



Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Educação a Distância da UFSM – EAD
Universidade Aberta do Brasil – UAB

**Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos
Processos Produtivos**

Polo: Quaraí / 2014

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

ALVES, Daniel dos Santos¹

SALVADOR, César Addis Valverde²

BRONDANI, Michel³

1 Eng. Eletricista. Universidade Católica de Pelotas, Pelotas, RS.

2 Dr. Eng. Mecânica. Professor Orientador. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

3 Me. Eng. Química. Professor Coorientador. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise das perdas de energia em redes de distribuição de energia elétrica, com foco nas perdas por Efeito Joule no sistema primário de distribuição. Propõem-se duas possibilidades de redução de perdas acarretando conseqüente aumento da eficiência energética no transporte da energia das subestações até os consumidores finais. Essas possibilidades são o recondutoramento e a aplicação de bancos de capacitores. São efetuados estudos para um circuito alimentador real, existente na área de concessão da CEEE-D (Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica), onde são calculadas as perdas de energia atuais e comparadas com as perdas após o recondutoramento da rede e a instalação de um banco de capacitores no alimentador. Essa comparação teórica leva em conta aspectos técnicos e econômicos analisando a viabilidade financeira da aplicação dessas técnicas. Dessa análise resultou a viabilidade econômica somente na aplicação do banco de capacitores. O recondutoramento tem um custo muito elevado, apesar de aumentar a qualidade e a confiabilidade no fornecimento de energia.

Palavras-chave: Distribuição, Eficiência energética, Energia.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of energy losses in electricity distribution, focusing on losses by Joule Effect in the primary distribution system. Are proposed two loss reduction possibilities resulting therefore in an increase of energy efficiency in the transport of energy from substations to the final consumers. These possibilities are reconductoring and the application of a capacitor bank. Studies are made for a real feeder circuit, existing in the concession area of the CEEE-D, are calculated current energy losses and compared with losses after the reconductoring and installation of a capacitor bank. This theoretical comparison takes into account technical aspects and analyzes the financial viability of applying these techniques. From this analysis it the economic viability only in the application of capacitor bank. The reconductoring has a very high cost, while increasing the quality and reliability of

energy supply.

Keywords: Distribution, Energy, Energy efficiency.

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O mundo cada vez mais vem se tornando dependente da energia elétrica. Para quase todas as instalações o fornecimento de energia elétrica é um elemento essencial e um fornecimento confiável é imprescindível. Instalações como indústrias, centros de processamento de dados, provedores de internet, empresas de serviços de telecomunicações, hospitais, entre outros, dependem de energia 24 horas por dia, sete dias por semana. Nas nossas residências essa necessidade parece não ser tão premente, mas bastam alguns minutos sem energia para que sintamos a falta que a mesma faz em nosso dia-a-dia. Portanto devemos estar atentos à forma com que utilizamos a energia elétrica. Evitar todo tipo de desperdício pode contribuir para que a tenhamos sempre disponível.

Basicamente, os sistemas de energia elétrica podem ser divididos em três subsistemas: Geração, Transmissão e Distribuição. A energia é produzida nos geradores, componente básico do sistema de geração e transmitida através das linhas de transmissão chegando até os consumidores através das redes de distribuição das empresas concessionárias ou permissionárias do serviço.

Para que a energia gerada chegue com qualidade até o consumidor foram criados órgãos públicos que controlam e regulamentam o setor elétrico. A ONS (Operador Nacional do Sistema) deve garantir e controlar o suprimento de energia elétrica. Já a ANEEL regulamenta e fiscaliza as atividades do setor.

Toda essa energia que chega até nossas residências, indústrias, etc., como vimos, passa pelas redes de distribuição. Essas redes apresentam perdas intrinsecamente. A principal delas é o Efeito Joule. O presente trabalho objetiva analisar esse tipo de perda e propor alguma forma de minimizá-la já que não se pode extingui-la. Sabendo-se que o efeito Joule é devido basicamente ao tipo de material empregado nos condutores e a quantidade de corrente elétrica que circula

por eles, uma das possibilidades de eficientização energética é o recondutoramento. Segundo BIASOTTO (2009), o recondutoramento consiste basicamente na substituição dos condutores elétricos que transportam a energia por outros condutores com maior capacidade de condução de corrente. Outra possibilidade de ganho energético é com a aplicação de bancos de capacitores. Os capacitores propiciam uma redução da potência aparente, resultando em uma redução do módulo da corrente do circuito alimentador. Com essa redução de corrente obtém-se redução da perda por Efeito Joule.

Os circuitos de distribuição de energia elétrica podem ser divididos em três segmentos básicos: o Sistema de distribuição de alta tensão (SDAT), o Sistema de distribuição de média tensão (SDMT) e o Sistema de distribuição de baixa tensão (SDBT). Por todo esse “caminho” ocorrem perdas de energia. Este trabalho focou nas perdas no SDMT. O sistema de distribuição de média tensão (SDMT) consiste basicamente no que se conhece por “alimentadores” de distribuição.

Os alimentadores são circuitos com tensão nominal acima de 2,3kV que conduzem a energia desde as subestações até os transformadores rebaixadores em todas as localidades de abrangência da concessão.

Essa análise também levará em consideração aspectos econômicos os quais são indispensáveis em qualquer projeto de eficientização energética.

O problema de pesquisa consiste basicamente na avaliação da relação custo benefício para se tomar ações objetivando reduzir as perdas na distribuição de energia. Normalmente obras em redes de distribuição tem um custo elevado, com isso a redução de perdas precisa ser significativa para que se consigam resultados satisfatórios. As próprias concessionárias de modo geral relegam a eficiência de suas redes a um segundo plano, pois o próprio agente regulador reconhece na tarifa um nível de perdas aceitável. Por outro lado o agente regulador vem aumentando a cobrança com relação a qualidade da energia fornecida e algumas ações de eficiência contribuem também nesse quesito.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar formas de redução de perdas energéticas em circuitos alimentadores

de distribuição de energia elétrica (SDMT) e verificar a viabilidade econômica em implementá-las.

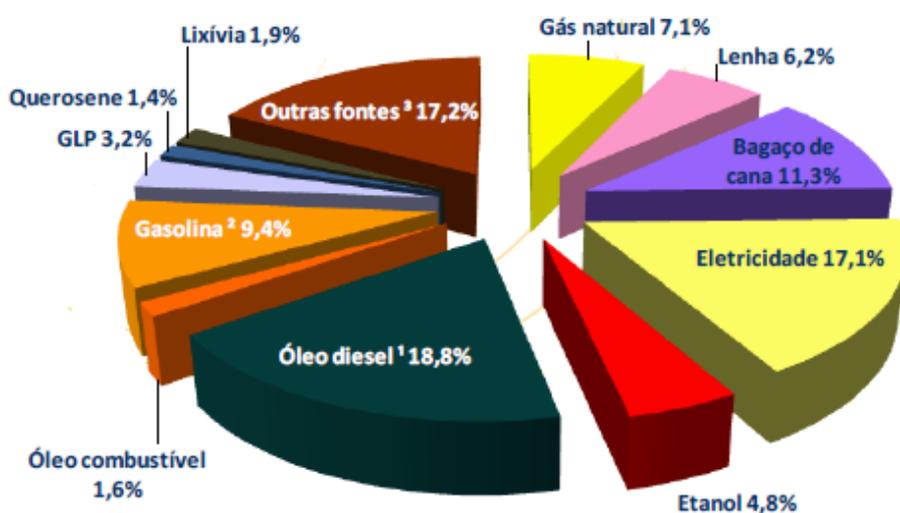
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar as perdas em um alimentador específico de uma concessionária de energia, propor as ações de recondutoramento e de aplicação de capacitores e analisar a viabilidade econômica da implantação dessas ações.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nos dias de hoje todos os estudos que contribuem para a conservação de energia justificam-se facilmente, pois vivemos em um mundo cuja demanda por recursos energéticos é crescente e algumas das principais fontes energéticas conhecidas apresentam sinais de sua finitude além de seus reflexos no meio ambiente. A distribuição de energia elétrica apresenta perdas que não podem ser desprezadas tendo em vista o montante de energia envolvida nesse processo.

Como se pode observar na Figura 1, a eletricidade responde por 17% de toda energia consumida no Brasil.



¹ Inclui biodiesel

² Inclui apenas gasolina A (automotiva)

³ Inclui gás de refinaria, coque de carvão mineral e carvão vegetal, dentre outros

Figura 1 – Consumo final de energia por fonte no Brasil em 2013.

Fonte: BEN (2014).

Segundo o BEN (2014) a energia gerada no Brasil no ano de 2013 foi de 609,9TWh.

Tabela 1 – Percentual de perdas de energia elétrica no Brasil em 2013.

Valores em TWh	2013	2012
E. Elétrica Disponibilizada¹.....	609,9	592,8
Consumo final².....	516,3	498,4
Perdas (comerciais + técnicas) ...	93,6	94,4
Perdas (%)	15,3	15,9

¹ Oferta interna de energia elétrica

² Consumo final de energia elétrica refere-se ao total: SIN + Isolados + Autoprodução

Fonte: BEN (2014).

Partindo dessas constatações, encontrar alternativas para aumentar a eficiência desse processo pode ser um caminho de grandes ganhos em termos de conservação de energia.

1.4 MOTIVAÇÃO

O fato de trabalhar em uma empresa concessionária de distribuição de energia elétrica e vivenciar situações problemáticas com relação às perdas de energia é um fator motivacional. Os conhecimentos adquiridos durante o curso somados ao estudo de técnicas de efficientização transformando-se em uma possibilidade prática é animador. O conhecimento solidificado proporciona um crescimento inegável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 APRESENTAÇÃO

As perdas de energia estão intrinsecamente ligadas à distribuição de energia elétrica ao longo de todo processo. Essas perdas são divididas em dois tipos: Perdas técnicas e Perdas não técnicas.

As perdas técnicas são causadas pelas características físicas dos materiais e equipamentos empregados nas redes de distribuição. A perda mais significativa, o Efeito Joule, pode ser resumido como o aquecimento nos materiais ao serem percorridos por corrente elétrica. Além do Efeito Joule, podemos citar ainda as perdas por histerese, correntes de Foucault e as fugas de corrente nos sistemas dielétricos.

As perdas não técnicas estão basicamente relacionadas ao furto de energia, seja por meio de fraudes em medidores ou por ligações clandestinas. As perdas por erros de faturamento também são consideradas perdas não técnicas.

O presente trabalho está focado na redução de perdas técnicas em circuitos alimentadores de distribuição de energia elétrica, os quais trataremos abreviadamente por SDMT (sistema de distribuição em média tensão). No PRODIST (2013) lemos: “As redes dos sistemas de distribuição são segmentadas segundo os níveis de tensão dos grupos SDAT (A1, A2 e A3), SDMT (A3a e A4)”. As tensões mais comuns no SDMT são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Tensões usuais no SDMT.

Tensões usuais no SDMT	
Tensão (kV)	
Padronizada	Existente
13,8	11,9
34,5	22,5
	23,1

Fonte: Adaptado de Kagan (2010).

2.2 INSTALAÇÃO DE CAPACITORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A instalação de bancos de capacitores no SDMT reduz o carregamento no transformador da subestação e no próprio alimentador proporcionando redução de perdas. Além disso, melhora a estabilidade do sistema e aumenta o nível de tensão da rede.

Segundo Mamede (2007), com relação ao fator de potência, vale lembrar que o consumo de energia reativa indutiva ocorre com maior frequência nas redes de distribuição se comparado ao consumo de energia reativa capacitiva. Esse consumo

é normalmente gerado por aparelhos dotados de bobinas, como motores de indução, reatores, transformadores etc. Pode-se até mesmo considerar que as próprias linhas de distribuição de energia elétrica são fontes de energia reativa devido a sua reatância. Já o consumo de energia reativa capacitiva se dá basicamente devido a motores síncronos superexcitados e capacitores. O controle do fator de potência objetiva evitar o transporte de energia reativa de terminais distantes da carga consumidora fazendo-se necessário, para isso, instalar fontes de energia reativa indutiva (capacitores) próxima aos terminais da mesma. Desta forma, reduzem-se as perdas na distribuição referente a esse bloco de energia resultando um melhor rendimento do sistema elétrico.

Short (2006) diz que “reduzindo o fluxo de potência reativa em linhas de distribuição reduzem-se significativamente as perdas”. Ele ainda sugere o uso da “regra dos dois terços” para localização do ponto ótimo da instalação dos capacitores.

A instalação de capacitores no SDMT vem sendo estudada há um bom tempo e inúmeros autores têm contribuído com o assunto. Na década de 1950 onde Neagle e Samson (1956 apud Short, 2006) desenvolveram uma abordagem para a instalação de bancos de capacitores em redes uniformemente distribuídas e mostraram que o local ideal é o ponto no circuito onde o fluxo de potência reativa é igual a metade da potência reativa do banco. A partir disso eles desenvolveram a “regra dos dois terços” para a seleção e aplicação de capacitores. Tal regra é resumida como segue: o tamanho do banco de capacitores ideal é $2/3$ do requisitado pelo circuito em var e o posicionamento ótimo é de $2/3$ da distância da subestação para o fim da linha.

Grainger e Lee (1981 apud Short, 2006) forneceram um método simples mas ideal para a locação de capacitores fixos com qualquer perfil de carga, não apenas uniformemente distribuída. A ideia básica é localizar o banco de capacitores no ponto do circuito onde a potência reativa é igual a metade da potência reativa do banco.

2.3 RECONDUTORAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O recondutoramento consiste na substituição dos condutores que transportam

a energia através das redes de distribuição de modo que, através da diminuição da resistência do condutor, reduzam-se as perdas por Efeito Joule. A substituição geralmente é feita de modo a se aproveitar ao máximo a posteação existente tendo em vista a redução do custo da obra.

As empresas concessionárias de distribuição de energia normalmente utilizam o recondutoramento em situações de manutenção, aumento da demanda de energia no SDMT no caso da entrada de um consumidor com alta demanda contratada ou no caso do crescimento vegetativo do consumo. O recondutoramento não é aplicado exclusivamente para reduzir as perdas. Trabalha-se para analisar essa viabilidade conforme citado anteriormente.

Conforme a norma técnica PTD-00.001 (2013), no âmbito da CEEE-D, as bitolas dos condutores padronizados para aplicação no SDMT em redes urbanas estão mostradas nas Tabelas 3 e 4:

Tabela 3 – Condutores de alumínio (CA).

Item	CÓDIGO CEEE-D	Seção		Código internacional	Formação do condutor		Ø Externo nominal mm	RMC kN	Massa total aproximada kg/km
		AWG/MCM	mm ²		Nº fios	Ø fios mm			
1	053400496	2	33,54	Iris	7	2,47	7,41	5,99	92,70
2	053400011	1/0	53,52	Poppy	7	3,12	9,36	8,84	147,60
3	053401450	4/0	107,41	Oxlip	7	4,42	13,26	17,01	296,10
4	053400976	336,4	170,48	Tulip	19	3,38	16,90	27,27	470,00

Fonte: Norma PTD-00.001 (2013).

Tabela 4 – Condutores de alumínio cobertura XLPE.

ITEM	CÓDIGO CEEE-D	Classe Tensão (kV)	Seção Nominal (mm ²)	Formação Condutor				Carga de ruptura mínima (daN)	Massa total aproximada (kg/km)	Corrente (A)	
				Nº. Fios mínimo	Ø Fios (mm)		Ø Externo (mm)				
					mín.	máx.	mín.				máx.
1	053245083	15	50	6	8,0	8,5	14,0	16,5	650	235	248
2	053245326	15	185	30	15,8	16,3	21,8	24,3	2405	695	581
3	053280211	25	50	6	8,0	8,5	16,0	18,6	650	385	247
4	053280245	25	150	15	14,0	14,5	22,0	24,6	1950	650	493

Fonte: Norma PTD-00.001 (2013).

Nas tabelas 5 e 6, seguem as especificações técnicas dos condutores nus e protegidos empregados no SDMT, respectivamente.

Tabela 5 – DataSheet Condutores CA (MCM).

Dados técnicos I

Bitola [kcmil]	N° aluminium wires	Diâmetro dos fios de alumínio [mm]	Diâmetro do condutor [mm]	Seção transversal do condutor [mm ²]	Massa aproximada [kg/km]	Tipo de cabo
250	7	4,801	14,4	126,72	349,4	Sneezewort
250	19	2,913	14,6	126,63	349,1	Valerian
266,8	7	4,961	14,9	135,31	373,1	Daisy
266,8	19	3,010	15,1	135,2	372,8	Laurel
300	19	3,193	16,0	152,14	419,5	Peony
336	19	3,381	16,9	170,58	470,3	Tulip

Dados técnicos II

Carga de ruptura [kgf]	Max. DC Resist. Cond. 20°C [Ohm/km]	Resistência elétrica máxima CA 60Hz 75°C [Ohm/km]	Raio médio geométrico [m]	Reatância indutiva [Ohm/km]	Reatância capacitiva [MOhm.km]	Ampacidade [A]	Tipo de cabo
2053.0	0,227	0,278	0,00523	0,3962	0,2355	430,0	Sneezewort
2111.0	0,227	0,278	0,00552	0,3921	0,235	430,0	Valerian
2192.0	0,212	0,26	0,0054	0,3938	0,2339	440,0	Daisy
2254.0	0,212	0,26	0,0057	0,3897	0,2334	450,0	Laurel
2487.0	0,189	0,231	0,00605	0,3852	0,2306	480,0	Peony
2789.0	0,168	0,206	0,0064	0,3809	0,2279	510,0	Tulip

Fonte: NEXANS (2014).

Tabela 6 – DataSheet Condutores protegidos 15kV.

Dados técnicos I

Seção transversal do condutor [mm ²]	N° aluminium wires	Diâmetro do condutor [mm]	Diâmetro Externo [mm]	Resistência à tração mínima [kgf]	Massa aproximada [kg/km]
35	7	7,1	13,6	464	190
50	7	8,2	14,7	663	235
70	19	9,7	16,2	928	315
95	19	11,5	18	1259	400
120	19	12,9	19,4	1591	500
150	19	14,2	20,7	1988	580
185	37	16,2	22,6	2452	695
240	37	18,4	24,9	3182	875
300	37	20,7	27,1	3977	1070

Dados técnicos II

Seção transversal do condutor [mm ²]	Max. DC Resist. Cond. 20°C [Ohm/km]	Resistência elétrica máxima CA 60Hz 70°C [Ohm/km]	Resistência elétrica máxima CA 60Hz 90°C [Ohm/km]	Ampacidade 70°C [A]	Ampacidade 90°C [A]
35	0,868	1,043	1,113	149.0	187
50	0,641	0,77	0,822	181.0	225
70	0,443	0,532	0,568	229.0	282
95	0,32	0,385	0,411	283.0	345
120	0,253	0,304	0,325	330.0	401
150	0,206	0,248	0,264	377.0	456
185	0,164	0,197	0,21	438.0	525
240	0,125	0,15	0,16	522.0	625
300	0,1	0,12	0,128	574.0	721

Fonte: NEXANS (2014).

2.4 CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS

O cálculo das perdas técnicas em redes de distribuição de energia elétrica é muito complexo devido a necessidade de se estabelecer os fluxos de potência da rede os quais requerem dados pontuais os quais muitas vezes as concessionárias não dispõem, além de haverem muitos fatores de difícil determinação, como por exemplo a fadiga dos condutores, problemas de conexões etc. Sabendo disso a ANEEL padronizou em 2008 através do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) a metodologia de cálculo das perdas técnicas de energia proporcionando à mesma algumas simplificações que facilitam e muito a obtenção dos resultados. Vale ressaltar que o PRODIST não trata apenas dessa questão, mas de toda normatização e padronização das atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Com relação às perdas de energia o PRODIST (2013) cita: “A perda de potência para a demanda média das redes do SDMT é calculada pelo modelo de regressão linear múltipla. Nesta modelagem, é necessária a definição do comprimento do condutor tronco e ramal, da resistência do condutor tronco e da corrente média no alimentador”.

Foi utilizada a metodologia definida no PRODIST para nossos cálculos de perda energia.

Metodologia do PRODIST:

A determinação da resistência total do condutor é obtida através da Equação (1).

$$RT^{SDMT} = \frac{\sum_{i=1}^N CT_i^{TRECHO} \times R_i^{TRECHO}}{CT^{SDMT}} \quad [ohm/km]$$

Eq. (1).

Onde:

RT^{SDMT} = Resistência do condutor [ohm/km];

N = Número de trechos com seção constante;

CT^{TRECHO} = Comprimento do trecho do condutor [km];
 R^{TRECHO} = Resistência do trecho [ohm/km];
 CT^{SDMT} = Comprimento total dos trechos do alimentador [km].

A corrente média (I^{SDMT}) é obtida considerando a energia fornecida pelo alimentador em MWh, e a tensão nominal de linha do alimentador, conforme a Equação (2).

$$I^{SDMT} = \frac{E^{SDMT}}{\sqrt{3} \times V_L \times \cos \phi \times 8,76} [A]$$

Eq. (2).

Onde:

I^{SDMT} = Corrente média no alimentador [A];
 E^{SDMT} = Energia fornecida [MWh/ano];
 V_L = Tensão nominal de linha do alimentador [kV];
 $\cos \phi$ = Fator de potência, estabelecido em 0,92.

A perda de potência para a demanda média do SDMT é obtida por meio da Equação (3).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 1,82 \times \ln(I^{SDMT}) + 0,77 \times \ln(CT^{SDMT}) + 0,39 \times \ln(RT^{SDMT}) + 0,16 \times \ln(CR^{SDMT})) \times 10^{-3} [MW]$$

Eq. (3).

Onde:

Δp^{SDMT} = Perda de potência para a demanda média do alimentador [MW];
 I^{SDMT} = Corrente média no alimentador [A];
 CT^{SDMT} = Comprimento do condutor tronco do alimentador [km];
 CR^{SDMT} = Comprimento do condutor ramal do alimentador [km];
 RT^{SDMT} = Resistência do condutor tronco do alimentador [km].

A partir da perda de potência, calcula-se a perda de energia. Para isso é necessário calcular o coeficiente de perdas, obtido da curva de carga do AL.

A Equação (4) calcula o coeficiente de perdas do alimentador.

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1 = CV^2 + 1$$

Eq. (4).

Onde:

CP_{SDMT} = Coeficiente de perdas;

σ = Desvio padrão da curva de carga do alimentador;

μ = Média da curva de carga do alimentador;

CV= Coeficiente de variação.

Com a Equação (5) chegamos às perdas de energia no SDMT.

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N \Delta p^{SDMT} \times CP_{SDMT} \times \Delta T [MWh]$$

Eq. (5).

Onde:

ΔE_{SDMT} = Perdas de energia no SDMT [MWh];

Δp^{SDMT} = Perda de potência para a demanda média do alimentador [MW];

CP_{SDMT} = Coeficiente de perdas (obtido da curva de carga do alimentador);

ΔT = Período de tempo analisado [h].

Segundo o PRODIST (2008), devem ser consideradas perdas adicionais de 5% sobre o montante de perdas técnicas, devido às perdas produzidas por efeito corona em conexões, sistemas supervisórios, por fugas de corrente em isoladores e pára-raios e etc.

Com a Equação (6), chegamos ao valor corrigido das perdas de energia.

$$\Delta E_{SDMT}(\text{corrigido}) = \Delta E_{SDMT} + 5\% [MWh]$$

Eq. (6).

3 METODOLOGIA

3.1 ESCOLHA DO CIRCUITO ALIMENTADOR ALVO DO ESTUDO

A CEEE-D possui na cidade de Pelotas quatro subestações transformadoras, as quais atendem também outros municípios limítrofes como Arroio do Padre e Capão do Leão e parte do município de Morro Redondo. As subestações possuem o total de 31 circuitos alimentadores. Dentre todos os alimentadores o único que possui a característica de ter em toda sua extensão o mesmo tipo de condutor e possuir toda a carga concentrada no final do circuito é o AL 43 da subestação PEL 4. Essas características do alimentador facilitam e corroboram para a obtenção do cálculo das perdas de energia com maior precisão, tendo em vista que o próprio agente regulador, a ANEEL, sabendo da dificuldade desses cálculos propõe um modelo aproximado.

3.1.1 Características do circuito alimentador

A Figura 2 apresenta a topologia do circuito alimentador escolhido.

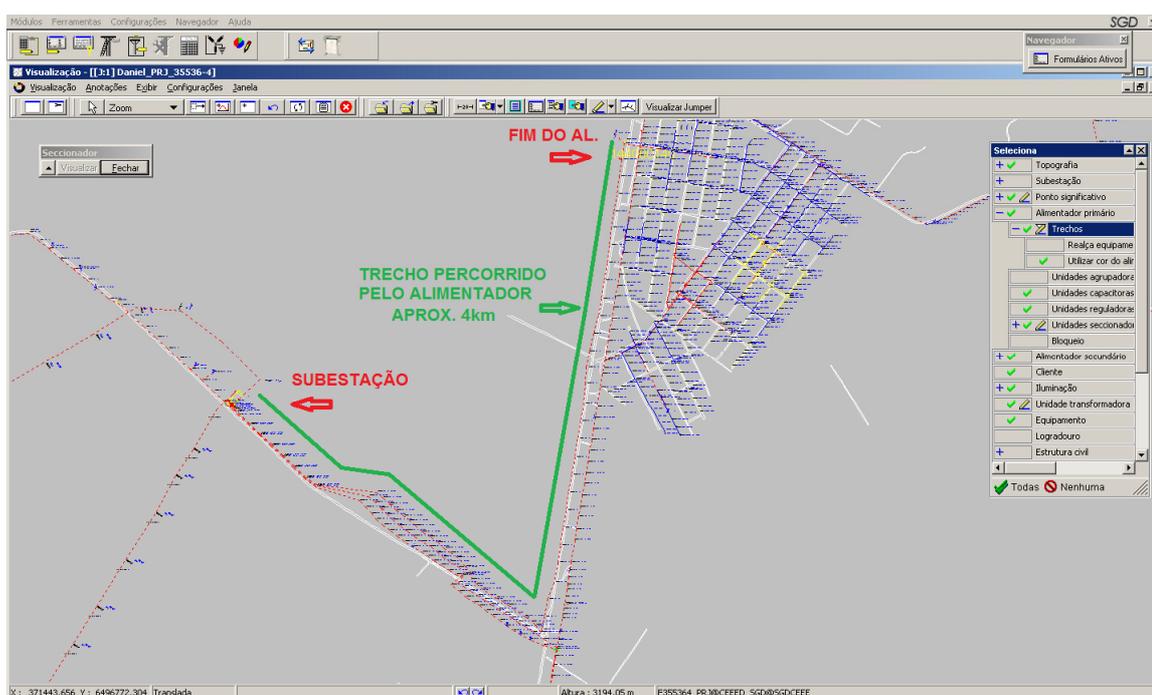


Figura 2 – Topologia do AL 43 da subestação PEL4.

Fonte: SGD (2014).

Dados técnicos:**Extensão:** 3920m;**Classe de isolamento:** 15kV;**Classe de tensão:** 13,8kV;**Quantidade de fases:** 3;**Limite operativo:** 400 A;

Tipo de condutores: 336,4MCM CA em toda extensão. Demais características conforme Tabela 3, item 4.

Curva de carga:

A Figura 3 apresenta a curva de carga do alimentador.

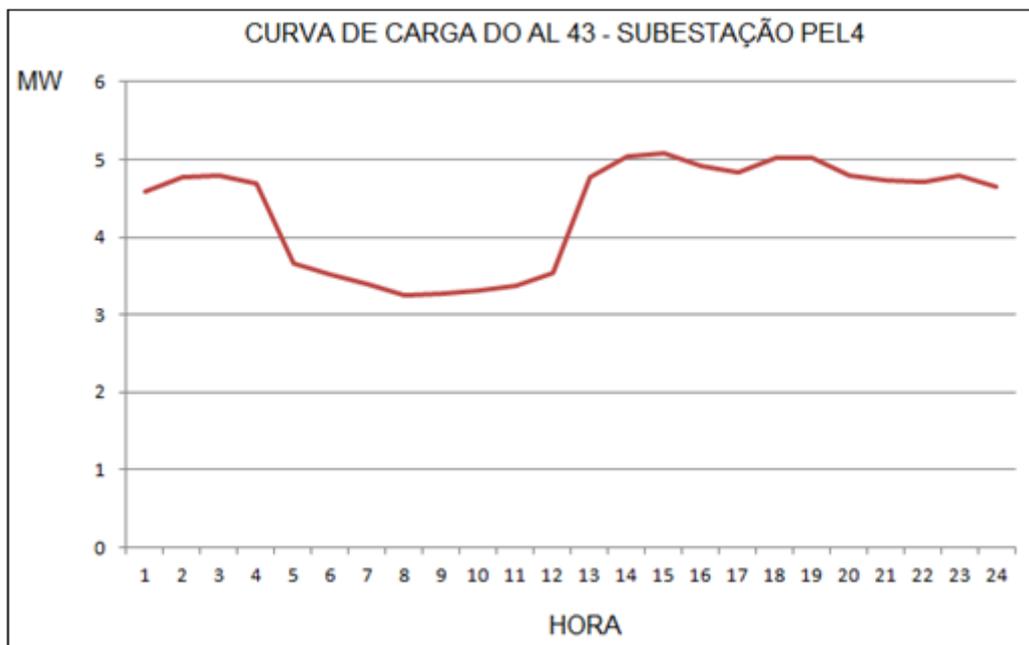


Figura 3 – Curva de carga do AL 43, subestação PEL4.

Formação dos condutores: Trifásico, singelo, em estruturas predominantemente do tipo N.

A Figura 4 mostra uma estrutura de sustentação dos condutores do alimentador.



Figura 4 – Foto de rede aérea com condutores singelos em estrutura tipo N.

3.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA FORNECIDAS

Os dados foram adquiridos através do COSD (Centro de Operação do Sistema de Distribuição da CEEE-D). Eles continham mais de um ano do histórico da média das potências ativa e reativa fornecidas por hora pelo alimentador.

3.2.1 Tratamento dos dados

Inicialmente os dados foram reduzidos a um período exato de um ano, do dia 13/10/2013 à 13/10/2014. Como o resultado das medições foi apresentado de hora em hora obtiveram-se 8760 registros.

Os dados foram analisados buscando-se identificar algum valor “*outlier*”, ou seja, algum dado discrepante que pudesse ser considerado com um erro, o que não foi encontrado, fortalecendo a confiabilidade dos dados.

Os dados foram “limpos” eliminando-se valores nulos, pois essa situação distorceria informações como médias e desvios padrão, chegando ao valor de 8708 medições.

Devido a grande quantidade de dados fez-se necessária uma ferramenta computacional para realizar alguns cálculos. Essa ferramenta foi o programa Excel, versão 2007, da Microsoft.

3.3 CÁLCULO DAS PERDAS NO ALIMENTADOR PARA A CONDIÇÃO ATUAL

Sabendo-se que o tipo de condutor existente no AL é o 336,4MCM e com auxílio da Tabela 5 chegamos ao valor da resistência do mesmo que é de 0,206 ohm/ km.

Conhecendo-se também a extensão do alimentador, calculou-se a resistência média do alimentador através da Equação (7).

$$RT^{SDMT} = \frac{\sum_{i=1}^N CT_i^{TRECHO} \times R_i^{TRECHO}}{CT^{SDMT}} \quad [ohm/km]$$

Eq. (7).

$$RT^{SDMT} = \frac{\sum_{i=1}^1 3,920 \times 0,206}{3,920} = 0,206 \quad [ohm/km]$$

Evidencia-se que como há apenas um “trecho” de rede, a resistência média do alimentador é a própria resistência do condutor.

De posse da energia fornecida pelo alimentador ao longo de um ano, calculamos sua corrente média, por meio da Equação (8).

$$I^{SDMT} = \frac{E^{SDMT}}{\sqrt{3} \times 13,8 \times 0,92 \times 8,76} \quad [A]$$

Eq. (8).

$$I^{SDMT} = \frac{37921,3}{\sqrt{3} \times 13,8 \times 0,92 \times 8,76} = 196,857A$$

Sabendo-se a corrente média calculamos a perda de potência para a

demanda média do alimentador com a Equação (9).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp (-6,34 + 1,82 \times \ln(I^{SDMT}) + 0,77 \times \ln(CT^{SDMT}) + 0,39 \times \ln(RT^{SDMT}) + 0,16 \times \ln(CR^{SDMT})) \times 10^{-3} [MW]$$

Eq. (9).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp (-6,34 + 1,82 \times \ln(196,857) + 0,77 \times \ln(3,920) + 0,39 \times \ln(0,206) + 0) \times 10^{-3} [MW]$$

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp (-6,34 + 9,614 + 0,77 \times 1,366 + 0,39 \times -1,5799 + 0) \times 10^{-3} [MW]$$

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp (3,71) \times 10^{-3} = 0,0388 MW$$

Com a perda de potência para a demanda média obtêm-se as perdas de energia no alimentador. Porém primeiramente é preciso calcular o coeficiente de perdas do alimentador utilizando a Equação (10).

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1 = CV^2 + 1$$

Eq. (10).

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{1,3008}{4,3547}\right)^2 + 1 = 0,2987^2 + 1 = 1,0892$$

Com a Equação (11) calculamos a perda de energia.

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N \Delta p^{SDMT} \times CP_{SDMT} \times \Delta T [MWh]$$

Eq. (11).

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N 0,0388 \times 1,0892 \times 8760 = 370,2 [MWh]$$

Considerando 5% de acréscimo nas perdas de energia através da Equação (12), temos a energia perdida por ano no alimentador.

$$\Delta E_{SDMT}(\text{corrigido}) = \Delta E_{SDMT} + 5\% = 388,71 \text{ [MWh]}$$

Eq. (12).

3.4 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES

Potências reativas verificadas no alimentador durante o período apurado:

Máx. MVAR = 3,43;

Mín. MVAR = 0,1;

Média MVAR = 0,97.

3.4.1 Definição da potência reativa do banco de capacitores

No âmbito da CEEE-D são padronizadas apenas duas potências para bancos de capacitores a se aplicarem no SDMT, são elas: 600 ou 1200 kVAR. Quanto a operação, os mesmos podem ser fixos (permanentemente ligados) ou controlados. Os bancos podem ser controlados por: nível de tensão, nível de corrente, potência reativa ou por horário. Partindo da limitação na questão da potência disponível dos bancos fez-se necessária uma análise apurada dos valores de potência reativa medidos ao longo do período, de modo que se pudesse indicar a melhor opção. Devido aos valores de potência reativa apresentarem significativa variação, sem dúvida, a aplicação do banco necessita de um circuito de comando. Com ele é possível acionar o banco conforme a potência reativa demandada, ou seja, quando a potência reativa estiver abaixo do patamar dos 600 kVAR o banco pode ser desligado evitando uma elevação do nível de tensão do alimentador. Já com a potência acima dos 600 kVAR pode-se acionar um módulo de 600 kVAR e com a potência acima da casa dos 1200 kVAR o comando pode acionar os dois módulos de 600 kVAR simultaneamente. É fato que o comando encarece significativamente a instalação, mas garante a melhor condição operacional em termos de nível de tensão.

3.4.2 Definição do ponto ótimo para a instalação do banco de capacitores

Como o alimentador tem a característica de ser “expresso”, ou seja, a carga concentra-se no final do mesmo, a locação ótima do banco é facilitada tendo em vista que nesses casos a melhor posição é o quanto mais próximo da carga que é quem demanda a circulação de reativos na rede.

3.4.3 Cálculo da corrente média do alimentador após a instalação do banco de capacitores

A corrente média no alimentador após a instalação de banco de capacitores foi calculada a partir da seguinte Equação (13).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i [kW]}{\sqrt{3} \times VL [kV] \times \cos \phi_i} \right)}{N} = 183,45 \text{ A}$$

Eq. (13)

Onde:

N = número de registros das potências ativa e reativa ao longo do ano (8708).

P_i = potência ativa medida;

VL = tensão de linha nominal (13,8kV);

cos φ_i = fator de potência medido;

3.4.4 Cálculo das perdas no alimentador após a instalação do banco de capacitores

Utilizando a metodologia já mencionada, calculamos as perdas de energia no alimentador após a instalação do banco de capacitores através das Equações (14), (15), (16) e (17).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp \left(-6,34 + 1,82 \times \ln(I^{SDMT}) + 0,77 \times \ln(CT^{SDMT}) + 0,39 \right. \\ \left. \times \ln(RT^{SDMT}) + 0,16 \times \ln(CR^{SDMT}) \right) \times 10^{-3} [MW]$$

Eq. (14).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 1,82 \times \ln(183,45) + 0,77 \times \ln(3,920) + 0,39 \times \ln(0,206) + 0) \times 10^{-3} [MW]$$

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 9,614 + 0,77 \times 1,366 + 0,39 \times -1,5799 + 0) \times 10^{-3} [MW]$$

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 9,485 + 1,05189 - 0,61615 + 0) \times 10^{-3} [MW]$$

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(3,58) \times 10^{-3} = 0,0341 MW$$

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1 = CV^2 + 1$$

Eq. (15).

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{1,3008}{4,3547}\right)^2 + 1 = 0,2987^2 + 1 = 1,0892$$

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N \Delta p^{SDMT} \times CP_{SDMT} \times \Delta T [MWh]$$

Eq. (16).

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N 0,0341 \times 1,0892 \times 8760 = 325,36 [MWh]$$

E finalmente a energia perdida corrigida.

$$\Delta E_{SDMT}(\text{corrigido}) = \Delta E_{SDMT} + 5\% [MWh]$$

Eq. (17).

$$\Delta E_{SDMT}(\text{corrigido}) = \Delta E_{SDMT} + 5\% = 341,63 [MWh]$$

A energia conservada com o banco de capacitores foi calculada com a Equação (18).

$$EE = \Delta E_{SDMT} - \Delta E_{SDMT}(\text{com BC}) = [MWh]$$

Eq. (18).

$$EE = \Delta E_{SDMT} - \Delta E_{SDMT}(\text{com BC}) = 388,71 - 341,63 = 47,08 \text{ [MWh]}$$

Para a determinação do valor economizado com redução das perdas é necessário saber o custo da energia, ou seja, o custo do kWh pago pelas concessionárias. Esse valor é variável para cada contrato de concessão além da diferente carga tributária aplicada pelos Estados da Federação. O calor elevado, o aumento de consumo de energia elétrica e principalmente a forte estiagem estão afetando os reservatórios das hidrelétricas e com isso existe a necessidade de utilização das usinas termelétricas, as quais tem um custo de produção de energia mais elevado. Por esse motivo foi criado pela ANEEL o sistema de bandeiras tarifárias que entrará em vigor em 2015, o qual dependendo da condição de geração de energia elétrica pode aumentar o valor final da fatura de energia.

Diante de tantas variáveis considerou-se como custo o valor homologado pela ANEEL para a tarifa da CEEE-D, através da resolução homologatória N° 1811, publicada em 24/10/2014, para os consumidores atendidos em baixa tensão.

Tabela 7 - Valor do kWh.

Classe	Valor do kWh
Residencial até 50 kWh	0,312570
Residencial > 50 kWh	
Industrial (reconhecido pela SEFAZ)	
Comercial	
Poder Público	

Fonte: Adaptado de: <http://www.ceee.com.br>

O custo da energia conservada com o BC (anual) foi calculado com a Equação (19).

$$CEC_{BC} = \text{Energia conservada [kWh]} \times \text{Custo da energia [R\$/kWh]}$$

Eq. (19).

$$CEE = 47080 \times R\$ 0,31257$$

$$CEE = R\$ 14715,79$$

3.4.5 Custos da aplicação do banco de capacitores

Para o cálculo do custo da instalação de um banco de capacitores automático de 1200 kVAR foi utilizado o software SGD, versão 6.5.22.2. A Figura 5 ilustra o projeto do banco de capacitores.

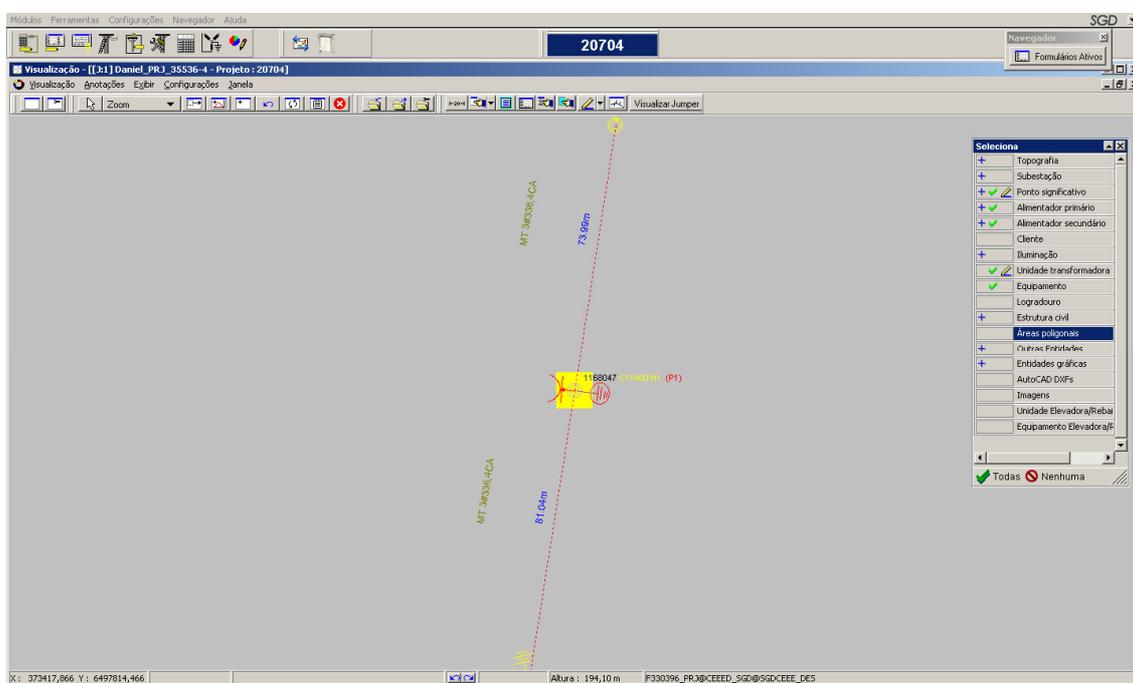


Figura 5 - Projeto de aplicação de BC de 1200kVAR.

O custo é baseado no preço dos materiais e na mão-de-obra, sendo os resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9, respectivamente.

Tabela 8 - Orçamento de materiais para um BC de 1200kVAR.

Pág. 1		Orçamento de Materiais		31/10/2014 16:48:31			
Projeto: 20704 - INSTALAÇÃO DE BC		Expediente: 2014 - 99999		Em Planejamento			
Motivo da Obra: CAPACITOR							
Material	Descrição	Operação UN	Custo Unit. (R\$)	Qtde	Salvado	Custo Total (R\$)	
015420370	ARRUELA PRESSAO PTD-001 SECAO 6-3	Instalar PC	0,15	2,00	0,00	0,30	
015424332	ARRUELA QUADR PTD-001 SECAO 6-4-1 - 50X3MM - FURDO 18MM	Instalar PC	0,42	14,00	0,00	5,88	
050154993	CAPACITOR 200KVAR 7950V PTD-001 10-1	Instalar PC	1719,00	6,00	0,00	10314,00	
058331867	CHAVE FUS 15KV 300A "C" PTD-00.001 SECAO 10-3	Instalar PC	100,00	3,00	0,00	300,00	
058457976	CHAVE SECCIONADORA UNIPOLAR A VACUO 13,8KV 200A NBI 95KV 60HZ	Instalar PC	4180,00	6,00	0,00	25080,00	
055227112	CINTA 200MM PTD-001 SECAO 6-8 ITEM 6	Instalar PC	8,46	1,00	0,00	8,46	
055227821	CINTA 210MM PTD-001 SECAO 6-8 ITEM 7	Instalar PC	8,50	1,00	0,00	8,50	
055228534	CINTA 220MM PTD-001 SECAO 6-8 ITEM 8	Instalar PC	10,80	1,00	0,00	10,80	
055229247	CINTA 230MM PTD-001 SECAO 6-8 ITEM 9	Instalar PC	11,24	1,00	0,00	11,24	
052565009	CONECTOR LINHA VIVA PTD-001 SECAO 4-4 - 6AWG CC A 2/0AWG CC	Instalar PC	15,80	3,00	0,00	47,40	
052288897	CONETOR ESTR AL 4/0 A 336,4 PTD-001 4-3-3	Instalar PC	24,58	3,00	0,00	73,74	
036251216	CRUZETA MADEIRA COMP 2400MM PTD-001 8-1 (PESO APROX. 27KG)	Instalar PC	46,01	2,00	0,00	92,02	
061148385	ELO FUS BOTAO K 50A 500MM PTD-001 10-10-15	Instalar PC	4,90	3,00	0,00	14,70	
056480199	ESTRUTURA METALICA PIBANCO CAPACITORES PTD-001 10-18-1C	Instalar PC	920,00	1,00	0,00	920,00	
053688261	FIO COBRE NU 6AWG TEMPERA MEIO-DURA	Instalar KG	28,31	4,00	0,00	113,24	
015540332	GRAMPO CERCA ZINC 25X10MM PTD-001 11-10	Instalar KG	4,28	0,10	0,00	0,43	
055228659	HASTE ATERRAMENTO ZINCADA PTD-001 SECAO 6-13	Instalar PC	18,97	1,00	0,00	18,97	
055642985	MAO FRANCESA PLANA 726MM PTD-001 6-17 ITEM 1	Instalar PC	4,20	4,00	0,00	16,80	
015289673	PARAFUSO CAB ABAU M16X150MM PTD-001 6-19	Instalar PC	1,56	2,00	0,00	3,12	
015280012	PARAFUSO CAB ABAU M16X45MM PTD-001 6-19	Instalar PC	1,02	4,00	0,00	4,08	
015303331	PARAFUSO CAB QUADR 125MM PTD-001 6-20-2	Instalar PC	1,70	4,00	0,00	6,80	
015341135	PARAFUSO ROSCA DUPL 500MM PTD-001 6-21-4	Instalar PC	5,88	2,00	0,00	11,76	
017712025	PLAQUETA PINUMERACAO PTD-001 11-13	Instalar PC	1,16	1,00	0,00	1,16	
055840019	SELA PICRUZETA PTD-001 6-27	Instalar PC	3,18	2,00	0,00	6,36	
055866671	SUPORTE L CHAVE FUS PTD-001 6-29	Instalar PC	8,09	6,00	0,00	48,54	
TOTAL GERAL						37118,30	

Custo dos materiais = R\$ 37118,30.

Tabela 9 - Orçamento de mão-de-obra para um BC de 1200kVAR.

Pág. 1		Orçamento de Serviços RePlanejados		31/10/2014 16:53:11			
Projeto: 20704 - INSTALAÇÃO DE BC		Expediente: 2014 - 99999		Em Planejamento			
Motivo da Obra: CAPACITOR							
Serviço	Descrição	Serviço UN	Custo Unit. (US)	Qtde	Custo Total (R\$)	Acréscimo (%)	Valor com % (R\$)
5.2.19.9	BANCO DE CAPACITORES FIXO (COMPLETO), POR	Executar US	29,20	1,00	29,20	0	29,20
TOTAL GERAL						29,2	

A mão-de-obra necessária para efetuar qualquer serviço no sistema de distribuição da CEEE-D é medida através da Unidade de Serviço de Construção e Manutenção (USCM). Todas as atividades desenvolvidas em redes de distribuição já foram quantificadas através da USCM. A partir dessa unidade padrão é que os serviços tanto de manutenção como construção nas redes de distribuição da CEEE-D são contratados. Hoje, o valor base dos contratos da CEEE-D é de R\$ 31,85 por USCM.

O custo da mão-de-obra da instalação do banco de capacitores foi calculado através da Equação (20).

$$\text{Custo mdo} = 29,2\text{USCM} \times R\$31,85 = R\$ 930,02$$

Eq. (20).

3.5. CÁLCULO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITORES

3.5.1 Critério de tomada de decisão

Utilizou-se o cálculo do VPL (Valor presente líquido).

Considerações sobre o cálculo do VPL:

- a) O horizonte de investimento considerado foi de 15 anos, dada a vida útil dos equipamentos envolvidos.
- b) Para o estudo da viabilidade econômica foram considerados todos os valores em Reais (R\$);
- c) A Taxa mínima de atratividade anual (TMA) considerada neste estudo é de 12,0%.

3.5.1.1 Cálculo do VPL

Para calcular o VPL primeiramente é preciso calcular o valor do investimento através da Equação (21).

$$I = Cp + Cm + Cc + Ca [R\$]$$

Eq. (21).

Os custos com o projeto e os custos administrativos dificilmente são determinados com precisão, tendo em vista a dificuldade de se quantificar todos os gastos e pessoas envolvidas, principalmente na questão administrativa. A CEEE-D considera um gasto de 10% do valor da obra com esses fatores e assim também o faremos.

Logo, utilizamos a Equação (22).

$$I = (Cm + Cc) + 10\% [R\$]$$

Eq. (22).

$$I = (37118,30 + 930,02) + 10\% = R\$ 41583,15$$

O VPL é calculado pela Equação (23).

$$VPL = -I + A \times \frac{(1 + i)^n - 1}{i \times (1 + i)^n} = [R\$]$$

Eq. (23).

$$VPL = -41853,15 + 14715,79 \times \frac{(1 + 0,12)^{15} - 1}{0,12 \times (1 + 0,12)^{15}} = R\$ 58374,10$$

Com o resultado positivo do VPL caracteriza-se a viabilidade econômica da aplicação do banco de capacitores.

A Figura 6 apresenta o fluxo de caixa da aplicação. Percebe-se com certa facilidade que o retorno do investimento dar-se-á rapidamente.

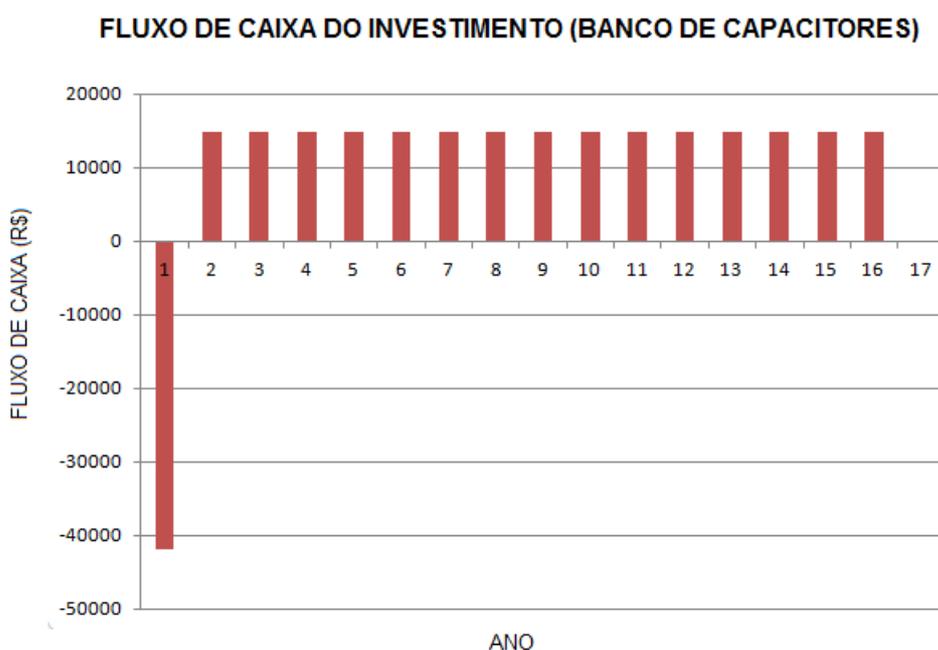


Figura 6 - Fluxo de caixa do investimento (Banco de Capacitores).

A Figura 7 apresenta o TR (Tempo de Retorno Descontado). Como se pode reiterar o investimento tem rápido retorno.

TEMPO DE RETORNO DESCONTADO (BANCO DE CAPACITORES)

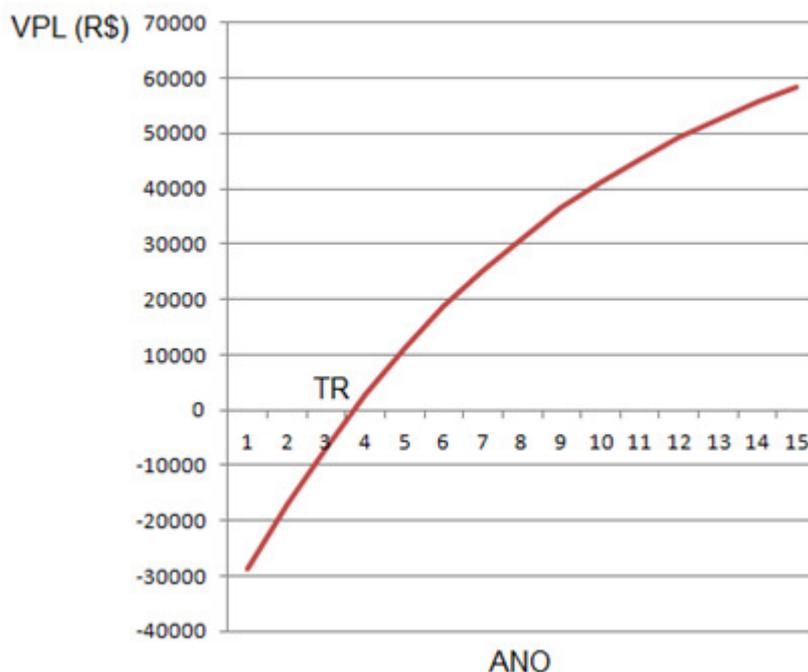


Figura 7 - Tempo de Retorno Descontado (Banco de capacitores).

3.6 ANÁLISE DO RECONDUTORAMENTO DO ALIMENTADOR

3.6.1 Definição da tecnologia do condutor a ser aplicado no recondutoramento

Primeiramente foi escolhido o condutor que substituirá o cabo 336,4MCM hoje existente no alimentador.

Conforme norma NTD 00-001 para construção de novas redes de distribuição em zona urbana devem ser empregados os condutores protegidos aplicados em redes compactas.

A Figura 8 mostra uma estrutura de sustentação de cabos protegidos utilizada em redes compactas de distribuição de energia.



Figura 8 - Foto de rede compacta protegida 15kV.

Sendo assim, conforme a tabela 4 a maior bitola de condutores padronizada para a classe de isolamento de 15kV, na CEEE-D, é o cabo 185 mm².

3.6.2 Cálculo das perdas no alimentador após o recondutoramento

De Tabela 6 obtemos o valor da resistência do condutor em ohm/km, 0,197 e calculamos com a Equação (24) a resistência total do alimentador.

$$RT^{SDMT} = \frac{\sum_{i=1}^N CT_i^{TRECHO} \times R_i^{TRECHO}}{CT^{SDMT}} \quad [ohm/km]$$

Eq. (24).

$$RT^{SDMT} = \frac{\sum_{i=1}^1 3,920 \times 0,197}{3,920} = 0,197 \quad [ohm/km]$$

Com o valor da corrente média, 196,857 A, calculou-se a perda de potência para a demanda média, a partir da Equação (25).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 1,82 \times \ln(I^{SDMT}) + 0,77 \times \ln(CT^{SDMT}) + 0,39 \times \ln(RT^{SDMT}) + 0,16 \times \ln(CR^{SDMT})) \times 10^{-3} [MW]$$

Eq. (25).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 1,82 \times \ln(196,857) + 0,77 \times \ln(3,920) + 0,39 \times \ln(0,197) + 0) \times 10^{-3} [MW]$$

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(3,69) \times 10^{-3} = 0,0381 MW$$

Com a perda de potência foi calculada a perda de energia, através das Equações (26) e (27).

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1 = CV^2 + 1$$

Eq. (26).

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{1,3008}{4,3547}\right)^2 + 1 = 0,2987^2 + 1 = 1,0892$$

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N \Delta p^{SDMT} \times CP_{SDMT} \times \Delta T [MWh]$$

Eq. (27).

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N 0,0381 \times 1,0892 \times 8760 = 363,52 [MWh]$$

E finalmente a energia perdida corrigida, através da Equação (28).

$$\Delta E_{SDMT}(corrigido) = \Delta E_{SDMT} + 5\% = 381,69 [MWh]$$

Eq. (28).

Esse resultado é a energia perdida por ano após o recondutoramento.

A energia economizada com o recondutoramento foi calculada com a Equação (29).

$$\begin{aligned}
 EE &= \Delta E_{SDMT} - \Delta E_{SDMT}(\text{pós recondução}) = 388,71 - 381,69 \\
 &= 7,02 \text{ [MWh]}
 \end{aligned}$$

Eq. (29).

O custo da energia conservada com o recondução (anual) foi calculado com a Equação (30).

$$CEC_{BC} = \text{Energia conservada [kWh]} \times \text{Preço da energia [R\$/kWh]}$$

Eq. (30).

$$CEE = 7,02 \times R\$ 0,31257 = R\$2194,24$$

3.6.3 Custos do recondução

Para o cálculo do custo do recondução foi utilizado o software SGD, versão 6.5.22.2. A Figura 9 ilustra o projeto de recondução.

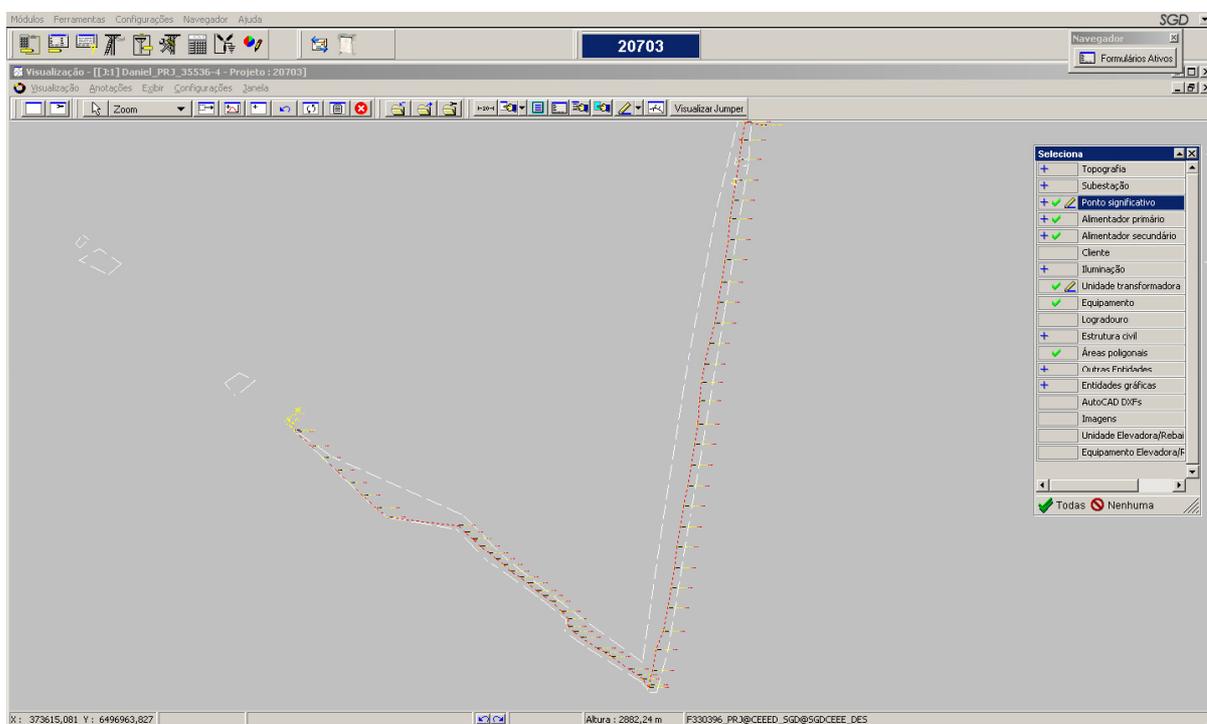


Figura 9 - Projeto de recondução.

O custo é baseado no preço dos materiais e na mão-de-obra, sendo os resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 - Orçamento de materiais para o recondutoramento do alimentador.

Pág. 2		Orçamento de Materiais				31/10/2014 16:50:55	
Projeto: 20703 - RECONDUTORAMENTO AL 43		Expediente: 2014 - 99999				Em Planejamento	
Motivo da Obra: REDE PROTEGIDA							
055826679	SAPATILHA PTD-001 SECAO 5-17	Instalar	PC	0,68	14,00	0,00	9,52
055840019	SELA PICRUZETA PTD-001 6-27	Instalar	PC	3,18	6,00	0,00	19,08
055249302	SUPORTE HORIZONTAL A ₂ O CARBONO LAMINADO ZINCADO A QUENTE 15KV	Instalar	PC	31,59	1,00	0,00	31,59
152011277	ALCA PREFORM PTD-001 SECAO 5-2 ITEM 5 - 336,4MCM CA/CAA	Retirar	PC	0,00	3,00	0,00	0,00
015424332	ARRUELA QUADR PTD-001 SECAO 6-4-1 - 50X3MM - FURO 18MM	Retirar	PC	0,00	271,00	0,00	0,00
053400976	CABO AL NU CA 336,4MCM TULIP	Retirar	KG	0,00	5546,68	0,00	0,00
055224989	CINTA 170MM PTD-001 SECAO 6-8 ITEM 3	Retirar	PC	0,00	27,00	0,00	0,00
055225991	CINTA 180MM PTD-001 SECAO 6-8 ITEM 4	Retirar	PC	0,00	27,00	0,00	0,00
055226400	CINTA 190MM PTD-001 SECAO 6-8 ITEM 5	Retirar	PC	0,00	2,00	0,00	0,00
055227112	CINTA 200MM PTD-001 SECAO 6-8 ITEM 6	Retirar	PC	0,00	2,00	0,00	0,00
036251216	CRUZETA MADEIRA COMP 2400MM PTD-001 8-1 (PESO APROX. 27KG)	Retirar	PC	0,00	63,00	0,00	0,00
053408896	FIO ALUMINIO PVAMARRA ₂ LO PTD-001 SECAO 5-9	Retirar	KG	0,00	13,16	0,00	0,00
053865006	FITA AL DIM 1X10MM PTD-001 SECAO 5-11	Retirar	KG	0,00	7,05	0,00	0,00
055340016	GANCHO-OLHAL PTD-001 SECAO 6-10	Retirar	PC	0,00	42,00	0,00	0,00
057302006	ISOLADOR PINO P15KV PORC/VIDRO	Retirar	PC	0,00	166,00	0,00	0,00
057561839	ISOLADOR POLIMERICO DE ANCORAGEM 15KV REDE COMPACTA	Retirar	PC	0,00	42,00	0,00	0,00
056626670	MANILHA-SAPATILHA ACO 110MM PTD-001 5-15	Retirar	PC	0,00	42,00	0,00	0,00
056642985	MAO FRANCESA PLANA 728MM PTD-001 6-17 ITEM 1	Retirar	PC	0,00	126,00	0,00	0,00
056662005	OLHAL PIPARAF FURO 18X30 PTD-001 6-18	Retirar	PC	0,00	42,00	0,00	0,00
015286673	PARAFUSO CAB ABAU M16X150MM PTD-001 6-19	Retirar	PC	0,00	35,00	0,00	0,00
015280012	PARAFUSO CAB ABAUL M16X45MM PTD-001 6-19	Retirar	PC	0,00	35,00	0,00	0,00
015303331	PARAFUSO CAB QUADR 125MM PTD-001 6-20-2	Retirar	PC	0,00	126,00	0,00	0,00
015305112	PARAFUSO CAB QUADR 250MM PTD-001 6-20-5	Retirar	PC	0,00	23,00	0,00	0,00
015305716	PARAFUSO CAB QUADR 350MM PTD-001 6-20-7	Retirar	PC	0,00	18,00	0,00	0,00
015340571	PARAFUSO ROSCA DUPL 450MM PTD-001 6-21-3	Retirar	PC	0,00	15,00	0,00	0,00
015341135	PARAFUSO ROSCA DUPL 500MM PTD-001 6-21-4	Retirar	PC	0,00	12,00	0,00	0,00
056687971	PINO PICRUZETA MAD 15KV PTD-001 6-23-1	Retirar	PC	0,00	156,00	0,00	0,00
055840019	SELA PICRUZETA PTD-001 6-27	Retirar	PC	0,00	35,00	0,00	0,00
TOTAL GERAL						97704,74	

Custo materiais = R\$ 97704,74

Tabela 11 - Orçamento de mão-de-obra para o recondutoramento do alimentador.

Pág. 1		Orçamento de Serviços RePlanejados				31/10/2014 16:51:43		
Projeto: 20703 - RECONDUTORAMENTO AL 43		Expediente: 2014 - 99999				Em Planejamento		
Motivo da Obra: REDE PROTEGIDA								
Serviço	Descrição	Serviço	UN	Custo Unit. (US)	Qtde	Custo Total (R\$)	Acrescimo (%)	Valor com % (R\$)
5.2.13.1.1	INSTALACAO DE CA, CAA, CAZ OU CORDOALHA, ATE 1/0	Executar	K	24,97	1,76	44,00	0	44,00
5.2.13.1.4	INSTALACAO DE CA PROTEGIDO OU MULTIPLEXADO,	Executar	K	35,94	5,31	190,69	0	190,69
5.2.13.2.1	INSTALACAO DE CA, CAA, CAZ OU CORDOALHA, ATE 1/0	Executar	K	32,46	2,16	70,11	0	70,11
5.2.13.2.4	INSTALACAO DE CA PROTEGIDO OU MULTIPLEXADO,	Executar	K	46,74	6,49	303,45	0	303,45
5.2.14.1.2	RETIRADA DE CA, CAA, CAZ OU CORDOALHA, MAIOR QUE	Executar	K	11,98	5,31	63,57	0	63,57
5.2.14.2.2	RETIRADA DE CA, CAA, CAZ OU CORDOALHA, MAIOR QUE	Executar	K	15,58	6,49	101,15	0	101,15
5.2.6.27	CE1A - MONTAGEM	Executar	US	1,98	34,00	67,32	0	67,32
5.2.6.28	CE1B - MONTAGEM	Executar	US	0,98	7,00	6,86	0	6,86
5.2.6.5	N3, M3, B3, T3, E3, CN3 TRIFASICA - MONTAGEM	Executar	US	3,58	2,00	7,16	0	7,16
5.2.6.53	MONTAGEM DE CRUZETA DUPLA	Executar	US	1,78	1,00	1,78	0	1,78
5.2.6.7	N4, B4, M4, T4, E4, CN4 TRIFASICA - MONTAGEM	Executar	US	5,36	6,00	32,16	0	32,16
5.2.6.76	CSH2 (CL1) - MONTAGEM	Executar	US	2,40	1,00	2,40	0	2,40
5.2.7.1	N1, M1, B1, T1, E1 TRIFASICA - RETIRADA	Executar	US	0,80	41,00	32,80	0	32,80
5.2.7.3	N2, M2, B2, T2, E2 TRIFASICA - RETIRADA	Executar	US	1,20	3,00	3,60	0	3,60
5.2.7.5	N3, M3, B3, T3, E3, CN3 TRIFASICA - RETIRADA	Executar	US	1,30	2,00	2,60	0	2,60
5.2.7.7	N4, B4, M4, T4, E4, CN4 TRIFASICA - RETIRADA	Executar	US	1,70	6,00	10,20	0	10,20
JAL_CE1A	ESTRUTURA CE1A - ACRESCIMO	Executar	US	0,59	34,00	20,06	0	20,06
JAL_CE1B	ESTRUTURA CE1B - ACRESCIMO	Executar	US	0,29	7,00	2,03	0	2,03
JAL_CN3	ESTRUTURA CN3 - ACRESCIMO	Executar	US	2,44	1,00	2,44	0	2,44
JAL_CSH2	ESTRUTURA CSH2 - ACRESCIMO	Executar	US	0,58	1,00	0,58	0	0,58
TOTAL GERAL						964,96		

O custo da mão-de-obra do recondutoramento foi calculado através da Equação (31).

$$\text{Custo mdo} = 964,96 \text{ USCM} \times \text{R\$ } 31,85 = \text{R\$ } 30733,97$$

Eq. (31).

3.7 CÁLCULO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO RECONDUTORAMENTO

3.7.1 Critério de tomada de decisão

Utilizou-se o cálculo do VPL (Valor presente líquido).

Considerações sobre o cálculo do VPL:

a) O horizonte de investimento considerado foi de 20 anos, dada a vida útil dos equipamentos envolvidos.

b) Para o estudo da viabilidade econômica foram considerados todos os valores em Reais (R\$);

c) A Taxa mínima de atratividade anual (TMA) considerada neste estudo é de 12,0%.

3.7.1.1 Cálculo do VPL

Para calcular o VPL primeiramente é preciso calcular o valor do investimento através da Equação (32).

$$I = (Cm + Cc) + 10\% [\text{R\$}]$$

Eq. (32).

$$I = (97704,74 + 30733,97) + 10\% = \text{R\$ } 141282,58$$

O VPL é calculado pela Equação (33).

$$VPL = -I + A \times \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} = [R\$]$$

Eq. (33).

$$VPL = -141282,58 + 2194,24 \times \frac{(1 + 0,12)^{20} - 1}{0,12 \times (1 + 0,12)^{20}} = -R\$ 122997,25$$

Com o resultado negativo do VPL caracteriza-se a inviabilidade econômica do recondutoramento.

A Figura 10 apresenta o fluxo de caixa da aplicação. Percebe-se que o investimento é muito alto se comparado aos recebimentos

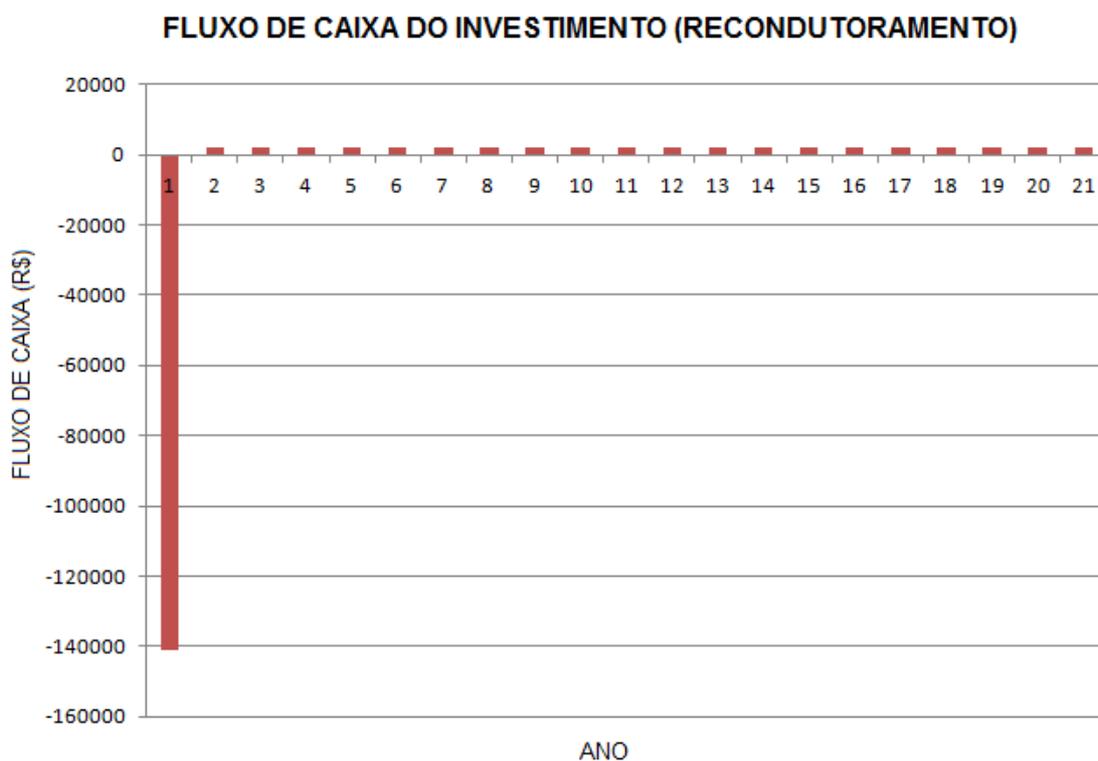


Figura 10 - Fluxo de caixa do investimento (Recondutoramento).

3.8 ANÁLISE DO RECONDUTORAMENTO DO ALIMENTADOR COMBINADO COM APLICAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES

Nesta seção foi analisada a aplicação combinada do recondutoramento e da aplicação do banco de capacitores para posterior análise de viabilidade econômica.

3.8.1 Cálculo das perdas no alimentador após recondutoramento e instalação de banco de capacitores

De tabela 6 obteve-se o valor da resistência do condutor em ohm/km, 0,197 e calculamos com a Equação (34) a resistência total do alimentador.

$$RT^{SDMT} = \frac{\sum_{i=1}^N CT_i^{TRECHO} \times R_i^{TRECHO}}{CT^{SDMT}} \quad [ohm/km]$$

Eq. (34).

$$RT^{SDMT} = \frac{\sum_{i=1}^1 3,920 \times 0,197}{3,920} = 0,197 \quad [ohm/km]$$

O valor da corrente média, após a instalação do BC, é de 183,45 A. Com esse valor foi calculada a perda de potência para a demanda média, através da Equação (35).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 1,82 \times \ln(I^{SDMT}) + 0,77 \times \ln(CT^{SDMT}) + 0,39 \times \ln(RT^{SDMT}) + 0,16 \times \ln(CR^{SDMT})) \times 10^{-3} \quad [MW]$$

Eq. (35).

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 1,82 \times \ln(183,45) + 0,77 \times \ln(3,920) + 0,39 \times \ln(0,197) + 0) \times 10^{-3} \quad [MW]$$

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(-6,34 + 9,485 + 1,05189 - 0,6335 + 0) \times 10^{-3} \quad [MW]$$

$$\Delta p^{SDMT} = 0,95 \times \exp(3,69) \times 10^{-3} = 0,0335 \quad MW$$

Com a perda de potência, calculou-se a perda de energia, através das Equações (36) e (37).

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1 = CV^2 + 1$$

Eq. (36).

$$CP_{SDMT} = \left(\frac{1,3008}{4,3547}\right)^2 + 1 = 0,2987^2 + 1 = 1,0892$$

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N \Delta p^{SDMT} \times CP_{SDMT} \times \Delta T [MWh]$$

Eq. (37).

$$\Delta E_{SDMT} = \sum_{i=1}^N 0,0335 \times 1,0892 \times 8760 = 320,02 [MWh]$$

E finalmente obtemos a energia perdida corrigida através da Equação (38).

$$\Delta E_{SDMT}(\text{corrigido}) = \Delta E_{SDMT} + 5\% = 336,02 [MWh]$$

Eq. (38).

Esse resultado é a energia perdida por ano com o recondutoramento e o banco de capacitores.

A energia economizada com as soluções combinadas foi calculada com a Equação (39).

$$EE = \Delta E_{SDMT} - \Delta E_{SDMT}(\text{Recon.} + BC) = 388,71 - 336,02 = 52,7 [MWh]$$

Eq. (39).

O custo da energia conservada (anual) foi calculado com a Equação (40).

$$CEC_{BC} = \text{Energia conservada} [kWh] \times \text{Preço da energia} [R\$/kWh]$$

Eq. (40).

$$CEE = 52700 \times R\$ 0,31257 = R\$ 16468,90$$

3.9 CÁLCULO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA AS SOLUÇÕES COMBINADAS

3.9.1 Critério de tomada de decisão

Como critério de tomada de decisão utilizou-se o cálculo do VPL, além disso, seguem outras considerações:

- a) O horizonte de investimento considerado foi de 15 anos, considerando a menor vida útil dos capacitores;
- b) Para o estudo da viabilidade econômica foram considerados todos os valores em Reais (R\$);
- c) A Taxa mínima de atratividade anual (TMA) considerada neste estudo é de 12,0%.

3.9.1.1 Cálculo do VPL

O valor considerado como investimento foi o valor somado das duas técnicas de redução de perdas, conforme calculado com a Equação (41).

$$I = I(\text{banco de capacitores}) + I(\text{recondutoramento}) \text{ [R\$]}$$

Eq. (41).

$$I = 41583,15 + 141282,58 = R\$ 182865,73$$

O VPL foi calculado através da Equação (42).

$$VPL = -I + A \times \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} = \text{[R\$]}$$

Eq. (42).

$$VPL = -182865,73 + 16468,9 \times \frac{(1 + 0,12)^{15} - 1}{0,12 \times (1 + 0,12)^{15}} = -R\$ 70698,28$$

Com o resultado negativo do VPL caracteriza-se a inviabilidade econômica da aplicação das soluções combinadas.

A Figura 11 apresenta o fluxo de caixa da aplicação. Percebe-se que o investimento é alto se comparado aos recebimentos.



Figura 11 - Fluxo de caixa dos investimentos combinados (BC e recondutoramento).

3.10 CRITÉRIOS IMPONDERÁVEIS NA ANÁLISE DA VIABILIDADE DO NEGÓCIO

Pelo fato do negócio tratar de distribuição de energia elétrica dois fatores são merecedores de considerações, são eles: Confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia.

3.10.1 Confiabilidade no fornecimento de energia

- maior resistência mecânica do conjunto oferecida pela cordoalha de aço instalada sobre os condutores;
- a cordoalha funciona como um captor para descargas atmosféricas diminuindo a incidência das mesmas sobre as linhas, conseqüentemente diminuindo o número de interrupções no fornecimento;
- a proteção do condutor o torna menos susceptível a desligamentos momentâneos ocasionados por contatos ocasionais, ocorrência comum com vegetais.

3.10.2 Qualidade no fornecimento de energia

- menor queda de tensão proporcionada pela diminuição da corrente do alimentador;
- menor queda de tensão proporcionada pela diminuição da resistência do alimentador;
- melhor estabilidade da tensão proporcionada pelo banco de capacitores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho buscou analisar a viabilidade econômica de duas possibilidades já conhecidas de redução de perdas por Efeito Joule em redes de distribuição de energia elétrica, o uso de capacitores e o recondutoramento, estando focado no segmento da distribuição conhecido como SDMT. Buscou-se um circuito alimentador real, sobre o qual fosse possível ter acesso às informações do carregamento para um período não menor que um ano, de modo que se pudesse determinar os parâmetros necessários para o cálculo das perdas. Utilizou-se a metodologia de cálculo de perdas da ANEEL, através do Módulo 7 do PRODIST, para quantificar a energia perdido ao longo de um ano para o referido circuito. O resultado obtido foi de 388,71MWh. Essa energia seria suficiente para alimentar mais de cem residências com consumo médio de 300kWh/mês durante um ano. Esse resultado reforça a necessidade de se pensar em alternativas mais eficientes para a distribuição de

energia elétrica.

Após a determinação da perda energética do alimentador para a condição atual foi proposta a aplicação de um banco de capacitores com o objetivo de reduzir o módulo da corrente de linha do alimentador. O mesmo foi dimensionado de acordo com a padronização técnica da concessionária de distribuição local e concluiu-se que o mesmo não podia ser do tipo fixo, ou seja, que fica ligado permanentemente necessitando um dispositivo de controle de acionamento. Esse dispositivo encarece o custo inicial mas proporciona uma operação de acordo com a variação da energia reativa da rede.

Determinou-se o custo da implementação do banco de capacitores utilizando o software SGD e foi calculada a nova perda de energia, dessa vez com a adição do banco de capacitores. De posse desses dados analisou-se a viabilidade econômica dessa alternativa tendo como base o critério de tomada de decisão do VPL (Valor Presente Líquido). Os resultados foram positivos indicando que o negócio é viável. Agregar a melhoria do rendimento do sistema e obter um retorno em um período de tempo relativamente curto é sem dúvida um ótimo resultado.

Em sequência, foi proposto o recondutoramento do circuito alimentador, o qual reduziria as perdas através da diminuição da resistência do circuito em função da utilização de um condutor com maior condutividade elétrica.

Determinou-se o condutor e a tecnologia a ser aplicada no alimentador seguindo a normatização da concessionária e foi calculado o custo do recondutoramento assim como o novo valor da perda de energia. Após foi analisada a viabilidade econômica do recondutoramento usando o VPL como critério de tomada de decisão, onde se obteve um resultado negativo, evidenciando que o recondutoramento não é uma alternativa economicamente viável.

Como o resultado da aplicação do capacitor foi positivo e do recondutoramento negativo, foi verificado se a aplicação das duas soluções, dessa vez combinadas, seria interessante do ponto de vista financeiro. Após alguns cálculos verificou-se que o resultado ainda não era satisfatório, ou seja, o custo do recondutoramento é muito alto e nem mesmo agregando os resultados positivos do banco de capacitores seria possível dizer que o negócio é viável economicamente.

Conclui-se que a aplicação de um banco de capacitores no AL 43 da Subestação PEL4 é um investimento viável que traria significativa redução de perdas no mesmo.

O recondutoramento não se mostrou-se viável economicamente, no entanto, vale lembrar que a tecnologia de rede protegida compacta propicia benefícios como a melhoria da confiabilidade do fornecimento de energia, redução da faixa de passagem, redução do custo de manutenção, diminuição da poluição visual além de melhorar o relacionamento com entidades de controle ambiental e órgãos governamentais. Todos esses fatores ficam na esfera do imponderável em uma análise econômica.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni; ROBBA, Ernesto – Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Editora: Blucher, 2ª Edição, 2010.

ANEEL. PRODIST, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, 2008.

SHORT, Thomas Allen. Electric Power Distribution Equipment and Systems. Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. Editora: LTC, 7ª Edição, 2007.

CEEE-D. Norma NTD-00.001- Padronização Técnica da Distribuição – Elaboração de projetos em Redes Aéreas de Distribuição, 2013.

Datasheet Condutores de alumínio. Disponível em: <http://www.nexans.com.br>. Acessado em: 27/09/2014.

CEEE-D. Norma MTE-00.027- Manual de utilização do software SGD, 2012.

<HTTP://www.ceee.com.br> Acessado em: 29/09/2014.

UFES. Economia, Gestão e Auditorias da Energia. Notas de aula, 2013.

BIASOTTO, Etienne. Um Procedimento de Análise para Repotenciação de Linhas de Subtransmissão de 34,5 kV para 69 kV. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - USP, 2009.

BEN (Balanço Energético Nacional) 2014 – Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final%202014%20Web.pdf>. Acessado em: 05/11/2014.