3
Análise do problema

O custo do sistema de distribuição elétrica na baixa tensão para uma determinada planta consumidora está diretamente relacionado ao custo dos cabos elétricos definidos no projeto. Os cabos elétricos por sua vez, estão vinculados à composição, quantidade e alocação dos quadros de distribuição de circuitos previstos para o atendimento da unidade que, por fim, devem atender os critérios previstos nas normas elétricas vigentes e nas restrições de posicionamento impostas pela instalação. Esse encadeamento resume o problema que será analisado a seguir.

Ao longo desse capítulo será notado que esse é um problema onde poucos itens admitem variações visto que boa parte dos elementos que definem a distribuição elétrica em baixa tensão é guiada por normas elétricas (especialmente a NBR5410) ou pelas limitações impostas pelo usuário. Os pontos que permitem ajustes estão limitados a:

- número de quadros de distribuição;
- composição de circuitos dos quadros de distribuição;
- posicionamento dos quadros de distribuição;

Portanto, a distribuição elétrica inteligente mencionada anteriormente pode ser simplificada como a busca do melhor ajuste desses elementos visando à economia e a rentabilização do investimento.

3.1.
Projeto elétrico na indústria

O projeto elétrico industrial é muito amplo e abrange uma série de aspectos como a definição dos equipamentos elétricos a serem empregados tais como: transformadores, equipamentos de manobra, equipamentos de geração e motores. O projeto também define os sistemas de proteção, controle, acionamento, supervisão e medição dos equipamentos elétricos, além dos sistemas de distribuição elétrica para atendimento as cargas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

Nessa parte do projeto elétrico, a dos sistemas de distribuição elétrica, é onde se determina o posicionamento dos quadros de distribuição ao longo da área da instalação considerando critérios como: facilidade de instalação, custos, acesso, segurança patrimonial, segurança pessoal, organização espacial e aspectos visuais entre outros. Sendo esse posicionamento um dos itens passíveis de ajuste conforme mencionado antes, deve-se dar a ele uma atenção especial.

É nessa parte do projeto elétrico que está inserido o presente trabalho e, com foco especial, no critério do custo. O posicionamento da subestação ou do quadro geral de baixa de tensão também faz parte dessa análise.

A seguir serão abordados pontos que são determinantes para a definição do custo dessa parte do projeto elétrico[1].

3.1.1.
Potencial de economia

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

O projeto elétrico de distribuição em uma instalação industrial de médio ou grande porte pode ser segmentado da seguinte forma:

- Interface com a concessionária de energia: ramal de ligação, ramal e cabine de entrada e subestação;
- Distribuição em alta tensão: alimentadores das subestações unitárias e de cargas em alta tensão;
- Distribuição em baixa tensão: cargas em baixa tensão.

Os circuitos relacionados à concessionária de energia elétrica possuem uma série de condicionantes para sua definição. Além de serem circuitos em alta tensão o que já constitui um grande limitador ao seu posicionamento, a Concessionária impõe pré-condições de posicionamento e de padronização da instalação e dos equipamentos a serem utilizados que limitam muito as possibilidades de economia nessa parte do projeto.

Os circuitos de distribuição em alta tensão possuem restrições significativas ao seu posicionamento por questões de segurança da mesma forma que os circuitos impostos pela concessionária de energia. Além disso, costumam ser poucos os circuitos em alta tensão, dificilmente passando da casa

[1] Assumiu-se que o dimensionamento dos cabos elétricos usados nos circuitos de distribuição, apesar de realizado durante o projeto elétrico, é uma definição vinculada à norma brasileira NBR5410 e, portanto serão abordados no item específico sobre as questões normativas mais adiante.

das dezenas de circuitos, seja para alimentar subestações unitárias, seja para alimentar motores diretamente. Em função disso, o potencial de economia nesse segmento do projeto é muito pequeno.

Já nos circuitos de distribuição em baixa tensão, as restrições de posicionamento dos circuitos por critérios de segurança são muito reduzidas. E, em oposição aos circuitos de alta tensão, a quantidade de circuitos é muito elevada alcançando facilmente a casa das centenas de circuitos em uma instalação de médio porte. Por esses motivos, o potencial de economia através da alocação dos circuitos de baixa tensão é significativo e merece ser estudado. Deve-se observar que os circuitos mencionados são os alimentadores dos quadros de distribuição e também os alimentadores de cada carga.

Outro aspecto importante sobre esses circuitos em baixa tensão que não se pode deixar de mencionar é que seus cabos elétricos possuem uma quantidade de cobre por metro muito superior a dos cabos elétricos em alta tensão. Enquanto o preço dos cabos de alta tensão é definido principalmente pela qualidade e capacidade de seu material isolante, o preço do cabo de baixa tensão é definido quase que diretamente pelo preço do cobre, o que torna esse item muito sensível às variações do mercado que foram mostradas no capítulo 2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

3.1.2.
Possibilidades de posicionamento

Os custos também são considerados durante a elaboração do projeto de distribuição elétrica de uma instalação, mas não da maneira aprofundada como deveriam ser. Utilizando o exemplo de uma planta industrial de médio porte pode-se perceber isso facilmente:

- Área: Planta industrial de 1 pavimento de 60m x 60m, totalizando uma área de 3600m^2;

- Carga: motores, iluminação, tomadas e condicionadores de ar atendidos por 30 circuitos trifásicos e 50 circuitos monofásicos, somando 140 posições de barramento;

- Restrição de posicionamento: 50% dessa área são de uso restrito do processo industrial não podendo receber os quadros de

distribuição. A área possível para instalação dos quadros passa a ser de 1.800m^2;

- Considerando que cada carga ocupa 1 metro quadrado e multiplicando o número de circuitos pela área chega-se a:

  1.800 x (30 + 50) = 144.000 possibilidades de posicionamento;

- Considerando a hipótese mais razoável de que esses 80 circuitos sejam agrupados em 10 quadros de distribuição com 30 posições de barramento cada, ao longo da planta, chega-se a:

  1.800 x 10 = 18.000 possibilidades de posicionamento.

Utilizando as ferramentas tradicionais de projeto seria inviável para um projetista avaliar tantas possibilidades de posicionamento. Faz-se necessário o uso de outras técnicas e ferramentas de análise que permitam estudar melhor o conjunto de possibilidades em busca da solução de menor custo.

3.1.3. Restrições de posicionamento

Outro aspecto que é definido no projeto de distribuição elétrica e que interfere diretamente no custo, são as limitações de posicionamento aplicadas aos quadros de distribuição, a subestação e, consequência dessas, ao caminho percorrido por cada circuito. O que será definido a partir dessas restrições são as quantidades de cada tipo de cabo elétrico usado no projeto.

Algumas restrições são de ordem física, tais como:

- paredes e divisórias;
- portas e janelas;
- pilares, vigas e calhas;
- proximidade com outras instalações como gás, ar comprimido, água ou líquidos inflamáveis (algumas dessas restrições já são impostas pelas normas elétricas, mas não todas).

Outras restrições são definidas pelos usuários, como:

- áreas de acesso restrito;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

- concentração de cargas em determinadas locais, como: laboratórios ou escritórios;
- rotas de fuga ou áreas destinadas a equipamentos de combate ao fogo (algumas dessas restrições já são impostas pelas normas elétricas, mas não todas);
- conforto visual ou motivações estéticas.

Em algumas situações essas restrições são tão rigorosas e limitam tanto as opções de posicionamento dos quadros de distribuição que provocam aumentos significativos no custo dos cabos elétricos.

Além das restrições impostas pelo usuário o projetista deve impor algumas restrições de ordem física a esse posicionamento para evitar situações incompatíveis ou estranhas. Entre essas restrições destacam-se:

- distância mínima entre quadros de distribuição;
- restrições mais criteriosas para o posicionamento da subestação ou do quadro geral que alimenta os quadros de distribuição;
- distância mínima entre quadros de distribuição e subestação ou quadro geral;
- distância mínima entre quadros de distribuição e suas cargas;
- distância máxima entre os quadros de distribuição e suas cargas de modo a não superar o limite máximo de queda de tensão para os circuitos;
- agrupamento de circuitos similares em finalidade e potência em um mesmo quadro de distribuição.

Acima foram definidas algumas restrições baseadas em aspectos de segurança, funcionalidade, na boa prática de instalações elétricas e no senso comum visando o melhor uso da planta. Obviamente, não foram esgotadas as muitas possibilidades de restrição que poderiam ser criadas para esse tipo de situação.

3.2.
Interferência de normas e padrões construtivos

As instalações elétricas em baixa tensão no Brasil são guiadas pela norma brasileira NBR5410 de 2004 e revisada em 2008. Nesta, estão determinados

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

aspectos importantes a serem seguidos nos projetos elétricos de baixa tensão entre os quais:

- dimensionamento de cabos elétricos;
- divisão dos circuitos elétricos;

Não faz parte desse estudo qualquer inovação relativa ao dimensionamento elétrico dos cabos, sendo seguidas na íntegra as orientações da norma brasileira que abrange as instalações elétricas de baixa tensão, a NBR5410. A seguir serão explicadas resumidamente essas orientações.

3.2.1.
Dimensionamento de cabos elétricos

Um componente importante para a definição do custo na alocação dos quadros de distribuição e seus circuitos é o dimensionamento dos cabos elétricos a serem usados para cada circuito que compõe o quadro de distribuição. Esse dimensionamento é feito a partir de critérios definidos nas normas elétricas em vigor no país assim como em outros critérios que se tornaram praxe entre os projetistas. Apesar de ser um item determinado pelas normas e que, portanto, não admite alterações visando economia, ele será abordado em detalhes a seguir, dada sua relevância para o projeto de distribuição.

Invariavelmente a aplicação desses critérios termina por sobre-dimensionar os circuitos elétricos. Especialmente aqueles circuitos que são adjacentes a outros circuitos afetando sua capacidade de dissipação de calor e para os quais os fatores definidos pela norma para compensar essa condição costumam ter pouca aderência e agregam uma margem de segurança considerável nos cabos elétricos tornando-os itens críticos quando se está preocupado com a parte econômica de uma obra.

3.2.1.1.
Cabos elétricos

Na baixa tensão predominam os cabos de cobre, dada sua boa condutividade e, principalmente, sua facilidade de conexão. O preço desse tipo de cabo varia de acordo com sua espessura de cobre e com a qualidade de seu isolamento. A espessura é medida como sendo a área em mm^2 da seção reta do

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

cabo e também é conhecida por *bitola* do cabo. Já o isolamento pode ser resumido em dois tipos: o de PVC (policloreto de vinila) que suporta temperaturas em regime permanente de até 70^{o}C e o de XLPE (polietileno reticulado), que mantêm suas características até a temperatura de 90^{o}C também em regime permanente. Sendo o primeiro indicado para uso geral e o último mais adequado a ambientes hostis como as indústrias ou onde a haja exposição permanente dos cabos a intempéries.

Os cabos de alumínio também são aceitos para instalações de baixa tensão, entretanto, existem importantes condicionantes a seu uso devido, principalmente, às dificuldades de conexão que eles apresentam e que na baixa tensão são muito comuns. A NBR5410 limita seu uso a bitolas maiores ou iguais a 16mm^2 e em circuitos que derivem das subestações ou quadro gerais de baixa tensão. Os cabos de alumínio não foram estudados nesse trabalho.

No ambiente industrial na baixa tensão é comum a utilização de cabos com isolamento em XLPE ou EPR (Borracha de Etileno-Propileno) que possui características semelhantes as do XLPE. Já a definição da bitola do cabo deve ser feita através dos critérios definidos pela norma brasileira e que são os seguintes:

- Capacidade de condução de corrente em regime permanente;
- Capacidade de condução de corrente em curto circuito;
- Queda de tensão.

3.2.1.2. Capacidade de condução de corrente em regime permanente

A definição da capacidade de condução de corrente de um circuito é igual a capacidade de condução de corrente de seu cabo elétrico aplicando-se fatores de correção que tentam compensar a dificuldade de dissipação de calor a qual os cabos estão submetidos em função dos seguintes aspectos[2]:

- Método de instalação dos circuitos: a dissipação de calor do cabo com o meio ambiente varia em função de como o cabo está instalado, se em eletroduto, em eletrocalha perfurada, diretamente enterrado, etc. A NBR5410 determina 49 métodos de instalação e depois os classifica em 9 perfis de dissipação de calor com o meio ambiente.

[2] Todos esses aspectos e seus respectivos fatores de correção são apresentados na NBR5410 para cabos isolados em PVC e para cabos isolados em XLPE ou EPR.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

- Temperatura ambiente: os valores de condução de corrente dados pela norma são todos baseados em uma temperatura ambiente de 30^{o} Celsius para cabos não enterrados e de 20^{o} Celsius para cabos enterrados. Naturalmente a temperatura ambiente é relevante para a dissipação de calor do cabo e por isso, caso a temperatura ambiente do local da instalação seja diferente das citadas acima, deve-se aplicar fatores, também indicados na norma, para a correção das capacidades de condução.
- Agrupamento de cabos: o agrupamento de vários cabos em uma mesma infraestrutura de sustentação ou condicionamento de cabos provoca uma maior dificuldade de dissipação do seu calor com o meio ambiente. Caso esses outros cabos alimentem cargas (o que é muito comum), haverá um aumento da temperatura ambiente por conta do efeito térmico provocado pelos cabos adjacentes. Mais uma vez a norma determina fatores de correção a serem aplicados às tabelas básicas de capacidade de condução dos cabos de modo que esses efeitos sejam considerados.

Uma vez definida a capacidade de condução de corrente para atender um determinado circuito em regime permanente, recorre-se as tabelas apresentadas pela NBR5410 para se verificar o cabo elétrico com capacidade imediatamente superior àquela necessária ao circuito considerando os fatores mencionados anteriormente. Esse é o critério principal para a definição dos cabos elétricos dos circuitos de distribuição. Após a definição do cabo elétrico segundo esse critério faz-se a verificação dos outros critérios.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

3.2.1.3.
Capacidade de condução de corrente em curto circuito

Na situação de curto circuito o cabo deve se manter íntegro, resistindo à circulação das altas correntes de curto circuito até que o dispositivo de proteção do circuito seja capaz de detectar e eliminar o problema. A NBR5410 indica para cada tipo de cabo uma temperatura limite de curto circuito que está condicionada à bitola do condutor, ao material condutor (alumínio ou cobre) e ao material isolante (PVC ou XLPE).

A integral do quadrado da corrente de curto circuito pelo tempo entre o início e o fim do curto circuito, também conhecida por integral de Joule, determina a energia transferida ao cabo elétrico durante o curto-circuito:

$$J = \int_0^t i^2 \, dt \tag{1}$$

Onde:

J energia transferida ao cabo elétrico em Watts

i corrente de curto circuito em Amperes

t tempo de atuação da proteção em segundos

Para que o condutor se mantenha íntegro a integral de Joule que o dispositivo de proteção deixa passar deve ser menor ou igual a integral de Joule que o cabo suporta desde a temperatura nominal até a temperatura limite de curto circuito:

$$\int_0^t i^2 dt \leq k^2 S^2 \tag{2}$$

Onde:

$\int_0^t i^2 dt$ é a integral de Joule que o dispositivo de proteção deixa passar;

$k^2 S^2$ é a integral de Joule do cabo desde a temperatura nominal até seu limite de temperatura de curto circuito supondo aquecimento adiabático3, onde S é a seção do condutor em mm2 e k é uma constante em oC relativa ao cabo que é dada pela NBR5410.

Para curtos circuitos de qualquer duração em que a simetria da corrente não seja significativa e para curtos circuitos assimétricos de duração 0,1s até 5s, pode-se simplificar a equação acima para:

$$I^2 \, t \leq k^2 S^2 \tag{3}$$

Onde:

[3] Processo sem troca de calor com o meio ambiente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

I é a corrente de curto circuito presumida simétrica, em Amperes, valor eficaz;
t é o tempo de duração do curto circuito.

Após a definição do cabo segundo o critério anterior, faz-se a verificação através da equação (3) se o cabo definido é capaz de suportar os esforços térmicos devido ao curto circuito máximo previsto. Caso contrário, utiliza-se o cabo imediatamente superior e assim sucessivamente até que esse critério seja atendido.

3.2.1.4.
Queda de tensão

Os condutores possuem valores de impedância por metro muito reduzidos, entretanto, quando as distâncias percorridas pelos circuitos até suas cargas são muito extensas, essa impedância começa a causar uma queda de tensão perceptível ao longo dos cabos do circuito reduzindo o nível de tensão no fim do circuito, ou seja, na carga.

As cargas de modo geral admitem variações máximas de 10% sobre sua tensão nominal e isso determina um limite a ser evitado pelos circuitos de distribuição elétrica.

A NBR5410 determina os seguintes limites para queda de tensão:

- 7% do valor da tensão nominal entre os terminais secundários do transformador ou do gerador e as cargas alimentadas por eles;
- 5% do valor da tensão nominal entre o ponto de entrega da concessionária e as cargas, caso a instalação seja alimentada em baixa tensão pela concessionária;
- 4% do valor da tensão nominal nos circuitos terminais das cargas.

O cálculo da queda de tensão deve ser feito utilizando a corrente nominal do circuito estudado, contudo, a norma não define os valores a serem usados de impedância dos cabos devendo-se, portanto, recorrer às informações dos fabricantes de cabos.

Na prática, após a definição do cabo a ser utilizado segundo o critério de capacidade de condução em regime permanente, faz-se a verificação da queda de tensão que o circuito apresenta. Caso esteja dentro dos limites da norma o cabo do circuito está definido, caso contrário utiliza-se o cabo imediatamente

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

acima e faz-se nova verificação em relação aos limites de queda de tensão e assim sucessivamente até que esse critério seja atendido.

3.2.2.
Divisão da instalação elétrica

A definição da quantidade de circuitos elétricos e suas potências, a localização dos quadros de distribuição, o agrupamento dos circuitos em cada um desses quadros de distribuição e a quantidade de quadros de distribuição são decisões que impactam significativamente o custo de um projeto. A seguir, cada um destes itens é detalhado.

3.2.2.1.
Quantidade de circuitos elétricos

A NBR5410 orienta que os circuitos de distribuição devem ser divididos segundo os seguintes critérios:

- Segurança: evitando que a falha de um circuito prive de alimentação toda uma área da instalação;
- Conservação de energia: possibilitando que as cargas sejam acionadas na justa medida das necessidades, evitando desperdícios;
- Funcionais: viabilizando a alimentação de ambientes diferentes e específicos (auditórios, salas de reunião, etc);
- Produção: minimizando as paralizações resultantes de uma ocorrência;
- Manutenção: possibilitando ações de inspeção e reparo.

Além desses critérios, existem outros aspectos mais específicos que devem ser atendidos na distribuição elétrica segundo a NBR5410, são eles:

- Deve-se evitar qualquer risco de realimentação inadvertida através de outro circuito;
- Devem-se prever circuitos específicos para cargas críticas como sistemas de alarme, cargas sensíveis, cargas que exijam alimentação ininterrupta;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

- Os circuitos devem ser individualizados pela função dos equipamentos que alimentam, por exemplo: circuitos de iluminação, circuitos de tomadas, circuitos de refrigeração, etc;
- Os circuitos devem ser distribuídos entre as 3 fases de modo a permitir o maior equilíbrio possível de potência.

A aplicação desses critérios leva a definição da quantidade de circuitos de distribuição e a potência de cada um. Não há espaço para muitas variações visto que a divisão de circuitos possui condicionantes normativos bem definidos. Além do aspecto normativo, o aspecto funcional muitas vezes é prejudicado quando o viés custo é o mais relevante e isso deve ser evitado. Um projeto eficiente funcionalmente sob o ponto de vista de seu usuário deve sempre ser uma premissa básica ao se tomar qualquer iniciativa de cunho econômico. Portanto, não se deve procurar redução de custo através:

- da redução do número de circuitos;
- do uso de circuitos muito carregados eletricamente;
- do agrupamento de cargas sem relação em um mesmo circuito;
- do negligenciamento das necessidades funcionais dos usuários tanto no que diz respeito aos circuitos elétricos como no posicionamento das cargas.

Diante disso, percebe-se que são poucas as possibilidades de redução do custo de cabos elétricos através da alteração na quantidade ou composição dos circuitos. Menos ainda em variações de posição ou potência na carga a ser atendida.

Essa conclusão parte da premissa de que as definições da potência e posição das cargas a serem atendidas e da posição da subestação foram feitas antes que o posicionamento dos quadros de distribuição fosse analisado, que é o que ocorre com mais frequência. Naturalmente o mais adequado seria que o posicionamento dos quadros de distribuição fosse considerado desde o início e assim o aspecto “quantidade de circuitos” também poderia ser usado como um elemento de ajuste no trabalho de redução dos valores empregados nos sistemas de distribuição em baixa tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

3.2.2.2.
Localização dos quadros de distribuição

A localização dos quadros de distribuição ao longo de uma planta é o fator mais significativo no que se refere à redução do custo dos cabos elétricos de baixa tensão, uma vez que atua diretamente na redução do comprimento dos cabos, independente da potência dos circuitos.

A localização dos quadros de distribuição está limitada pelas restrições de posicionamento definidas pelo usuário e por algumas outras determinadas por normas de segurança, mas em geral, mesmo com essas limitações, uma grande área costuma estar disponível para o posicionamento dos quadros de distribuição.

Para facilitar a análise dividem-se os cabos elétricos relativos a um determinado quadro de distribuição em dois tipos:

- Alimentador geral: é o cabo entre a subestação ou quadro geral de baixa tensão e os quadros de distribuição de circuitos que se caracterizam por serem cabos de bitola maior, de uso menos frequente e consequentemente com um custo por metro mais elevado. Cada quadro de distribuição possui apenas um alimentador geral;
- Alimentador de carga: é o cabo entre o quadro de distribuição e a carga que se caracteriza por ser um cabo de bitola menor, de uso muito frequente e consequentemente com um custo por metro reduzido. Cada quadro de distribuição pode possuir vários alimentadores de carga.

Considera-se que a posição das cargas e da subestação não admitem variações visto que são definições funcionais do usuário que o projeto deve respeitar. Aproximando-se os quadros de distribuição da subestação ou do quadro geral de baixa tensão, tem-se uma redução no custo do alimentador geral do quadro de distribuição que é um elemento de preço significativo. Porém, em contrapartida haverá uma elevação do custo dos alimentadores das cargas que apesar de menos significativos no custo unitário, podem ser muito relevantes dependendo da quantidade de alimentadores de carga que o quadro de distribuição atende.

Evoluindo essa análise nota-se que para um dado conjunto de cargas atendidas pelo quadro de distribuição haverá uma posição ótima ao longo da

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

área permitida da planta na qual o custo dos cabos elétricos relativos a esse quadro de distribuição será o menor possível. Encontrar essa posição e utilizá-la para posicionar o quadro de distribuição, já pode ser chamada de uma alocação inteligente do quadro de distribuição e representa reduções significativas de custo.

Levar essa mesma análise para o nível de cada alimentador de carga e tentar identificar se a vocação de cada alimentador de carga seria a de ser posicionado próximo à subestação ou próximo à carga pode parecer o mais óbvio a fazer. Contudo, esse caminho se mostra inviável uma vez que ao analisar cada alimentador de carga separadamente não se tem como compará-lo com o alimentador geral do quadro de distribuição e deixa de ter sentido a existência de um quadro de distribuição. Portanto, a análise deve ser feita sobre o conjunto “alimentador geral e alimentadores de carga” que é o que define um quadro de distribuição.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

3.2.2.3.
Composição dos quadros de distribuição

Apesar da conclusão do item 3.2.2.2 indicar que a análise deve ser feita sobre o conjunto de cabos definido pelo quadro de distribuição, abre-se a possibilidade de avaliar as muitas combinações de quadros de distribuição possíveis visto que não existem restrições severas para a composição dos quadros de distribuição, nem normativas nem funcionais.

Alterando a composição de alimentadores de carga dos quadros de distribuição é possível obter um conjunto mais homogêneo de circuitos, onde todos sejam do mesmo tipo e, portanto onde uma decisão de posicionamento terá um efeito benéfico para todos os alimentadores de carga e não boa para alguns, mas não tão boa para outros. Uma hipótese pior seria o caso em que a decisão de posicionamento resultasse boa para alguns alimentadores de carga e ruim para outros levando a uma neutralização do efeito e a uma constatação equivocada de que o processo de otimização havia chegado ao seu limite.

O melhor agrupamento ou conjunto será aquele que permita que o quadro de distribuição tenha uma característica bem marcada:

- Tipo “carga”: mais econômico próximo da carga
- Tipo “fonte”: mais econômico próximo da fonte.

3.2.2.4.
Quantidade de quadros de distribuição

Já em relação à definição do número de quadros de distribuição que serão usados para alimentar esses circuitos e quais circuitos estão derivando de cada um, a norma NBR5410 não se manifesta e pouco ou nenhum impacto funcional traz para o usuário. O fato de utilizar mais ou menos quadros de distribuição para atender uma planta não traz associado nenhum benefício ou prejuízo direto no que se refere ao quantitativo de cabos elétricos que está sendo avaliado.

Entretanto, essa liberdade que o projeto possui em relação ao número de quadros de distribuição é importante, pois permitirá que as composições de circuitos dos quadros de distribuição sejam melhor definidas visto que se poderá fazer agrupamentos que acentuem bem a característica tipo fonte, por exemplo, mesmo que isso signifique um quadro de distribuição com poucos alimentadores de carga. O mesmo valeria para casos em que a característica tipo carga seria maximizada quando muitos alimentadores de carga estivessem reunidos num mesmo quadro de distribuição.

Portanto, a definição da quantidade de quadros de distribuição é um benefício indireto para e redução do custo dos cabos elétricos ao dar mais liberdade na definição da composição dos quadros de distribuição.

3.3.
Alocação inteligente de quadros de distribuição

Nos itens anteriores foi visto que apesar de muitos aspectos influenciarem na definição dos cabos elétricos de baixa tensão, vários deles não são passíveis de alteração, seja por questões normativas seja por decisões tomadas pelo usuário da planta na fase de concepção do projeto.

Entretanto, alguns aspectos podem ser alterados e possuem influência significativa sobre o custo dos cabos elétricos de baixa tensão de uma planta, são eles:

- a localização dos quadros de distribuição;
- a composição de circuitos do quadro de distribuição;
- a quantidade de quadros de distribuição;
- as restrições de posicionamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

Esses aspectos agora serão tratados matematicamente visando a quantificação de seu impacto e sua modelagem para o método de otimização escolhido.

3.3.1.
Ajuste pela localização

A base matemática para se alcançar o custo dos cabos elétricos de baixa tensão de uma planta deve levar em consideração os dois trechos básicos que compõem os circuitos elétricos na baixa tensão:

- Subestação – Quadro de Distribuição: que é atendido através de um único circuito chamado “Alimentador Geral” do quadro de distribuição que foi definido no item 3.2.2.2;
- Quadro de distribuição – Cargas: que é atendido por vários circuitos chamados “Alimentadores de Carga”, definidos também no item 3.2.2.2 e que são os responsáveis pela alimentação de cada carga efetivamente.

O custo dos cabos elétricos no trecho “Subestação x Quadro de Distribuição” é calculado através da seguinte equação:

$$C_{sub-QD} = \sum_{i=1}^{n} |(dx_i - dx_{sub}) + (dy_i - dy_{sub})| * P_{sub-QDi} \quad (4)$$

Onde:

C_{sub-QD}	é o custo do cabo entre o quadro de distribuição i e a Subestação, em reais;
$dx_i - dx_{sub}$	é a distância no eixo x entre a subestação e o quadro de distribuição i, em metros;
$dy_i - dy_{sub}$	é a distância no eixo y entre a subestação e o quadro de distribuição i, em metros;
$P_{sub-QDi}$	é o preço unitário do cabo dimensionado para alimentar o quadro de distribuição i, em reais/metro;
n	é o número total de quadros de distribuição.

Já o custo dos cabos elétricos no trecho “Quadro de Distribuição x Cargas” é calculado através da seguinte equação:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

$$C_{l-QD} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} |(dx_i - dx_l) + (dy_i - dy_l)| * P_{lj-QDi} \quad (5)$$

Onde:

C_{l-QD} é o custo do cabo entre o quadro de distribuição i e as cargas j, em reais;

$dx_i - dx_l$ é a distância no eixo x entre as cargas j e o quadro de distribuição i, em metros;

$dy_i - dy_l$ é a distância no eixo y entre as cargas j e o quadro de distribuição i, em metros;

P_{lj-QDi} é o preço unitário do cabo dimensionado para alimentar cada carga j a partir do quadro de distribuição i, em reais/metro;

n é o número total de quadros de distribuição;

m é o número de cargas em cada quadro de distribuição.

A partir dessas equações chega-se ao custo total dos cabos elétricos para um dado posicionamento dos quadros de distribuição, da subestação e das cargas, como sendo:

$$C_{total} = C_{sub-QD} + C_{l-QD} \quad (6)$$

O custo específico de cada circuito foi considerado no cálculo de C_{l-QD} ao contrário do uso de um custo médio para o trecho. Foi inserido o custo unitário do cabo utilizado por cada circuito, assim como a posição da carga atendida por ele e depois se agrupou os circuitos por quadro de distribuição. O uso de um custo médio para os cabos do trecho “Quadro de Distribuição – Cargas”, que pode parecer uma simplificação razoável numa análise rápida, insere um erro considerável nos resultados e não deve ser usado.

Outra observação importante é que a distância utilizada em todos os casos não foi a distância euclidiana, mas a distância nos eixos x e y somadas. Adotou-se esse critério porque os elementos de condução e condicionamento dos cabos, tais como eletrodutos, eletrocalhas e leitos mais comuns estão planejados em geral para rotas utilizando apenas ângulos retos, assim a aproximação matemática fica mais aderente à realidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

É importante perceber que os comportamentos atribuídos a cada quadro de distribuição mencionado nos itens anteriores, estão baseados numa determinada tabela de preços de cabos adotada. Variações nos preços dessa tabela podem alterar o comportamento dos conjuntos alimentador geral e alimentadores de carga e assim modificar as conclusões da análise de posicionamento dos quadros de distribuição. Outras considerações sobre o preço dos cabos serão abordadas mais a frente.

Pode-se verificar que as equações (4) e (5) são coerentes com as conclusões da análise do problema apresentadas no item 3.2.2.2. Essas equações indicarão a posição ótima para posicionar os quadros de distribuição de uma planta visando o menor custo com cabos elétricos.

3.3.2.
Ajuste pela composição e pela quantidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

Pode-se resumir o problema definido pelas equações (4) e (5) da seguinte forma:

- Condições fixas:
  - dimensões da planta;
  - posição das cargas;
  - posição da subestação;
  - preço dos cabos elétricos.
  - composição de quadros de distribuição;
  - número de quadros de distribuição;
- Condições variáveis:
  - posição do quadro de distribuição;

Nota-se que a *composição e quantidade de quadros elétricos* foram consideradas condições fixas ainda que nos itens 3.2.2.3 e 3.2.2.4 foram vistos que são definições que podem ser ajustadas. Entretanto, considerar essas condições como variáveis significa ampliar enormemente o número de possibilidades a ser estudado.

O universo de possibilidades das diversas opções de composição de quadros de distribuição é a combinação simples do número de circuitos definido para um quadro de distribuição pelos circuitos existentes no projeto, o que é definido pela seguinte combinação:

$$\binom{t}{k} = \frac{t!}{k!(t-k)!} \quad (7)$$

Onde:

t é o número total de circuitos existentes no projeto;

k é o número de circuitos previsto para o quadro de distribuição.

Utilizando os dados do exemplo apresentado no item 3.1.2, seria preciso utilizar 10 quadros de distribuição com 8 circuitos cada um para atender a necessidade do projeto de 80 circuitos. Isso leva ao seguinte número de composições possíveis para os quadros de distribuição:

$$\binom{80}{8} = \frac{80!}{8!(80-8)!} = 2{,}9 * 10^{10} \quad (8)$$

Considerando ainda que o número de circuitos previstos em cada quadro de distribuição pode variar de um mínimo de 2 circuitos por quadro de distribuição a um máximo de 100 circuitos[4] (que nesse caso estaria limitado aos 80 circuitos definidos pelo exemplo), tem-se:

$$\sum_{k=2}^{80}\binom{80}{k} = \sum_{k=2}^{80}\frac{80!}{k!(80-k)!} \quad (9)$$

Esse número seria muito elevado e inviabilizaria qualquer modelo matemático. Em função disso, optou-se por manter essas condições fixas.

Contudo, se admite que variações manuais sobre a composição dos quadros de distribuição possam ser realizadas durante o processo de simulação matemática no intuito de buscar reforçar a característica de um ou outro, quadro de distribuição que não apresente um comportamento tipo carga ou tipo fonte bem definido.

3.3.3. Considerações sobre o preço dos cabos de cobre

Se o preço dos cabos elétricos fosse consequência única de seu peso em cobre, que por sua vez, é diretamente proporcional a sua capacidade de condução de corrente, a composição dos circuitos de um quadro de distribuição

[4] Maior capacidade para quadros de distribuição encontrada em pesquisa realizada junto aos fabricantes tradicionais desse produto para o mercado brasileiro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

não afetaria sua alocação ótima, pois o custo dos cabos à montante e à jusante dos quadros de distribuição seria o mesmo. Nesse caso, o único fator que resultaria em uma economia seria a localização dos quadros de distribuição. Contudo, o que ocorre de fato é que o preço dos cabos elétricos varia não só por seu peso em cobre, mas também pela demanda do mercado.

3.3.3.1.
Preferências do mercado

Algumas bitolas de cabos são mais procuradas pelos compradores por questões como facilidade de manuseio ou versatilidade no uso. Os fabricantes de cabos elétricos, atentos às escolhas do mercado, produzem maiores quantidades das bitolas mais procuradas e seus preços ficam mais atrativos, seja pela maior oferta seja pelos menores custos de produção devido aos maiores volumes produzidos. Isso significa que existem determinadas bitolas de cabos cujos preços são mais atrativos que outras e isso têm consequências para esse estudo.

Nas figuras 3 e 4 apresentam-se gráficos elaborados a partir da cotação de um dos maiores fabricantes nacionais de cabos elétricos de cobre, mostrando a relação entre o custo do cabo de cobre no mercado pela capacidade de condução corrente para as diferentes bitolas existentes, considerando instalação em eletroduto e as diferentes classes de isolamento típicas no mercado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

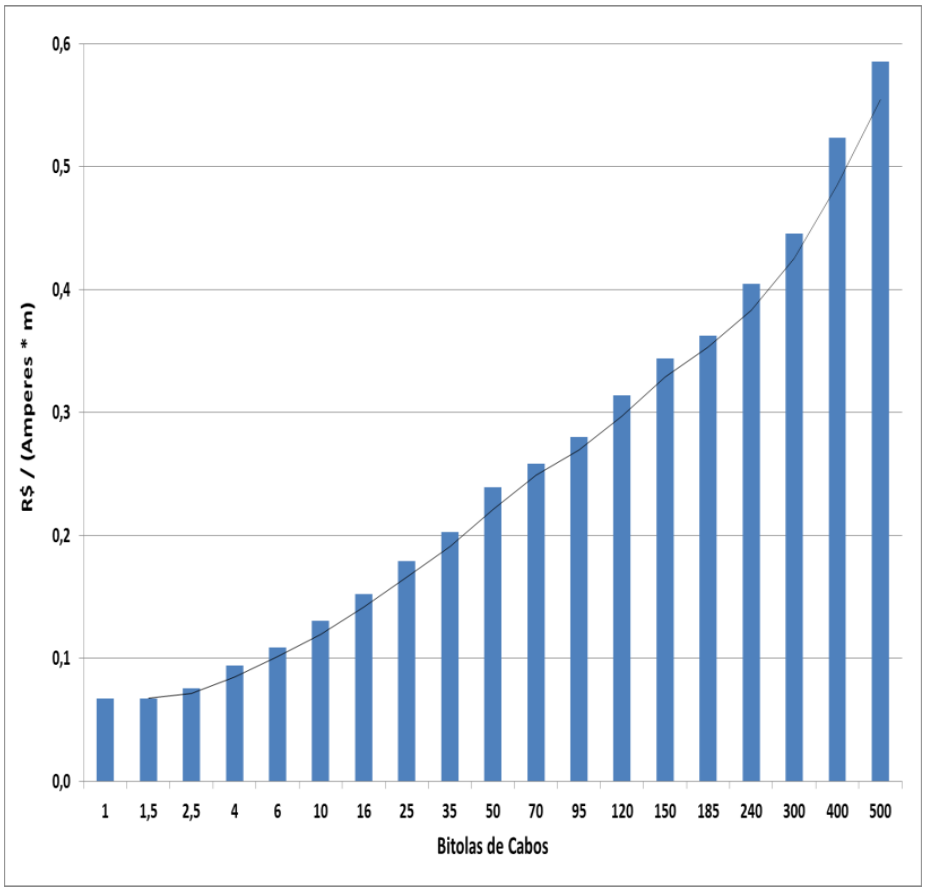

Figura 1 - Cabos classe 750V.

Fonte: Prysmian Group, 2015

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

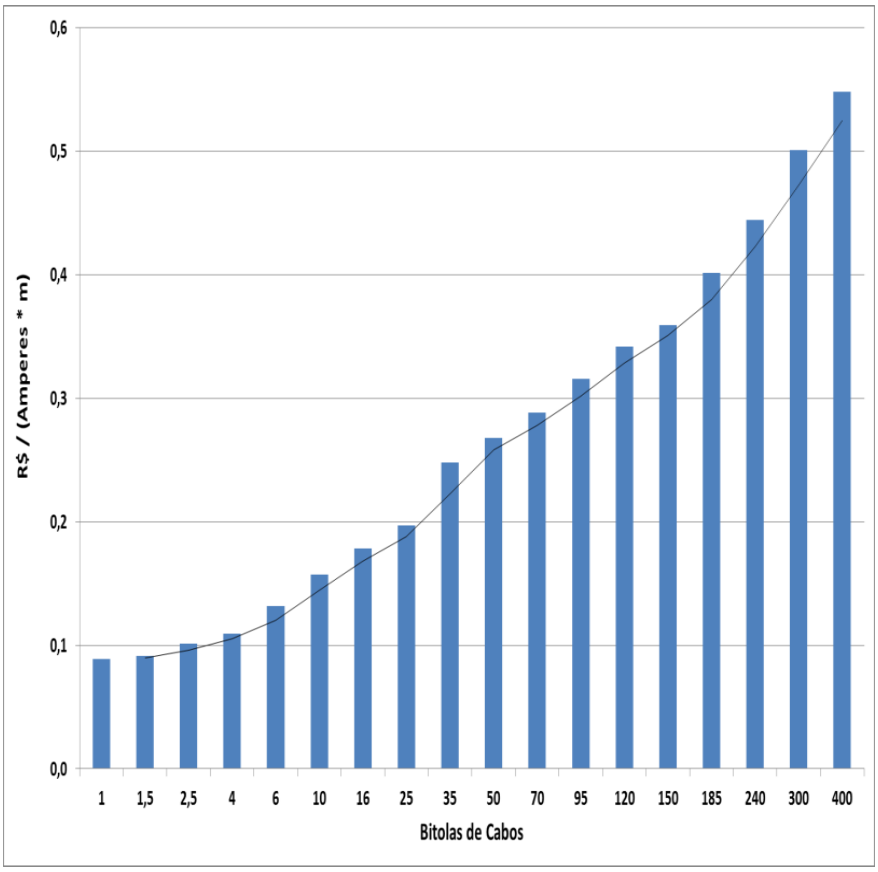

Figura 2 - Cabos classe 0,6/1kV.

Fonte: Prysmian Group, 2015

Analisando esses gráficos se nota que os cabos de menor bitola tem uma relação de custo por capacidade de condução mais baixa e mais estável que os cabos de maior bitola onde a relação de custo por capacidade de condução é muito maior e a variação de uma bitola para outra é muito significativa. Além disso, percebe-se que algumas bitolas apresentam uma relação melhor que outras proporcionalmente. Usando os cabos classe 750V como exemplo, o cabo de 185mm^2, o cabo de 2,5mm^2 e o cabo de 1,5mm^2 são casos que apresentam uma melhor relação em relação aos que estão em suas proximidades, por outro lado, cabos como o de 400mm^2 e 500mm^2 são extremamente caros proporcionalmente e devem ser evitados. Dos gráficos das figuras 3 e 4 conclui-se que é preferível utilizar os cabos de menor bitola em detrimento dos de maior bitola no projeto elétrico de baixa tensão.

Como foi explicado no item 3.2.2.1, não se deve considerar o aspecto custo do cabo na definição das cargas que compõem cada circuito. Entretanto, é possível ajustar a composição dos quadros de distribuição de modo que os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

alimentadores gerais sejam de alguma das bitolas preferenciais do mercado. Essa medida irá ajudar na redução do custo dos cabos elétricos e nada mais é que, ajustar a composição dos quadros de distribuição.

3.3.3.2.
Desequilíbrio entre oferta e procura

Outro aspecto a ser considerado com respeito ao preço dos cabos é o equilíbrio entre oferta e demanda de um modo geral. Dadas as características do mercado de cobre já mencionadas no item 1.1, nota-se que esse mercado é muito susceptível a desequilíbrios entre oferta e demanda e, consequentemente, é comum a ocorrência de variações bruscas na cotação do cobre e assim dos cabos elétricos feitos com esse metal, vide figura 1.

Essas variações atingem todos os cabos e não apenas determinadas bitolas. Todavia, em alguns países esses desequilíbrios apresentam um impacto mais forte, em função dos estoques e da demanda locais e da apreciação de cada moeda frente o dólar americano. Isso significa que a alocação inteligente dos quadros de distribuição proposta nesse estudo poderá ter resultados diferentes quando aplicada em países diferentes, ou ao menos, quando os cabos forem comprados em países diferentes.

3.4.
Efeito Joule e emissões de CO_2

A alocação inteligente dos quadros de distribuição visa principalmente à redução dos custos de um empreendimento e isso se dá através da redução na quantidade de cabos elétricos de baixa tensão. Um efeito colateral dessa redução da quantidade de cabos elétricos é a redução das perdas elétricas que estão associadas aos cabos. As perdas elétricas se materializam através do aumento da temperatura dos condutores, fenômeno conhecido como efeito Joule. Por outro lado, a emissão de CO_2 associada ao uso de cabos elétricos também está vinculada a quantidade de cabos utilizada em um projeto. É preciso avaliar o impacto que a alocação inteligente provoca nessas emissões.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

3.4.1.
Efeito Joule

Qualquer que seja o material condutor utilizado haverá sempre uma impedância elétrica associada a ele. Desconsidera-se a parcela reativa (indutiva e capacitiva) por ser menos significativa em circuitos de extensão pequena como é o caso dos circuitos de baixa tensão. Entretanto, a parcela resistiva da impedância não é desprezível, especialmente em circuitos submetidos a elevadas correntes elétricas como é o caso dos circuitos em baixa tensão.

Quando um circuito elétrico entra em funcionamento, iniciando a circulação de corrente entre seus elementos, essa corrente circula também pelos cabos elétricos do circuito e pode-se calcular a energia gasta pela passagem da corrente elétrica sobre o elemento resistivo (resistência) que compõem o cabo. Essa energia é dissipada para o meio-ambiente na forma de calor. A equação abaixo exprime o fenômeno:

$$E = R\, i_{nom}^2 \Delta T \tag{10}$$

Onde:

E é a energia dissipada ao longo do cabo em (Wh);

R é a resistência elétrica do condutor em (Ω);

i_{nom} é a corrente nominal do circuito em (A);

ΔT é o intervalo de tempo de funcionamento do circuito em (h);

A resistência R do condutor é função da extensão do material condutor, de sua seção transversal e do material que o compõe. A equação abaixo mostra isso:

$$R = \rho \frac{L}{S} \tag{11}$$

Onde:

ρ é a resistividade elétrica do material em (Ωm);

L é a extensão do material condutor em (m);

S é a seção transversal do condutor em (mm^2);

Substituindo (11) em (10), tem-se:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

$$E = \rho \frac{L}{S} i_{nom}^2 \Delta T \quad (12)$$

Isso significa que a perda de energia (perda Joule) nos cabos elétricos é diretamente proporcional a extensão do circuito, confirmando que a redução na quantidade de cabos elétricos provoca uma redução nas perdas Joule.

Não está sendo considerado o efeito Joule provocado pelas correntes em frequências diferentes de 60Hz ainda que no ambiente industrial seja comum a presença de harmônicas de 3ª e 5ª ordens entre outras. Em frequências mais elevadas a corrente tende a circular pela superfície exterior do cabo, fenômeno conhecido como Efeito Pelicular, assim, a corrente passa apenas em uma fração da seção do cabo resultando em uma resistência efetiva maior. Para considerar o efeito Joule em frequências diferentes de 60Hz seria necessário calcular as resistências em cada uma das frequências presentes e medir a corrente nessas frequências (Moreno, 2010).

Na equação (12) é visto que a seção do condutor também influi na perda Joule de um cabo, utilizar um cabo de seção maior reduz a perda. Entretanto, os cabos de seções maiores são mais caros e o mecanismo de alocação inteligente está baseado na minimização do preço dos cabos, sendo assim, algumas medidas de posicionamento definidas pelo método da alocação inteligente dos quadros de distribuição pode resultar em aumento da perda Joule em algum circuito, mas, em uma análise geral, o efeito será de redução da perda Joule visto que a quantidade total de cabos será reduzida. Esse ponto reforça a característica indireta que a redução das perdas por efeito Joule possui nesse trabalho.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

3.4.2.
O Efeito Estufa e as emissões CO2

O Efeito estufa é um processo físico que ocorre quando uma parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre é absorvida por determinados gases presentes na atmosfera. Como consequência disso, parte desse calor é irradiada de volta para a superfície, não sendo libertado para o espaço (Wikipedia, 2015).

Existem vários gases responsáveis por causar o Efeito Estufa, sendo chamados Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo o dióxido de carbono (CO_2) o que mais é emitido na atmosfera (Calili, 2013).

Um inventário de emissões é que irá definir quanto GEE deixarão de ser emitidos na atmosfera por um determinado projeto. O inventário de emissões é baseado em uma ferramenta da gestão ambiental que avalia o desempenho ambiental dos produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração dos recursos naturais, passando por todos os elos de sua cadeia produtiva, por seu uso, indo até seu descarte final, a Análise do Ciclo de Vida do produto ou ACV (Calili, 2013).

Ao longo do ciclo de vida dos fios e cabos elétricos, as mais significativas emissões de CO_2 são produzidas quando os condutores transportam energia elétrica, sendo relativamente pequenas na fase de fabricação e descarte desses produtos. Essas emissões de CO2 são resultantes da geração extra de energia necessária para compensar as perdas Joule na condução da corrente elétrica pelo circuito (Moreno, 2010).

Mantidos o tipo de cabo, a potência da carga a ser atendida e o tempo de uso, vemos pela equação 9 que a perda Joule estará diretamente relacionada ao comprimento do cabo elétrico. Assim, ao reduzir a quantidade de cabos elétricos em uma planta, a alocação inteligente dos quadros de distribuição reduz a perda por efeito Joule nessa planta.

Dado que o processo de alocação inteligente não altera o tipo de cabo utilizado, e desconsiderando as emissões de CO_2 decorrentes do processo de fabricação e descarte dos cabos elétricos de cobre, podem-se definir as emissões CO_2 evitadas pela alocação inteligente como sendo consequência apenas das emissões pelo uso dos cabos, ou seja, pelo transporte de energia elétrica através deles antes e depois da alocação inteligente.

A partir dessa consideração, as emissões anuais evitadas de CO_2 podem ser calculadas a partir da equação 13 a seguir, aplicada a cada circuito do projeto.

$$Z_{ev} = Z_0 - Z_1 = N_p R * 10^{-3} i_{nom}^2 (L_1 - L_0) \Delta T k \quad (13)$$

Onde:

Z_{ev} é a emissão anual de CO_2 evitada em (kg-CO_2);

Z_0 é a emissão anual de CO_2 antes da alocação inteligente em (kg-CO_2);

Z_1 é a emissão anual de CO_2 depois da alocação inteligente em (kg-CO_2);

N_p é o número de condutores de fase;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

R é a resistência elétrica do material condutor em (Ω*km);

L_1 é a extensão do material condutor do circuito depois da alocação inteligente em (km);

L_0 é a extensão do material condutor do circuito antes da alocação inteligente em (km);

ΔT é o intervalo de tempo de funcionamento do circuito em (h/ano);

k é a emissão de CO_2 no momento da geração por unidade de energia elétrica, em (kg-CO_2/kWh)[5];

Aplicando a equação 13 a todos os circuitos do projeto tem-se uma estimativa das emissões CO_2 evitadas em decorrência da alocação inteligente dos quadros de distribuição. Ressalta-se mais uma vez que não estão sendo consideradas as emissões provenientes dos ciclos de fabricação e descarte dos cabos já que para tal deveria ser feita uma análise completa da cadeia produtiva dos cabos de cobre.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312530/CA

[5] Este valor varia conforme característica da matriz energética de cada país, sendo maior nos casos onde fontes primárias de energia são poluentes (combustíveis fósseis) e menor onde as fontes primárias são mais limpas e renováveis (hidráulica, solar, eólica, etc.). No caso do Brasil, dados de 2006 indicam um valor de k = 0,081 kg-CO_2/kWh (Moreno, 2010).