
- condutores velho: coeficiente de emissividade do condutor: 0,50;  
coeficiente de absorção do condutor: 0,30.

Baseando-se nestas premissas foram calculadas, através da metodologia do documento técnico do CODI-19-04(Metodologia para determinação do carregamento ideal de Condutores e Transformadores de Distribuição) a capacidade de corrente de condutores nus, as correntes admissíveis dos condutores, que estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2: Correntes admissíveis dos condutores aéreos, em ampéres.**

Condutores	Condutores novos		Condutores velhos	
	Normal	Emergência	Normal	Emergência
336 MCM	554	587	500	525
556 MCM	776	821	685	728

### **2.3 AMPACIDADE DOS CONDUTORES SUBTERRÂNEOS**

Os condutores isolados das saídas das subestações devem ser especificados, considerando que as correntes admissíveis dos mesmos sejam compatíveis com as correspondentes especificadas para os condutores 336 MCM aéreo.

Para a definição da nova seção dos condutores das saídas das subestações, foram calculadas as correntes admissíveis de condutores isolados, através do programa CORAD – capacidade de condução de corrente de condutores isolados (programa da AES Eletropaulo), Tabela 3, considerando-se:

seção do condutor: 500 mm<sup>2</sup>;

condutores triplexados com condutores de cobre, isolamento de EPR, 8,7/15 kV;  
 seção da blindagem por fase: 32.19 mm<sup>2</sup>;  
 número máximo de circuitos por banco de dutos: 3;  
 dutos de PVC com diâmetro externo nominal de 140 mm, envelopados de concreto;  
 banco de dutos 3 x 3 de acordo com o padrão da AES Eletropaulo;  
 profundidade do banco de dutos (parte superior): 800 mm;  
 temperatura do condutor – condições normais: TC = 90 °C;  
 temperatura do condutor – condições de emergência: TC = 130 °C;  
 resistividade térmica do solo: 0.9 Km/W;  
 resistividade térmica do PVC: 6.0 Km/W;  
 resistividade térmica do concreto: 1.2 Km/W;  
 resistividade térmica do duto: 6.0 Km/W;

**Tabela 3: Correntes admissíveis dos condutores subterrâneos, em ampères.**

N.º CIRC/ BANCO	FC = 100%		FC = 75 %		FC = 60 %		FC = 50 %	
	TC 90 °C	TC 130 °C						
1/3x3	566	702	667	869	788	978	869	1074
2/3x3	489	605	579	765	681	842	765	944
3/3x3	440	544	519	695	613	758	695	860

Neste trabalho foi considerado para condutores subterrâneos fator de carga de 0,60 e para condutores nus fator de carga (0,675), neste caso utilizado para cálculo de perdas.

Para outras configurações de saídas das subestações, podem ser consultadas, as Tabelas 4 e 5, que consideram as saídas dos circuitos em banco de dutos, com dutos de PVC de diâmetros externos de 5” e 6”.

**Tabela 4: Correntes admissíveis dos condutores subterrâneos, em ampères.**

ELETRODUTO 6"									
BANCO	N.º CIRC. No BANCO	Fator de Carga (%)				Fator de Carga (%)			
		100	75	60	50	100	75	60	50
		TC = 90 °C CORRENTE (A)				TC = 130 °C CORRENTE (A)			
1X1	1	591	692	823	895	734	858	1022	1107
1X2	1	591	692	823	895	734	858	1022	1107
3X3	1	566	667	788	869	702	826	978	1074
2X2	2	489	576	681	759	605	713	842	938
3X3	2	489	579	681	765	605	716	842	944
2X2	3	420	496	585	665	520	615	724	821
2X3	3	435	515	606	684	538	635	749	847
3X3	3	440	519	613	695	544	642	758	860
2X3	4	402	476	560	635	496	587	691	782
3X3	4	408	483	568	643	505	597	703	795
2X3	5	359	421	500	570	438	519	610	695
2X4	6	338	397	471	542	418	496	582	665
3X4	7	320	383	446	520	399	474	556	637

3X4	8	299	356	416	485	375	445	522	597
3X4	9	283	336	394	453	352	418	490	564
3X4	10	268	319	373	432	333	396	464	536
3X4	11	254	303	354	413	317	378	441	513
4X4	12	244	290	340	394	305	364	425	493

**Tabela 5: Correntes admissíveis dos condutores subterrâneos, em ampères.**

ELETRODUTO 5"									
BANCO	N.º CIRC. No BANCO	Fator de Carga (%)				Fator de Carga (%)			
		100	75	60	50	100	75	60	50
		TC = 90 °C CORRENTE (A)				TC = 130 °C CORRENTE (A)			
1X1	1	591	690	823	888	733	855	1021	1098
1X2	1	591	690	823	888	733	855	1021	1098
3X3	1	566	667	788	869	702	826	978	1074
2X2	2	478	564	666	741	592	697	824	915
3X3	2	489	579	681	765	605	716	842	944
2X2	3	417	492	581	657	518	610	721	811
2X3	3	433	511	603	678	536	631	746	832
3X3	3	440	519	613	695	544	642	758	860
2X3	4	399	472	556	626	494	585	688	772
3X3	4	408	483	568	643	505	597	703	795
2X3	5	356	421	496	561	436	515	607	687
2X4	6	336	404	468	535	415	492	578	656
3X4	7	319	380	444	513	397	470	553	628
3X4	8	296	353	412	479	369	437	514	586
3X4	9	281	333	391	447	349	414	486	556
3X4	10	265	315	369	424	330	392	460	527
3X4	11	253	301	352	405	315	374	439	504
4X4	12	243	288	338	388	302	359	421	484

O padrão utilizado para a construção das novas ETD's (Estação Transformadora de Distribuição) na AES Eletropaulo é com dutos de 6".

## 2.4 CÁLCULO DAS PERDAS DE ENERGIA: PARÂMETROS CONSIDERADOS

Os cálculos referentes às perdas de energia foram elaborados considerando os seguintes parâmetros:

- e = custo da energia paga pela Eletropaulo: R\$ 0,099 R\$/KWh
- i = taxa de juros: 15,20 % a.a.;
- n = período de estudo: 19 anos;
- carga distribuída em "área retangular";
- resistência do condutor para ("cálculos das perdas") à temperatura de 75° C.
- fc = fator de carga considerado médio dos circuitos da Eletropaulo: 0,675
- fp = fator de perdas: 0,49

- I= corrente máxima considerada do condutores 336,4MCM: 495 A
  - 8760 = número de horas ano
- O fator de perdas foi calculado através da seguinte fórmula:

$$F_p = 0,3 \times F_c + 0,7 \times F_c^2$$

onde:

- Fp: fator de perdas;
- Fc: fator de carga.

- Custo operacional da rede, em R\$/km - C<sub>OP</sub>.

$$C_{op} = 3 \times C_{condutores} + CC_{per}$$

- C<sub>condutores</sub>: Custo de recondutoramento do condutores 336,4 MCM para o condutores 556,5 MCM (material + estruturas sem troca de poste) em R\$ / km
- CC<sub>per</sub> : Custo capitalizado das perdas, em R\$ / km;

- Custo anual das perdas nos condutores, em R\$/km - C<sub>per</sub>

$$C_{per} = 3 \times R \times I^2 \times 8760 \times e \times 10^{-3} \times f_p$$

- R : Resistência do condutores, em Ohm / km;
- I : Corrente no condutores, em ampères;
- e : Custo da energia, em R\$ / KWh;
- f<sub>p</sub> : Fator das perdas
- f<sub>dc</sub> : fator de distribuição de carga

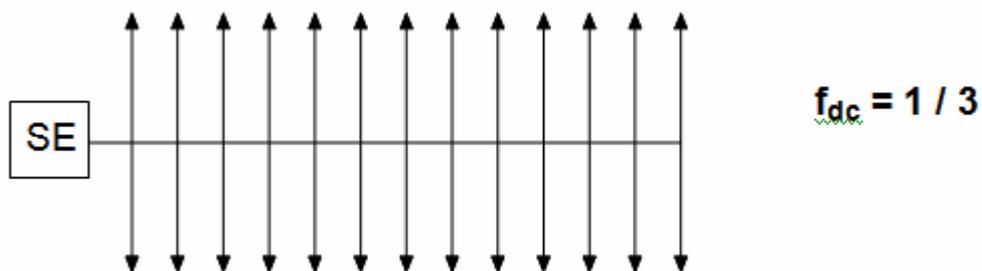
- Fator de perdas

$$f_p = 0,3 f_c + 0,7 f_c^2$$

- f<sub>c</sub> : Fator de carga

- Fator de distribuição de carga

- Carga distribuída em “área retangular”



- Custo capitalizado das perdas

Através da determinação do Valor Presente (VP)

$$VP = C_{per} \times Q$$

$$Q = r \frac{(1-r^n)}{(1-r)}$$

$$r = 1/1+i/100$$

n : número de anos de funcionamento do circuito considerado na análise

i : taxa de juros ao ano (%)

## 2.5 PREMISSAS ADOTADAS PARA O CÁLCULO DA PERDA DE ENERGIA ELÉTRICA

Na verificação das perdas técnicas do condutor 336,4 MCM foram consideradas, algumas premissas básicas, normalmente observadas nas redes atuais, conforme abaixo:

As áreas alimentadas pelos circuitos podem ser similares às adotadas no modelo correspondente a carga triangular crescente, ou seja, densidade de carga aumentando com o aumento no comprimento do alimentador.

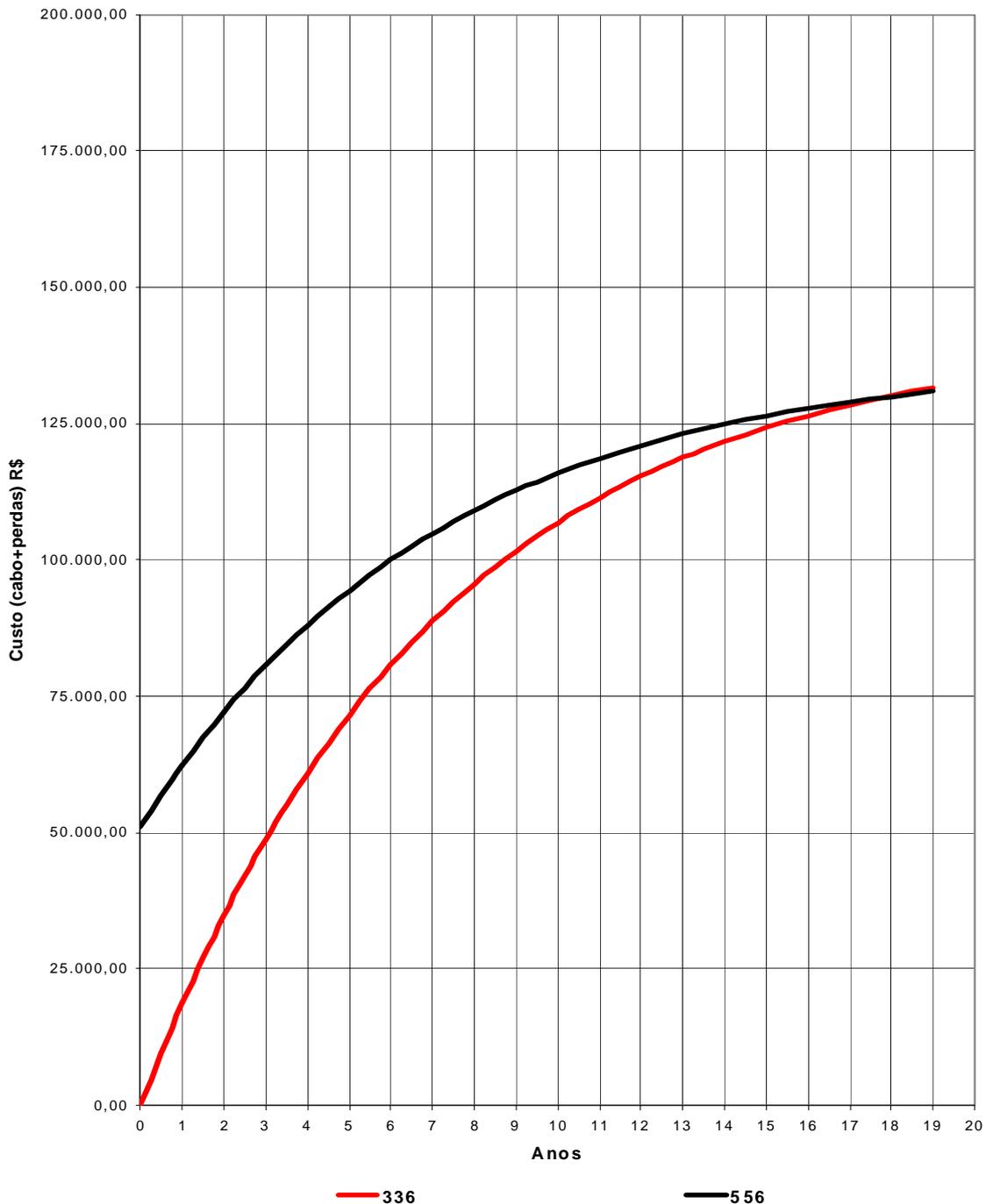
Por outro lado também existem áreas, onde as cargas, não são distribuídas uniformemente, havendo uma maior concentração de cargas nas proximidades da subestação, decorrentes da localização da mesma, o que implica em um modelo cuja densidade de carga decresce com o aumento no comprimento do alimentador.

Baseando-se nessas duas premissas, considerou-se adequado, para o cálculo das perdas utilizar o modelo de distribuição retangular uniforme de carga, ou seja, maior concentração de carga nas proximidades da subestação compensando o aumento da densidade de carga em função do comprimento do alimentador.

O gráfico 1 abaixo, mostra as perdas técnicas referentes a um condutor já em uso na rede de Distribuição seção 336,4MCM , comparado com a instalação de um novo condutor bitola 556,4 MCM, com o carregamento de 495 A.

No gráfico 1 verifica-se que a substituição do condutor 556,4MCM pelo condutor 336,4 MCM ao longo de 19 anos não é negocio, já que as perdas técnicas do condutor 556,4MCM neste nível de corrente 495 A, é mais dispendiosa.

#### ***GRÁFICO 1 – PERDAS X ANOS***



### 3. CONCLUSÕES

Conforme as premissas e parâmetros utilizados neste trabalho o condutor 336,4MCM comparado ao condutor 556,5 MCM, mostra-se com um valor de perda de energia menor ao longo tempo. A substituição do condutor 336,4 MCM para o condutor 556 MCM baseado em perdas técnicas não é economicamente interessante em função do retorno do investimento ser muito longo (vide gráfico 1).

Considerando os critérios vigentes na AES Eletropaulo com a capacidade nominal do condutor de alumínio seção 336,4MCM em cerca de 400 A, a situação de carregamento dos circuitos ficará conforme Tabela 6, abaixo:

- 129 circuitos com carregamento superior a 100%, acima de 400 A,
- 233 circuitos com carregamento entre 80 a 100% , entre 320 a 400 A
- 1004 circuitos com carregamento inferior a 80%, abaixo de 320 A

**Tabela 6 - Carregamento dos circuitos**

% Carregamento	Quantidade de circuitos
> 100%	<b>129</b>
80 a 100%	<b>233</b>
< 80%	<b>1004</b>

Nesta situação para atendimento dos circuitos com carregamento superior a 100%, há necessidade de investimentos em recondutoramento destes circuitos para uma bitola imediatamente superior, no caso o condutor 556,4MCM. Há necessidade também da substituição do condutor de 240mm<sup>2</sup> utilizado em saída de Subestação para um condutor superior, neste caso o condutor de cobre de 500mm<sup>2</sup> para compatibilização de capacidade de condução de corrente entre estes condutores, portanto os dispêndios seguem conforme abaixo:

R\$ 103,2 milhões (substituição pelo condutor 556,4MCM em 129 circuitos ) + R\$ 16,2 milhões (substituição pelo condutor de 500mm<sup>2</sup>)  
TOTAL = R\$ 119,4 milhões

Com aplicação do novo critério proposto, ou seja, a capacidade de condução de corrente do condutor 336,4MCM deverá ser considerada em cerca de 500 A, a nova situação de carregamento dos circuitos estará conforme Tabela 7:

Nesta nova situação teremos:

24 circuitos com carregamento superior a 100%, acima de 500 A,  
233 circuitos com carregamento entre 80 a 100% , entre 400 a 500 A  
1237 circuitos com carregamento inferior a 80%, abaixo de 320 A

**Tabela 7 – Novo carregamento dos circuitos**

% Carregamento	Quantidade de circuitos
> 100%	<b>24</b>
<b>80% a 100%</b> <b>(400 a 500A)</b>	<b>105</b>
< 80%	<b>1237</b>

Portanto os novos dispêndios seguem conforme abaixo:

R\$ 19 milhões (substituição pelo condutor 556,4MCM em 24 circuitos) + R\$ 16,2 milhões (substituição pelo condutor de 500mm<sup>2</sup>)  
TOTAL = R\$ 35,4 milhões

A economia estimada com a implantação deste novo critério totaliza R\$ 84 milhões, em redução de investimentos no quinquênio vigente.

#### **4. BIBLIOGRAFIA**

ROBBA, Ernesto João. Introdução aos sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. São Paulo, Ed. Edgar Blücher, 2005.

Standard handbook for electrical engineers. Ed. McGraw-Hill, 1993, p.4-59.

BUSICO, Francisco. Estudo de reavaliação da capacidade de Condutores de Redes de Distribuição. Estudo Eletropaulo, 2007.

CODI- Comitê de Distribuição – SCEI.23 02 - Definição dos limites de Carregamento Inicial, Final para condutores e Transformadores de Distribuição. 2005.