

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
COMPUTAÇÃO

LUIZ FELIPE CASALI MIGLIATO

ANÁLISE DE METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA
TOMADA DE DECISÃO DA CONFIGURAÇÃO DE
BARRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

São Carlos

Novembro de 2017

LUIZ FELIPE CASALI MIGLIATO

**ANÁLISE DE METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA
TOMADA DE DECISÃO DA CONFIGURAÇÃO DE
BARRAMENTO DE SUBESTAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo. Curso de
Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas
de Energia e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada

São Carlos

Novembro de 2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M634	Migliato, Luiz Felipe Casali
Miga	Análise de metodologia para otimização da tomada de decisão da configuração de barramento de subestações / Luiz Felipe Casali Migliato; orientador Eduardo Nobuhiro Asada. São Carlos, 2017.
	Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.
	1. Configuração de barramento. 2. Subestação. 3. Disjuntor. 4. Chave Seccionadora. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Luiz Felipe Casali Migliato

Título: “Análise de metodologia para otimização da tomada de decisão da configuração de barramento de subestações”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 21 / 11 / 2017,

com NOTA 8,5 (oito , cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Eduardo Nobuhiro Asada - Orientador - SEL/EESC/USP

Prof. Associado Mário Oleskovicz - SEL/EESC/USP

Dr. Eduardo Werley Silva dos Ângelos - Pós-doutorando/SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

*À minha família, por sempre acreditarem e
estarem ao meu lado.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me possibilitar a ter todas as condições necessárias para poder concluir o tão almejado curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação na Universidade de São Paulo.

Agradeço aos meus pais, Antonio Luiz Tonissi Migliato e Iara Regina Casali Migliato, e ao meu irmão, William Casali Migliato, por todos os tipos de suportes que me foram oferecidos durante o curso e por sempre estarem ao meu lado, independentemente da situação.

Agradeço aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos. Em especial, ao Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada, pelo tempo e paciência durante a sua orientação para este trabalho.

Agradeço aos meus inúmeros amigos, presentes da vida, e colegas que estiveram ao meu lado durante a minha graduação nos bons e, principalmente, nos não tão bons momentos.

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram positivamente comigo.

Lista de figuras

Figura 1: Exemplo de subestação de geração.	28
Figura 2: Exemplo de subestação de interconexão.	28
Figura 3: Exemplo de subestação transformadora.	29
Figura 4: Exemplo de disjuntor de alta tensão para 145 kV [6].....	30
Figura 5: Representação usual de disjuntor em diagramas unifilares.....	31
Figura 6: Exemplo de chave seccionadora de alta tensão para 245 kV [6].....	32
Figura 7: Representação usual de chave seccionadora em diagramas.....	32
Figura 8: Barra simples – BS.	33
Figura 9: Barra simples seccionada – BSS.	34
Figura 10: Barra principal e transferência – BP + T.....	35
Figura 11: Barra dupla com 4 chaves – BD4.....	36
Figura 12: Barra anel – BA.....	37
Figura 13: Barra dupla com disjuntor e meio – DJM.....	38
Figura 14: Nomeação das chaves seccionadoras.	44
Figura 15: Fluxograma da aplicação da metodologia	59

Lista de tabelas

Tabela 1: Pontuações do critério de avaliação de garantia [9].	41
Tabela 2: Pontuações do critério de avaliação de continuidade [9].	43
Tabela 3: Pontuações do critério de avaliação de flexibilidade [9].	46
Tabela 4: Pontuação – Barra simples [9].	47
Tabela 5: Pontuação – Barra simples seccionada [9].	48
Tabela 6: Pontuação – Barra principal e transferência [9].	50
Tabela 7: Pontuação – Barra dupla com 4 chaves [9].	51
Tabela 8: Pontuação – Barra anel [9].	52
Tabela 9: Pontuação – Barra dupla com disjuntor e meio [9].	54
Tabela 10: Ponderação – Subestação de geração [9].	55
Tabela 11: Ponderação – Subestação de interconexão [9].	56
Tabela 12: Ponderação – Subestação transformadora [9].	57
Tabela 13: Avaliação geral [9].	60
Tabela 14: Ponderação – Caso fictício.	62
Tabela 15: Pontuação geral das configurações – Caso fictício.	63

Resumo

Devido às dificuldades que podem surgir durante a escolha mais adequada de uma configuração de barramento para uma subestação de alta tensão, esta monografia busca trazer de forma objetiva uma metodologia que pode ser aplicada para dar suporte ao processo de escolha do barramento. Para tanto, expõe-se os conceitos relevantes de subestações de alta tensão, os principais componentes que determinam a configuração da mesma e quais as configurações mais convencionais. Apresenta-se a metodologia e, depois, a aplicação em um estudo de caso com condições similares ao encontrado em uma subestação de alta tensão no Brasil. Por fim, avalia-se os resultados alcançados mostrando o desempenho da metodologia.

Palavras-chave: Configuração de barramento, Subestações, Disjuntor, Chave Seccionadora

Abstract

Due to the difficulties that may arise during the most appropriate choice of a bus configuration for a high voltage substation, this monograph seeks to objectively study a methodology that can be applied to support the bus selection process. For this, the relevant concepts of high voltage substations, the main components that determine the configuration of the same and which are the most conventional configurations are exposed. Is presented the methodology and then the application in a case with conditions similar to that found in a high voltage substation in Brazil. Finally, the results achieved showing the performance of the methodology are studied.

Keywords: Busbar configuration, Substations, Circuit-breaker, Disconnectors

Sumário

1.	Introdução	23
1.1	Caracterização do problema	23
1.2	Motivação	24
1.3	Objetivo	24
1.4	Estrutura do trabalho	25
2.	Subestações	27
2.1	Classificação das subestações	27
2.2	Equipamentos de Manobra	29
2.2.1	Disjuntor	30
2.2.2	Chave Seccionadora	31
2.2.3	Outros Equipamentos.....	32
2.3	Configurações Típicas.....	33
2.3.1	Barra Simples – BS	33
2.3.2	Barra Simples Seccionada – BSS	34
2.3.3	Barra Principal e Transferência – BP + T	34
2.3.4	Barra Dupla com 4 Chaves – BD4.....	35
2.3.5	Barra Anel – BA.....	36
2.3.6	Barra Dupla com Disjuntor e Meio - DJM.....	37
3.	Metodologia para Otimização da Configuração de Subestações.....	39
3.1	CrITÉrios de avaliação	40
3.1.1	Garantia do fornecimento de energia elétrica	40
3.1.2	Continuidade do fornecimento durante a manutenção.....	42
3.1.3	Flexibilidade de operação.....	44
3.2	Avaliação das configurações de barramento	46
3.2.1	Barra Simples - BS	47
3.2.1.1	Garantia do fornecimento de energia elétrica	47
3.2.1.2	Continuidade do fornecimento durante manutenção	47
3.2.1.3	Flexibilidade de operação.....	47
3.2.2	Barra Simples Seccionada – BSS	48
3.2.2.1	Garantia no fornecimento de energia elétrica	48

3.2.2.2	Continuidade no fornecimento durante manutenção	48
3.2.2.3	Flexibilidade de operação.....	48
3.2.3	Barra Principal e Transferência – BP + T	49
3.2.3.1	Garantia no fornecimento de energia elétrica	49
3.2.3.2	Continuidade no fornecimento durante manutenção	49
3.2.3.3	Flexibilidade de operação.....	49
3.2.4	Barra Dupla com 4 Chaves – BD4.....	50
3.2.4.1	Garantia no fornecimento de energia elétrica	50
3.2.4.2	Continuidade no fornecimento durante manutenção	50
3.2.4.3	Flexibilidade de operação.....	51
3.2.5	Barra em Anel – BA.....	51
3.2.5.1	Garantia no fornecimento de energia elétrica	51
3.2.5.2	Continuidade no fornecimento durante manutenção	52
3.2.5.3	Flexibilidade de operação.....	52
3.2.6	Barra Dupla com Disjuntor e Meio – DJM.....	53
3.2.6.1	Garantia no fornecimento de energia elétrica	53
3.2.6.2	Continuidade no fornecimento durante manutenção	53
3.2.6.3	Flexibilidade de operação	53
3.3	Funcionalidade da subestação	54
3.3.1	Subestação de geração.....	54
3.3.1.1	Garantia no fornecimento de energia elétrica	54
3.3.1.2	Continuidade no fornecimento durante manutenção	55
3.3.1.3	Flexibilidade de operação.....	55
3.3.2	Subestação de interconexão	56
3.3.2.1	Garantia no fornecimento de energia elétrica	56
3.3.2.2	Continuidade no fornecimento durante manutenção	56
3.3.2.3	Flexibilidade de operação.....	56
3.3.3	Subestação elevadora/abaixadora (transformadora)	57
3.3.3.1	Garantia no fornecimento de energia elétrica	57
3.3.3.2	Continuidade no fornecimento durante manutenção	57
3.3.3.3	Flexibilidade de operação	57
3.4	Avaliação Geral	58
4.	Estudo de caso.....	61
4.1	Caso fictício	61
4.2	Caso real	63

4.3	Análise	64
5.	Conclusão	67
	Referências Bibliográficas.....	69
	Anexo I – Subestação	71

1. Introdução

É indubitável o papel que a energia elétrica desempenha no mundo atual. Sendo o combustível básico do desenvolvimento de uma nação, está ligada diretamente ao crescimento econômico e populacional. Assim, a gestão estratégica, visando buscar melhorias nas etapas de geração, transmissão e distribuição na qual a energia elétrica está presente, torna-se de extrema importância.

Dentro do Sistema Elétrico de Potência (SEP), as subestações de alta tensão, que são o foco do trabalho, apresentam possibilidades para o desenvolvimento de melhorias como, por exemplo, a renovação de equipamentos obsoletos ou a utilização de técnicas e metodologias mais recentes e eficientes [1], [2].

No Brasil, os órgãos públicos como EPE – Empresa de Pesquisa Energética, ONS – Operador Nacional do Sistema e ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica são os responsáveis pela elaboração de todos os estudos e regulamentações, além dos projetos de avanços e infraestrutura da área. Assim, qualquer mudança ou melhoria adotada deve antes receber o estudo e a aprovação destes órgãos. Como, por exemplo, as configurações de barramento de subestações alternativas as referenciadas por estes devem ser submetidas à aprovação do ONS em tratamento com a ANEEL [3].

Neste âmbito, o trabalho apresenta uma proposta de melhoria no processo de escolha da configuração de barramento de subestações de alta tensão. A proposta é baseada em uma metodologia que pode atender as necessidades específicas que surgem durante tal processo e servir de estudo para a utilização de configurações alternativas no cenário brasileiro.

1.1 Caracterização do problema

A configuração de uma subestação tem por objetivo prover uma solução com o melhor custo-benefício, a qual tanto quanto praticável também demonstre alta disponibilidade, confiabilidade e flexibilidade operacional. Esta busca pela melhor configuração da subestação, entretanto, não é simples.

Inúmeros são os critérios que devem ser levados em conta para a escolha da configuração de barramento mais adequada. Envolvendo desde questões ambientais, como o

impacto no microclima local, níveis de ruído, até fatores econômicos, como espaço disponível, custo da terra, volatilidade do mercado de energia, entre outros [4].

Ainda que se tenham definidos quais os critérios que serão utilizados para a escolha da configuração, existem várias configurações possíveis que podem atender as necessidades requeridas pela subestação. Dentro destas possibilidades, para facilitar a escolha de qual configuração é a mais adequada, seria necessário um ranqueamento simplificado das opções com base em critérios definidos e em relação ao papel que esta subestação irá desempenhar dentro do sistema elétrico.

1.2 Motivação

Como citado anteriormente, seria de grande importância dar suporte no processo de tomada de decisão da configuração de subestação de alta tensão visto todas as barreiras e incertezas que podem aparecer na busca dentre as configurações existentes.

Assim, a motivação deste trabalho é buscar uma metodologia que possa avaliar, de maneira simples, as possíveis configurações através da relação entre critérios vinculados aos requisitos da subestação e a funcionalidade desempenhada pela subestação dentro do sistema elétrico. Desta forma, poderá dar suporte aos projetista ou a qualquer outro recurso que venha a ter a necessidade de selecionar uma configuração para uma subestação de alta tensão.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar, estudar a aplicação e efetividade da metodologia publicada no trabalho *Circuit Configuration Optimization* do grupo B3/C1/C2.2014 do CIGRÉ, de modo a verificar se as motivações estabelecidas acima são atendidas.

A metodologia será estudada e sua avaliação será dada através de um estudo de caso, no qual será realizada uma situação fictícia similar à realidade e a configuração adequada comparada ao de uma subestação de alta tensão existente.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado, de modo que, no primeiro capítulo se encontra a introdução junto com a motivação e o objetivo deste trabalho.

O segundo capítulo irá apresentar os conhecimentos referentes às subestações, objeto de estudo do trabalho. Dentro deste capítulo será tratado o papel da subestação dentro do SEP, as suas classificações e funcionalidades, quais os principais componentes que a compõe e as configurações mais usuais.

O terceiro capítulo irá apresentar a metodologia e todo o seu desenvolvimento, quais são os critérios utilizados, como pontuá-los e ponderá-los e, ao final, como ranquear as configurações e assim, poder ter suporte no processo de tomada de decisão da configuração da subestação.

O quarto capítulo abordará os estudos de caso, um fictício e outro real que apresentam certa similaridade. O método será aplicado e a configuração apontada avaliada.

E, por fim, o quinto capítulo trará as conclusões finais referentes ao trabalho.

2. Subestações

As subestações, dentro do Sistema Elétrico de Potência, podem ser definidas como um conjunto de equipamentos com a função de chavear, transformar, proteger e/ou regular a tensão. Sua principal função, como um todo, é garantir um alto grau de disponibilidade, confiabilidade e flexibilidade de operação ao sistema elétrico onde está inserida. Garantindo assim, a remoção instantânea de elementos/partes faltosas e a restauração do fornecimento de energia elétrica o mais breve possível através dos dispositivos de segurança e manobra [5].

O trabalho em questão abordará as subestações dentro dos contextos tangíveis pela metodologia. Não é do objetivo um detalhamento específico que fuja dos conceitos envolvidos. Portanto, serão expostos apenas os aspectos abordados dentro da mesma. Maiores conhecimentos em todos os outros aspectos podem ser encontrados na literatura como em [6], [7], [8].

Assim, torna-se importante o entendimento da classificação da subestação quanto à sua função e ao nível de tensão; quanto aos principais componentes que caracterizam a configuração da subestação, ou seja, os equipamentos de manobra: disjuntor e chave seccionadora; quanto as configurações típicas existentes que se tornam as bases para outras configurações.

2.1 Classificação das subestações

As subestações podem ser classificadas quanto:

1. À sua função [9]:

- **Geração:** O principal propósito deste tipo de subestação, visto na Figura 1, é garantir o acesso da energia gerada para o sistema elétrico e eliminar a unidade geradora da rede em caso de algum curto-circuito.

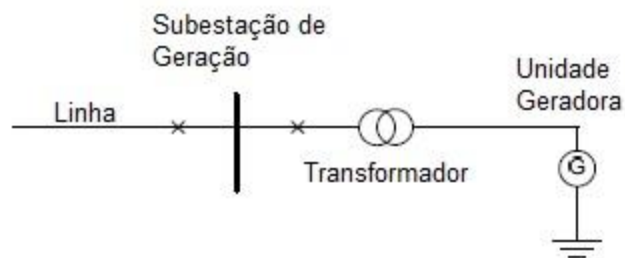


Figura 1: Exemplo de subestação de geração.

- **Interconexão:** A principal função deste tipo de subestação é permitir a conexão das linhas de transmissão, coletando e distribuindo a energia dentro da rede, como observado na Figura 2.



Figura 2: Exemplo de subestação de interconexão.

- **Abaixadora/Elevadora (Transformadoras):** A função deste tipo de subestação, observada na Figura 3, é transferir a tensão de um certo nível para outro através de transformadores de potência instalados na planta. Geralmente alimentam as redes de distribuição.

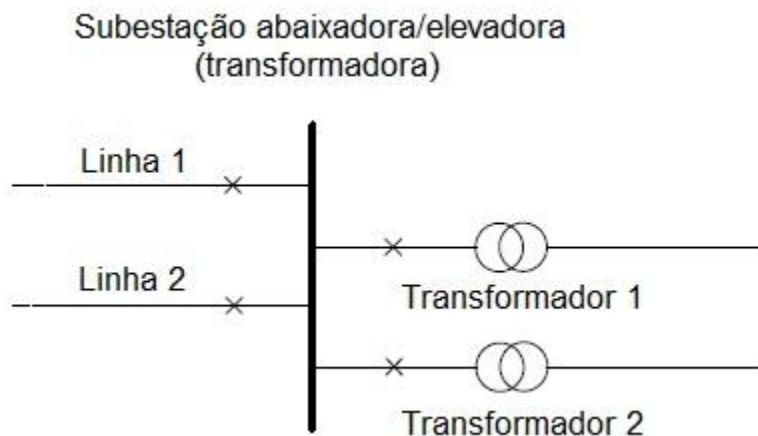


Figura 3: Exemplo de subestação transformadora.

2. Ao nível de tensão [6]:

- **Baixa Tensão (BT):** Até 1 kV;
- **Média Tensão (MT):** De 1 kV até 69 kV;
- **Alta Tensão (AT):** De 69 kV até 230 kV;
- **Extra Alta Tensão (EAT):** De 230 kV até 800 kV e
- **Ultra Alta Tensão (UAT):** Acima de 800 kV.

2.2 Equipamentos de Manobra

Os equipamentos de manobra, também conhecidos como equipamentos de chaveamento, podem ser definidos como os dispositivos designados para interromper e/ou segmentar os circuitos elétricos em uma ou mais porções [10]. Os equipamentos de alta tensão são utilizados dentro da subestação e são necessários para a operação da mesma dentro do sistema elétrico. Também, pela quantidade e arranjo, são os responsáveis por atribuírem as configurações às subestações.

2.2.1 Disjuntor

O disjuntor é um equipamento de manobra mecânico capaz de conduzir e interromper correntes sob condições nominais de operação e, também, de conduzir e interromper em um tempo específico correntes sob condições anormais de operação, como a observada em um curto-circuito [10], por exemplo. A Figura 4 apresenta um modelo de alta tensão.



Figura 4: Exemplo de disjuntor de alta tensão para 145 kV [6].

É o principal item dentre os equipamentos de alta tensão. É usado para conectar ou desconectar circuitos dos barramentos e/ou conectar diferentes barramentos ou secções. Também é empregado para controlar o fluxo de potência do sistema elétrico e interromper

correntes de falta, isto é, desconectar uma parte faltosa do sistema. É necessário que a confiabilidade deste item seja muito alta [9].

Existem vários tipos de disjuntores, com os mais variados tipos de isolamento e funcionamento. Para o escopo do trabalho, é necessário entender apenas sua funcionalidade e representação dentro do diagrama unifilar, conforme Figura 5. As outras características podem ser encontradas em [6], [11].



Figura 5: Representação usual de disjuntor em diagramas unifilares.

2.2.2 Chave Seccionadora

A chave seccionadora, como a observada na Figura 6, é um equipamento de manobra mecânico o qual providencia, na posição aberta, uma distância de isolamento que atende as normas elétricas. É capaz de operar um movimento de abertura e fechamento quando interrompe uma corrente negligenciável ou quando ocorre uma diferença de potencial não significativa entre os terminais de um polo. Também é capaz de conduzir correntes sob condições nominais de operação e de conduzir, em um tempo específico, correntes sob condições anormais de operação, como a observada em um curto-circuito [10], por exemplo.

As seccionadoras, dentro das subestações, são responsáveis pelas realizações das manobras dos circuitos elétricos sem carga, ou seja, quando já estão desenergizados. Desta forma, garantem o isolamento de outros equipamentos e/ou barramentos [6].

Existem diversos tipos de chaves seccionadoras, com os mais variados tipos de acionamento e funcionamento. Porém, todas atendem ao mesmo objetivo e para o escopo do trabalho, é necessário entender apenas sua funcionalidade e representação dentro do diagrama unifilar, conforme Figura 7. As outras características podem ser encontradas em [6], [11].



Figura 6: Exemplo de chave seccionadora de alta tensão para 245 kV [6].



Figura 7: Representação usual de chave seccionadora em diagramas.

2.2.3 Outros Equipamentos

Existem outros inúmeros equipamentos que fazem parte da complexa estrutura elétrica que é a subestação. Pode-se destacar os equipamentos de proteção, como, por exemplo, os relés, os para-raios, os equipamentos de instrumentação, como os transformadores de potencial e os transformadores de correntes.

Porém, tais equipamentos não estão no escopo do estudo e podem ser estudados na literatura [12], [13], [14].

2.3 Configurações Típicas

A configuração de uma subestação é dada pela disposição e quantidade de disjuntores e chaves seccionadoras ligados a um ou mais barramentos. Sua identificação ocorre facilmente pela análise do diagrama unifilar, representação mais usual, da subestação em questão. A seguir, são apresentadas as configurações típicas de subestações.

2.3.1 Barra Simples – BS

A configuração de barra simples, mostrada na Figura 8, é caracterizada por ter todas as linhas conectadas em um único ponto, ou seja, em um único barramento. É a configuração que se destaca pela maior simplicidade, facilidade de operação e custo baixo de instalação. Em outra via, apresenta o menor nível de segurança e a menor flexibilidade em casos de falta ou manutenções [15].

Sua ocorrência é maior em subestações transformadoras que estão conectadas em malhas no sistema de subtransmissão, visto que a necessidade da continuidade no fornecimento pode ser suprida pela rede (outros caminhos) em caso de desligamento da subestação [7].

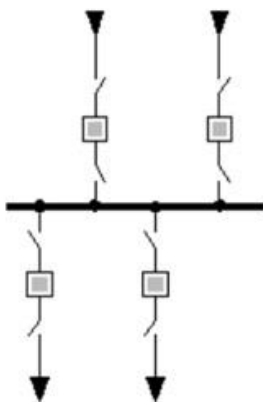


Figura 8: Barra simples – BS.

Existem várias possibilidades de variação da configuração BS, nas quais os quesitos de segurança e flexibilidade são melhorados. Algumas são apresentadas em seguida.

2.3.2 Barra Simples Seccionada – BSS

A configuração barra simples seccionada é uma variação do arranjo barra simples. A diferença consiste em um disjuntor ou uma chave seccionadora conectada em série ao barramento da subestação. A existência deste disjuntor ou chave permite conectar ou desconectar as duas secções do barramento providenciando, assim, uma maior flexibilidade e disponibilidade da subestação para manutenção [10]. A aplicabilidade é a mesma do arranjo BS. A Figura 9, a seguir, apresenta tal configuração.

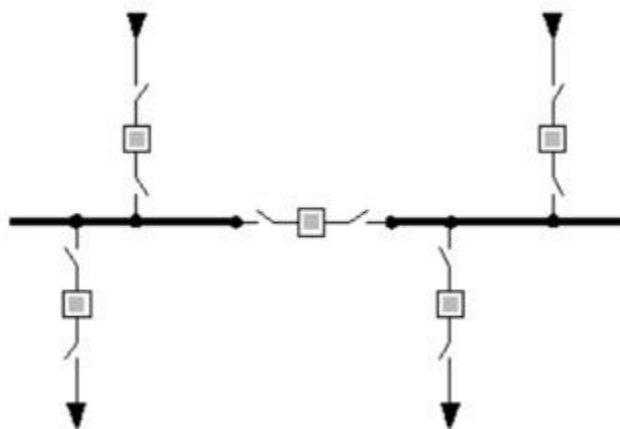


Figura 9: Barra simples seccionada – BSS.

2.3.3 Barra Principal e Transferência – BP + T

A configuração barra principal e transferência é, também, uma variação da configuração barra simples. A principal diferença está no fato de que esta configuração apresenta duas barras, uma denominada barra principal e outra barra de transferência. A barra principal é a que permanece energizada durante a operação normal da subestação enquanto a de transferência, permanece desenergizada [6], [10].

A barra de transferência é energizada pelo fechamento das chaves seccionadoras e do disjuntor *by-pass* ou de transferência apenas em casos de manobras especiais como, por

exemplo, processo de manutenção ou limpeza. A vantagem está na retirada de um disjuntor para manutenção sem que seja necessário permanecer com o sistema desenergizado, o nível de proteção é mantido pelo disjuntor *by-pass* [9]. Porém, na maioria do tempo, a barra de transferência permanece desenergizada [7].

É utilizada, geralmente, em locais que exigem continuidade no fornecimento e em locais com alto nível de poluição, uma vez que a necessidade de limpeza dos equipamentos presentes ao ar livre torna-se maior [16].

A Figura 10 traz a representação de uma subestação com a configuração barra principal e transferência.

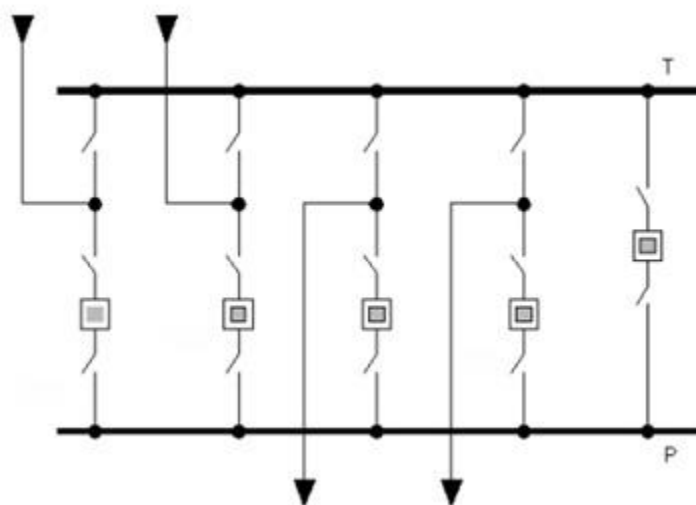


Figura 10: Barra principal e transferência – BP + T.

2.3.4 Barra Dupla com 4 Chaves – BD4

A configuração barra dupla com quatro chaves, como visto na Figura 11, apresenta dois barramentos aos quais cada circuito é conectado por meio de chaves seccionadoras seletoras, ou seja, que permitem selecionar qual barramento energizar ou desenergizar. A existência de um disjuntor *by-pass* conectado entre os dois barramentos permite manobras em casos de emergência ou manutenção, o que confere um maior nível de segurança e de continuidade a esta configuração [7].

No Brasil, esta é a configuração de barramento mais utilizada para as classes de tensão 138 kV e 230 kV. Está especificada em [3] como o arranjo estabelecido para estas classes de tensão. A utilização de qualquer outro arranjo alternativo deve ser submetida a um estudo de confiabilidade e disponibilidade para comprovar desempenho similar ou superior.

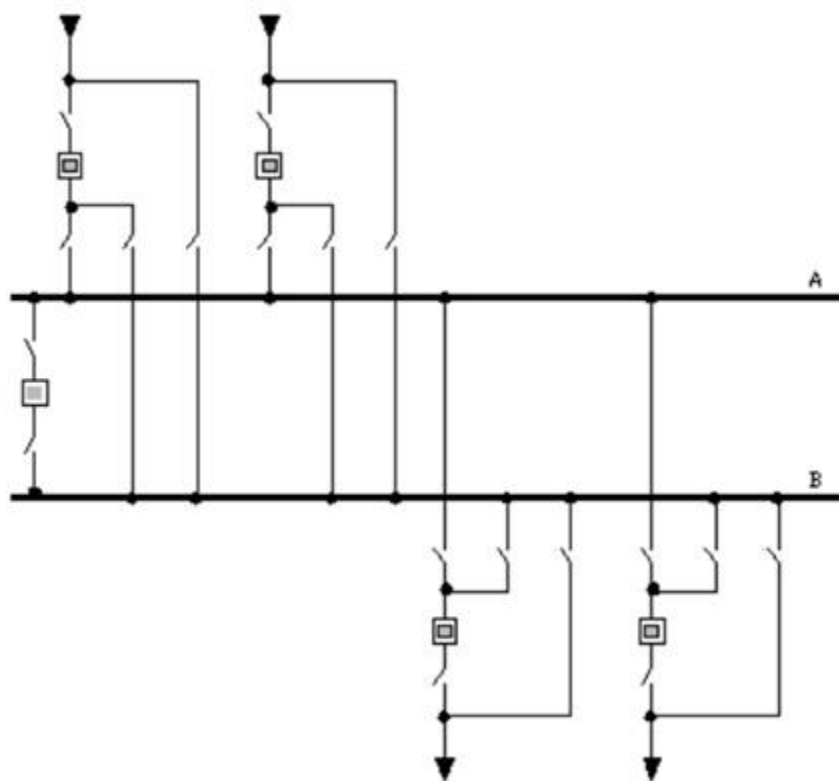


Figura 11: Barra dupla com 4 chaves – BD4.

2.3.5 Barra Anel – BA

As subestações que adotam a configuração de barra em anel apresentam o barramento constituído por disjuntores em forma de um laço fechado, como observado na Figura 12. Cada um dos circuitos está conectado ao barramento entre dois disjuntores, assim, torna-se necessário a existência de um disjuntor para cada circuito de entrada/saída [10]. Este fator eleva consideravelmente os custos com instalação e proteção da subestação. Por consequência, os níveis de segurança, continuidade e flexibilidade são relativamente altos em comparação com outras configurações [7].

Uma característica importante desta configuração é a de que os equipamentos devem ser dimensionados para operar um fluxo de até o dobro da corrente nominal devido às combinações de diferentes circuitos possíveis [9].

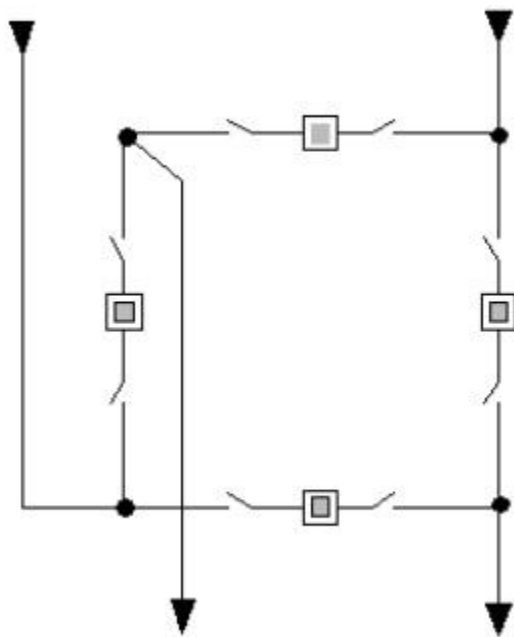


Figura 12: Barra anel – BA

2.3.6 Barra Dupla com Disjuntor e Meio - DJM

A configuração barra dupla com disjuntor e meio é formada por dois barramentos conectados por três disjuntores em série, sendo os circuitos ligados nos terminais do disjuntor do meio [10]. A Figura 13 apresenta tal configuração.

Esta configuração permite que as subestações sejam capazes de fornecer uma quantia de potência elevada. Usualmente, por ser composta por três disjuntores, é utilizada em pontos da rede com alto fluxo de potência e que devem apresentar alta confiabilidade com continuidade de serviço [9].

Porém, é justamente essa quantidade de disjuntores que agrega um alto custo de instalação para esta configuração. Além do mais, o espaço requerido para a disposição destes equipamentos é maior.

No Brasil, esta é a configuração de barramento mais utilizada para as classes de tensão igual ou superior a 345 kV. Está especificada em [3] como o arranjo estabelecido para estas classes de tensão. A utilização de qualquer outro arranjo alternativo deve ser submetida a um estudo de confiabilidade e disponibilidade para comprovar desempenho similar ou superior.

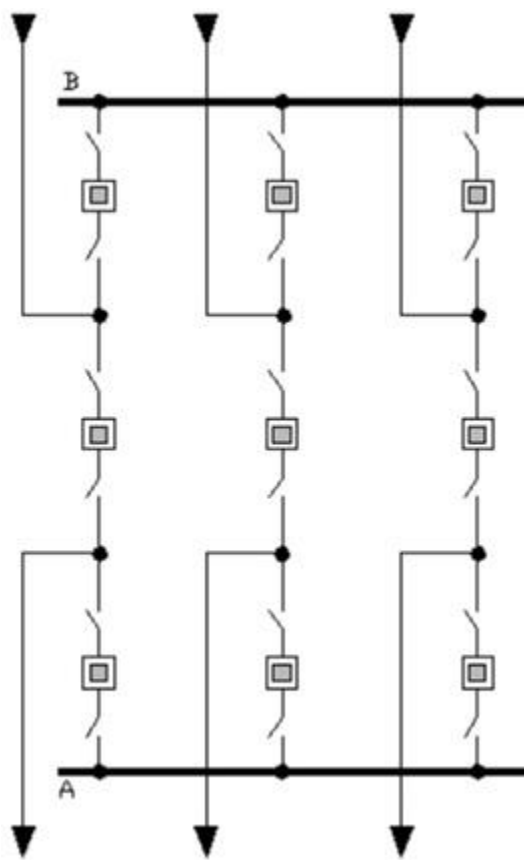


Figura 13: Barra dupla com disjuntor e meio – DJM.

3. Metodologia para Otimização da Configuração de Subestações

A metodologia que será apresentada e estudada está baseada na publicação do trabalho *Circuit Configuration Optimization* do grupo B3/C1/C2.14 do CIGRÉ.

A seleção da configuração de barramento de uma subestação mais adequada pode ser avaliada pela definição de critérios baseados em específicas áreas de importância para as concessionárias. Esses critérios devem basear-se no desempenho da rede e, então, serem utilizados na comparação das possíveis configurações da subestação.

Assim, torna-se importante a definição desses critérios logo nas fases iniciais do projeto justamente pela existência de muitos fatores que podem ser levados em conta para tal avaliação.

O método utiliza um aspecto de avaliação comum para poder comparar várias configurações de subestação, resultando, então, em uma linha de comparação.

Dentre os vários critérios de avaliação existentes que são aplicados para a escolha da configuração de barramento, a metodologia desenvolvida utiliza os seguintes:

- Garantia do fornecimento de energia elétrica;
- Continuidade do fornecimento durante manutenção e
- Flexibilidade de operação.

Como comentado anteriormente, existem outros fatores que podem ser levados em consideração para a escolha de uma configuração como, por exemplo, o fator econômico relacionado ao custo [9] e/ou fator local sobre a disponibilidade de espaço para construção [17]. Porém, como esta metodologia é uma avaliação técnica e tem como objetivo ser direta, tais fatores estão fora do escopo de estudo.

Inicialmente, o capítulo abordará os critérios de avaliação aos quais cada uma das várias configurações de subestações deve ser analisada. São descritos e definidos dentro dos itens da Seção 3.1. Também é definido como é feita a avaliação de cada um dos três critérios para as configurações de barramento na Seção 3.2. A ponderação para cada critério dependendo da funcionalidade da subestação é visto dentro da Seção 3.3. Na última Seção 3.4, é dada a visão geral da metodologia após a definição dos termos e explicação detalhada, através de um fluxograma e de uma tabela resumizando os tópicos.

3.1 Critérios de avaliação

3.1.1 Garantia do fornecimento de energia elétrica

A garantia do fornecimento de energia elétrica pode ser vista como a capacidade que a configuração de barramento de uma subestação (primária ou secundária) apresenta para operação, de tal forma que, a ocorrência de possíveis eventos não originem: perda de cargas, estresse em componentes do sistema além de suas classificações, tensão do barramento ou frequência do sistema fora das tolerâncias, desestabilização do sistema e, por último, colapso da tensão [15], tendo como consequência a interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Assim, adota-se este critério como sendo a capacidade que a configuração da subestação apresenta para, em um certo instante, na ocorrência de uma falta, manter o fornecimento de energia elétrica [9].

A garantia do fornecimento de energia elétrica é um aspecto muito importante a ser analisado visto a Resolução ANEEL nº 024/2000 [18] que cria novos indicadores de aferição da qualidade e continuidade do fornecimento da energia elétrica, para os quais são estabelecidos padrões e metas a serem cumpridos pelas concessionárias e, também, algumas obrigações e penalidades em caso de um descumprimento. Assim, a metodologia torna-se mais interessante por utilizar este aspecto.

Para uma melhor análise, a metodologia aborda dentro deste aspecto os critérios de segurança N-1 e N-2, que são adotados em diversos sistemas elétricos do mundo como uma maneira eficiente e prática de mitigar o corte de carga na ocorrência de contingências [19]. Estes critérios são:

- **Critério N-1:** O sistema é capaz de suportar uma contingência sem ultrapassar o seu limite tanto estático quanto dinâmico. Constitui uma falta única primária em qualquer elemento do sistema como, por exemplo, gerador, transformador, linha, reator e etc.
- **Critério N-2:** Em adição ao critério anterior, o sistema é capaz de suportar contingências que ocorrem simultaneamente ou sequencialmente. Constitui em uma falta dupla (simultânea ou sequencial) em qualquer elemento do sistema como, por exemplo, gerador, transformador, linha, reator etc.

O foco do estudo encontra-se na consequência para o sistema do comportamento da subestação sob a situação de contingência. Assim, se a configuração avaliada é capaz de suportar uma contingência sem afetar o sistema, a subestação irá proporcionar o maior grau de garantia no fornecimento de energia elétrica. Considerando o disjuntor como elemento divisor, dois grupos de contingências serão avaliados com base na localização da falta: faltas externas e faltas internas. As faltas externas são as faltas que ocorrem ao lado externo do disjuntor (de fora) como, por exemplo, transformador e linha de transmissão. Já as faltas internas são as que ocorrem ao lado interno do disjuntor, ou seja, no barramento. Algumas suposições adotadas são as de que como uma falta primária, tanto interna quanto externa, conduz um sinal de *trip* ao disjuntor, assim, será considerado que o critério N-1 é atendido. E, caso o disjuntor falhe e não opere após uma falta primária, o sistema de proteção atuará abrindo todos os disjuntores que estão, de alguma forma, interligados ao disjuntor que falhou e, neste caso, o critério N-2 é considerado atendido.

A Tabela 1 a seguir pontua, de acordo com os critérios N-1 e N-2 definidos acima, as possíveis consequências com valores de 1 até 6 dentro deste critério de garantia no fornecimento de energia elétrica.

Tabela 1: Pontuações do critério de avaliação de garantia [9].

Pontuação	Possíveis consequências ao sistema por conta de uma falta primária (critério N-1)	Possíveis consequências ao sistema por conta de falta primária seguida de falha no disjuntor (critério N-2)
1	Possível perda inteira da subestação	Perda inteira da subestação
2	Perda de uma ou mais alimentações, mas não a subestação inteira	Perda de mais de uma alimentação ou a subestação inteira
3	Perda de uma ou mais alimentações, mas não a subestação inteira	Perda de mais de uma alimentação, mas não a subestação inteira
4	Perda de uma alimentação	Perda de uma alimentação e, consequentemente, outra também, mas não a subestação inteira
5	Perda de nenhuma ou uma alimentação	Perda de uma alimentação e, possivelmente, mais uma alimentação, mas não a subestação inteira
6	Perda de nenhuma ou uma alimentação	Perda de uma alimentação

A menor pontuação, no caso 1, representa o maior impacto gerado no sistema e, que é dado justamente pela perda total da subestação no caso de uma falta primária. Já a maior pontuação, no caso 6, representa o melhor desempenho, ou seja, o menor impacto e consequência para o sistema no caso de uma falta.

3.1.2 Continuidade do fornecimento durante a manutenção

Outro aspecto importante que também é abordado dentro da metodologia apresentada é a continuidade ou a disponibilidade do fornecimento que a subestação pode prover para o sistema elétrico durante um processo de manutenção, sendo preventiva ou não.

A continuidade da subestação está ligada com a capacidade da mesma de manter sua operacionalidade para o sistema mesmo sob certas condições. Estas condições estão ligadas aos aspectos de manutenção dos elementos da subestação e, para esta análise, apenas os disjuntores e as chaves seccionadoras serão avaliados, visto que ambos são os elementos determinantes da configuração de barramento de uma subestação.

Como a continuidade de uma subestação também é avaliada em relação aos cálculos estatísticos da confiabilidade dos elementos que a compõe [20], sua análise torna-se bem complexa. A metodologia tem por objetivo uma análise simplificada. Assim, por conta da variedade de disjuntores e chaves seccionadoras e, também, de dados estatístico de confiabilidade, o estudo irá considerar apenas a continuidade de operação durante um processo de manutenção dos elementos definidos no parágrafo anterior.

Assim, define-se que a continuidade de operação durante um processo de manutenção é uma atribuição e capacidade da configuração da subestação em preservar suas conexões energizadas durante a ocorrência da manutenção em chaves seccionadoras e disjuntores [9].

Uma consideração neste caso também é a de que não existem riscos de falhas e/ou faltas primárias nos elementos operados para realização da manutenção. Entretanto, é notável lembrar que durante manutenções, a probabilidade da ocorrência de faltas pode aumentar significativamente [9], [20].

Na Tabela 2 são apresentadas as pontuações para os casos de onde a manutenção é realizada e as suas consequências para a subestação. A menor pontuação, no caso 1,

representa o maior impacto gerado no sistema e, que é dado justamente pela interrupção total da subestação no caso de uma manutenção. Já a maior pontuação, no caso 7, representa o melhor desempenho, ou seja, o menor impacto e consequência para o sistema no caso de uma manutenção.

Tabela 2: Pontuações do critério de avaliação de continuidade [9].

Pontuação	Local da manutenção	Consequência
1	Qualquer chave seccionadora ligada ao barramento	Interrupção total da subestação
2	Chave seccionadora de barramento	Interrupção total da subestação
3	Qualquer chave seccionadora ligada ao barramento ou de barramento	Interrupção em metade da subestação
4	Qualquer chave seccionadora ligada ao barramento	Interrupção de um barramento, elementos restantes continuam em serviço
5	Qualquer chave seccionadora ligada ao barramento	Interrupção de um barramento, elementos restantes no barramento duplo continuam em serviço
6	Qualquer chave seccionadora ligada ao barramento	Circuitos restantes continuam em serviço
		Anel aberto
		Segmentação da subestação
	Disjuntor	Segmentação da subestação e todos circuitos continuam em serviço
7	Qualquer chave seccionadora ligada ao barramento	Interrupção de um barramento, todos os elementos continuam em serviço
	Disjuntor	Todos os circuitos continuam em serviço

Existe uma distinção de nomeação entre chave seccionadora ligada ao barramento e chave seccionadora de barramento pela posição em que estão alocadas na configuração da subestação. A chave seccionadora ligada ao barramento é a chave que está ligada entre o barramento e o disjuntor, ou seja, está localizada ao lado interno do disjuntor. A chave

seccionadora de barramento está localizada no próprio barramento, conectada em série e, permite a segmentação do barramento da subestação. Existe ainda a chave seccionadora ligada externamente ao disjuntor, ou seja, está conectada entre o disjuntor e a linha de transmissão e/ou transformador. Sendo assim, por sua localização na subestação, qualquer manutenção ocasionará o desligamento dos elementos conectados neste ramo, independentemente de qual for a configuração de barramento analisada. Por isso, não há razões para mencionar esta chave na Tabela 2 [3], [9].

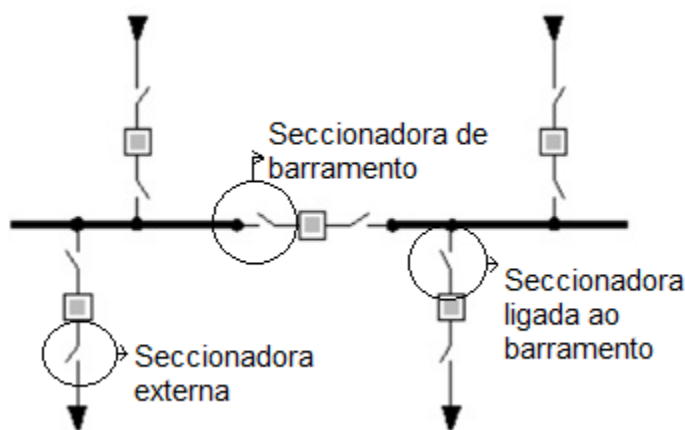


Figura 14: Distinção das chaves seccionadoras.

3.1.3 Flexibilidade de operação

O último critério utilizado pela metodologia é a flexibilidade de operação que uma configuração de barramento pode apresentar. Esta flexibilidade está relacionada com a capacidade ou não de segmentar, dividir uma subestação e o quão alto é este nível de flexibilidade.

Este critério é importante, visto a mobilidade que uma subestação pode apresentar. Em certos casos, é necessário ter esta mobilidade para sua funcionalidade no SEP como, por exemplo, em subestações de manobra/interconexão.

Podem ser destacadas as seguintes razões pela qual a necessidade de flexibilidade é requerida [9], em certos casos:

- Para limitar as consequências no caso de uma falta primária na subestação, como no caso de não perder dois circuitos que estejam fornecendo energia para uma carga. Por exemplo, dois transformadores ou duas linhas de transmissão podem ser conectados a barramentos diferentes. Assim, uma falta em um barramento ou a perda de alimentação em um deles apenas afetará um barramento enquanto o outro continua a fornecer. Neste caso, as duas partes da subestação estão conectadas durante a operação nominal, mas através de um disjuntor que garantirá a melhor disponibilidade e uso de cada barramento.
- Para limitar a corrente de curto-circuito.
- Para prevenir que a corrente nominal de operação exceda os valores padrões.
- Para capacitar o rearranjo das alimentações de entrada e saída da subestação de modo que esta corresponda com as necessidades e condições do sistema.

A flexibilidade de operação pode ser dada como a análise da capacidade da subestação de reconfigurar seus alimentadores e ser segmentada, fisicamente, em outro arranjo. Algumas configurações permitem a subestação ser dividida em mais do que duas partes. Entretanto, para o foco do estudo a proposta é apenas avaliar a flexibilidade em relação à divisão da subestação em duas partes. Na prática, isto ajuda também no controle e balanço do fluxo de potência adequado com os alvos em segurança, estabilidade e eficiência.

Na Tabela 3 são apresentadas as pontuações para as possibilidades dos casos de flexibilidade de operação. A menor pontuação, no caso 1, representa a menor flexibilidade, que é dada justamente quando não há a possibilidade de segmentação da subestação. Já a maior pontuação, no caso 6, representa o melhor desempenho, ou seja, é possível segmentar a subestação em duas partes elétricas separadas e existe um alto nível de flexibilidade em se fazer isto.

Tabela 3: Pontuações do critério de avaliação de flexibilidade [9].

Pontuação	Flexibilidade de operação
1	Divisão não é possível
2	Divisão não energizada (apenas chave seccionadora), sem flexibilidade
3	Divisão energizada (com disjuntor), sem flexibilidade
4	Divisão energizada (com disjuntor), baixa flexibilidade
5	Divisão energizada (com disjuntor), alta flexibilidade com manobra de chave seccionadora
6	Divisão energizada (com disjuntor) Alta flexibilidade, manobra com disjuntores Mais alta flexibilidade, manobra com chave seccionadora

3.2 Avaliação das configurações de barramento

Aqui será tratada a avaliação das configurações de barramento através do esquema de pontuação em relação aos três critérios definidos anteriormente. As configurações analisadas são aquelas discutidas dentro do Capítulo 2. Com base na análise dos critérios de avaliação, busca-se nas tabelas apresentadas no capítulo anterior a pontuação correspondente para cada caso. Ao final de cada configuração, é apresentada a pontuação adquirida dentro de cada um dos critérios.

3.2.1 Barra Simples - BS

3.2.1.1 Garantia do fornecimento de energia elétrica

A configuração está baseada em um ponto comum para todas as alimentações que é o próprio barramento. Isto significa que uma falta primária no barramento ocasionará a perda inteira da subestação. Cada circuito está conectado ao barramento através de apenas um disjuntor, ou seja, qualquer falha primária externa em uma alimentação quando o disjuntor falha em operar causará a perda da subestação inteira também.

3.2.1.2 Continuidade do fornecimento durante manutenção

Como a característica desta configuração está baseada em apenas um barramento, isto significa que a manutenção de qualquer chave seccionadora ligada ao barramento irá requerer uma interrupção de toda a subestação.

3.2.1.3 Flexibilidade de operação

Do ponto de vista operacional, esta configuração não oferece qualquer flexibilidade. Não existe a possibilidade de segmentação da subestação e nem de reduzir os níveis de curto-circuito.

Na Tabela 4 são apresentadas as pontuações correspondentes.

Tabela 4: Pontuação – Barra simples [9].

Critério	Pontuação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	1
Continuidade do fornecimento durante manutenção	1
Flexibilidade de operação	1

3.2.2 Barra Simples Seccionada – BSS

3.2.2.1 Garantia no fornecimento de energia elétrica

Durante as condições nominais de operação desta configuração, a chave seccionadora de barramento encontra-se fechada. Assim, apresenta o mesmo nível de segurança que o arranjo de barra simples na ocorrência de uma falta primária.

3.2.2.2 Continuidade no fornecimento durante manutenção

A presença da chave seccionadora de barramento possibilita, através de sua manobra, a manutenção de uma parte da subestação. Ou seja, apenas esta parte é interrompida ao invés de toda a subestação, como é no caso do arranjo de barra simples sem a seccionadora de barramento.

3.2.2.3 Flexibilidade de operação

Existe a possibilidade de segmentar a subestação pela abertura da seccionadora de barramento. Porém, uma interrupção de todos os circuitos de um lado da seccionadora de barramento é necessária para tal realização e ainda não existe a flexibilidade de escolha dos alimentadores que serão conectados ao barramento.

Na Tabela 5 são apresentadas as pontuações correspondentes.

Tabela 5: Pontuação – Barra simples seccionada [9].

Critério	Pontuação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	1
Continuidade do fornecimento durante manutenção	2
Flexibilidade de operação	2

3.2.3 Barra Principal e Transferência – BP + T

3.2.3.1 Garantia no fornecimento de energia elétrica

Em condições normais de operação, esta configuração apresenta, também, o mesmo nível de segurança estabelecido pelo arranjo de barra simples tanto na ocorrência de uma falta primária quanto pela falha de operação de um disjuntor. A situação da garantia no fornecimento é a mesma que a do arranjo de barra simples, mesmo com a presença do *by-pass*, uma vez que, por questão de segurança, o disjuntor de transferência fica impossibilitado de operar em caso de falta.

3.2.3.2 Continuidade no fornecimento durante manutenção

A presença da barra de transferência traz a principal vantagem desta configuração que é a possibilidade da retirada de um disjuntor de carga sem a necessidade de interrupção dos circuitos a este conectados. O nível de proteção durante esta realização é mantido pelo disjuntor existente de transferência.

3.2.3.3 Flexibilidade de operação

O barramento de transferência em conjunto com o disjuntor de transferência e suas chaves seccionadoras de transferência na posição aberto, possibilitam a divisão da subestação em duas partes distintas. Porém, a não existência de disjuntores nas chaves *by-pass* traz uma carência ao nível de proteção, uma vez que o disjuntor de transferência se encontra aberto. A inserção de dispositivos de proteção pode suprir esta carência.

É importante ressaltar que o barramento de transferência não tem por objetivo operar em conjunto com o barramento principal. Porém tal risco pode ser assumido. Assim, esta configuração apresenta uma alta flexibilidade pelas chaves *by-pass*.

Na Tabela 6 são apresentadas as pontuações correspondentes.

Tabela 6: Pontuação – Barra principal e transferência [9].

Critério	Pontuação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	1
Continuidade do fornecimento durante manutenção	7
Flexibilidade de operação	5

3.2.4 Barra Dupla com 4 Chaves – BD4

3.2.4.1 Garantia no fornecimento de energia elétrica

Neste caso, a existência de um barramento duplo, faz com que uma falta em algum dos barramentos não cause a interrupção total da subestação, apenas no barramento de ocorrência da falta. Já uma falta seguida de uma falha na abertura de um disjuntor deve interromper o funcionamento de toda subestação.

3.2.4.2 Continuidade no fornecimento durante manutenção

A presença das chaves seccionadoras *by-pass* junto ao disjuntor da *bay* do *by-pass* permite a remoção deste disjuntor para manutenção sem a necessidade de uma interrupção nos circuitos adjacentes.

Embora a retirada do sistema das chaves seccionadoras de barramento para manutenção seja acompanhada pela interrupção completa deste barramento, é possível que o circuito restante continue energizado, pela manobra das chaves seccionadoras, mantendo a configuração da subestação.

3.2.4.3 Flexibilidade de operação

A configuração da subestação permite a segmentação em duas partes elétricas independentes que assumem o arranjo de barra simples. Podendo os elementos adjacentes serem alocados para cada um dos dois barramentos, o que afere uma alta flexibilidade a esta configuração. Tal segmentação pode ocorrer com o sistema energizado.

Na Tabela 7 são apresentadas as pontuações correspondentes.

Tabela 7: Pontuação – Barra dupla com 4 chaves [9].

Critério	Pontuação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	3
Continuidade do fornecimento durante manutenção	7
Flexibilidade de operação	5

3.2.5 Barra em Anel – BA

3.2.5.1 Garantia no fornecimento de energia elétrica

Todos os alimentadores estão conectados com a subestação através de dois disjuntores e qualquer disjuntor é dividido entre dois alimentadores. No evento de uma falta primária no circuito, os dois disjuntores adjacentes serão abertos. Assim, o arranjo barra em anel será convertido em um arranjo barra simples. O arranjo poderá ser restaurado com o fechamento dos disjuntores que operaram após a eliminação da falta.

Uma falta primária não causará a interrupção de toda a subestação, apenas do alimentador faltoso. Porém, uma falta primária seguida por uma falha de operação do disjuntor causará, também, a interrupção de um segundo alimentador.

3.2.5.2 Continuidade no fornecimento durante manutenção

A manutenção de qualquer chave seccionadora contida no anel irá requerer uma interrupção do circuito correspondente. Uma manutenção, também, em qualquer elemento da subestação terá por necessidade a abertura do anel com conseqüente redução do nível de segurança.

Por conta de cada alimentador ter dois disjuntores, é possível dar manutenção a qualquer disjuntor sem a interrupção dos alimentadores correspondentes.

3.2.5.3 Flexibilidade de operação

O arranjo de barra em anel permite a segmentação da subestação em diversas possibilidades, dependendo de quais os dois disjuntores operados. Qualquer uma das segmentações pode ser feita com a subestação completamente energizada.

Na Tabela 8 são apresentadas as pontuações correspondentes.

Tabela 8: Pontuação – Barra anel [9].

Critério	Pontuação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	4
Continuidade do fornecimento durante manutenção	6
Flexibilidade de operação	4

3.2.6 Barra Dupla com Disjuntor e Meio – DJM

3.2.6.1 Garantia no fornecimento de energia elétrica

A disponibilidade dos dois barramentos desta configuração faz com que cada alimentador seja conectado ao sistema da subestação através de dois disjuntores e que o disjuntor central seja dividido entre dois alimentadores.

Assim, uma falta primária não causará a interrupção de toda a subestação, mas apenas a perda do alimentador faltoso ou a perda de um barramento sem comprometer o alimentador. Uma falta primária que ocorre no disjuntor central resultará na interrupção de dois barramentos, enquanto que uma falta primária seguida de uma falha de operação em um disjuntor poderá ocasionar, no pior dos casos, a interrupção de um outro alimentador, mas nunca a perda total da subestação.

3.2.6.2 Continuidade no fornecimento durante manutenção

Por esta configuração contar com dois disjuntores por alimentador, é possível prover manutenção para qualquer disjuntor sem ter que interromper qualquer alimentador. Uma manutenção em uma seccionadora de barramento requer a interrupção do barramento, mas não é necessária a interrupção de nenhum alimentador. Já para a manutenção de qualquer outra chave seccionadora será necessário a interrupção de um único alimentador.

3.2.6.3 Flexibilidade de operação

Pela disposição dos disjuntores e chaves seccionadoras, existem várias possibilidades de segmentação para esta configuração. As manobras podem ser realizadas com a subestação completamente energizada, entretanto, só podem ser realizadas pelos disjuntores o que configura uma baixa flexibilidade.

Na Tabela 9 são apresentadas as pontuações correspondentes.

Tabela 9: Pontuação – Barra dupla com disjuntor e meio [9].

Critério	Pontuação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	5
Continuidade do fornecimento durante manutenção	6
Flexibilidade de operação	4

3.3 Funcionalidade da subestação

A atribuição da funcionalidade da subestação dentro do sistema elétrico de potência é muito importante, também, para a escolha da melhor configuração visto as necessidades que são criadas. Assim, a funcionalidade da subestação é a chave para os projetistas de subestações na escolha mais condizente da configuração da subestação.

Como definido no Capítulo 2, as funcionalidades representam qual o papel da subestação dentro do sistema elétrico. Para uma melhor avaliação, a metodologia emprega que para cada caso os três critérios de avaliação tomem um peso, a fim de dar mais importância ao quesito que é necessário visto a funcionalidade da subestação.

A soma total da ponderação dos três critérios deve ser 1. O valor atribuído será o fator multiplicador da pontuação do critério apresentado anteriormente. Já a escolha dos pesos individuais para a ponderação é completamente subjetiva. Dessa forma, cabe aos designers fazerem o estudo correto para o atendimento de cada projeto.

3.3.1 Subestação de geração

3.3.1.1 Garantia no fornecimento de energia elétrica

Este critério é o mais importante para este tipo de subestação, uma vez que a entrega da energia gerada pela unidade geradora à rede é o ponto principal a ser desempenhado.

3.3.1.2 Continuidade no fornecimento durante manutenção

O valor deste critério está correlacionado com o tipo de gerador existente na unidade. Usinas eólicas devem assumir um valor diferente de usinas nucleares, por exemplo, visto a periodicidade da manutenção. Porém, a manutenção da subestação pode ser coordenada com a manutenção da unidade geradora, o qual não provocaria um impacto tão grande no sistema. Assim, o valor deste critério geralmente é muito baixo visto que o alinhamento das manutenções não causaria interferências.

3.3.1.3 Flexibilidade de operação

Normalmente não existe a necessidade de rearranjo de alimentadores ou de segmentação da subestação de geração. Assim, este critério também apresenta uma ponderação muito baixa por ter um impacto ínfimo.

Na Tabela 10 são apresentadas as ponderações correspondentes.

Tabela 10: Ponderação – Subestação de geração [9].

Critério	Ponderação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	0,9
Continuidade do fornecimento durante manutenção	0,05
Flexibilidade de operação	0,05

3.3.2 Subestação de interconexão

3.3.2.1 Garantia no fornecimento de energia elétrica

Este critério não seria de extrema importância considerando que o sistema de transmissão apresenta interconexões redundantes, ou seja, pelo menos um outro caminho pela qual a energia possa ser transferida no caso da interrupção desta subestação.

3.3.2.2 Continuidade no fornecimento durante manutenção

Similar ao critério de garantia no fornecimento, considerando a existência de interconexões redundantes no sistema de transmissão, existem outros caminhos pela qual a energia pode ser transferida em caso de manutenção.

3.3.2.3 Flexibilidade de operação

Provavelmente o critério mais importante para este tipo de subestação, visto a necessidade de existir a flexibilidade e rearranjo dos alimentadores para atender o sistema de transmissão. É importante também, pois é possível alcançar os outros dois critérios a partir deste com a segmentação e flexibilidade.

Na Tabela 11 são apresentadas as ponderações correspondentes.

Tabela 11: Ponderação – Subestação de interconexão [9].

Critério	Ponderação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	0,1
Continuidade do fornecimento durante manutenção	0,1
Flexibilidade de operação	0,8

3.3.3 Subestação elevadora/abaixadora (transformadora)

3.3.3.1 Garantia no fornecimento de energia elétrica

A garantia no fornecimento de energia elétrica irá depender se o sistema do secundário do transformador pode ser alimentado por outra subestação. Assumindo que o transformador conta com esta segunda alimentação, a dependência da subestação é menor. Porém, o peso deste critério ainda é alto.

3.3.3.2 Continuidade no fornecimento durante manutenção

Similar ao critério anterior, o fator peso deste critério irá depender da existência da possibilidade de uma alimentação exterior. Igualmente, a importância ainda é alta.

3.3.3.3 Flexibilidade de operação

É importante que exista alguma flexibilidade neste tipo de subestação a fim de permitir o operador da rede rearranjar os alimentadores na subestação em ordem de manter os transformadores energizados. Pode ser visto como a possibilidade de alimentar o secundário do transformador para os dois critérios anteriores.

Na Tabela 12 são apresentadas as ponderações correspondentes.

Tabela 12: Ponderação – Subestação transformadora [9].

Critério	Ponderação
Garantia do fornecimento de energia elétrica	0,25
Continuidade do fornecimento durante manutenção	0,25
Flexibilidade de operação	0,5

3.4 Avaliação Geral

Esta seção tem como objetivo demonstrar como a metodologia é usada para fornecer uma avaliação na escolha da configuração de arranjo da subestação após reunir todas as definições e informações anteriores.

A escolha de uma configuração específica de subestação não é uma decisão exata, esta pode requerer alguma informação de entrada subjetiva ou uma experiência por parte do time de projetistas. Entretanto, o presente trabalho fornece informações técnicas para dar assistência no processo de tomada de decisão para a seleção da configuração.

Os passos a serem seguidos ficam definidos da seguinte maneira e são esquematizados no fluxograma do processo de tomada de decisão da configuração da subestação, como observado na Figura 15.

O primeiro passo é necessário para identificar se a configuração da subestação não está atrelada a nenhuma característica de localização/espacamento, preferência ou padrão da concessionária ou até mesmo políticas de agentes do sistema elétrico. Se já for pré-determinada, a decisão já está, praticamente, definida e nenhuma otimização de configuração é possível. Se não houver uma configuração pré-determinada, os próximos passos devem ser vistos.

O segundo passo consiste em identificar a funcionalidade da subestação dentro dos tipos especificados para, então, determinar a ponderação relevante de cada um dos três critérios utilizados.

Após definir os pesos, pela ponderação de cada um dos critérios, ocorrem as suas multiplicações pela pontuação dos três critérios de cada uma das configurações definidas anteriormente na Seção 3.3. Assim, estará estabelecida a pontuação final e este corresponde ao passo 3. Por exemplo, para uma subestação de geração a pontuação final de uma configuração é dada por:

$$Pontuação\ Final = (0,90 * Garantia) + (0,05 * Continuidade) + (0,05 * Flexibilidade) \quad (1)$$

No passo 4, deve-se ranquear e revisar as opções de configurações com o planejamento e aplicação da configuração no sistema elétrico de potência. E, por fim, no passo 5 selecionar qual a configuração com maior pontuação.

Todos os passos baseados na metodologia [9] podem ser acompanhados na Figura 15.

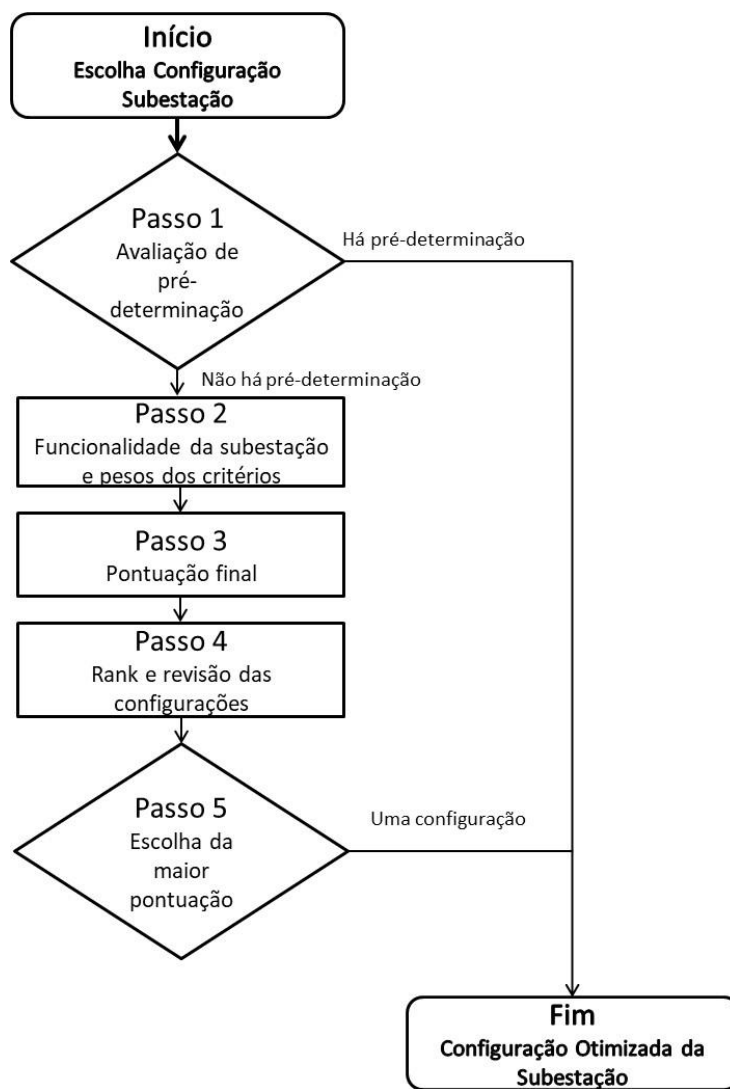


Figura 15: Fluxograma da aplicação da metodologia

Um exemplo de como resultaria as pontuações de cada configuração após a aplicação da metodologia com os pesos dos fatores pré-estabelecidos pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13: Avaliação geral [9].

	Garantia no Fornecimento	Continuidade durante manutenção	Flexibilidade de operação	Barra Simples	Barra Simples Seccionada	Barra Principal + Transferência	Barra Dupla – 4 Chaves	Barra Anel	Barra Dupla c/ disjuntor e mei
				Avaliação da configuração					
Subestações de Geração	0,9	0,05	0,05	1	1,1	1,5	3,3	4,1	5
Subestações de Interconexão	0,1	0,1	0,8	1	1,9	4,8	5,0	4,2	4,3
Subestações Elevadoras/Abaixadoras	0,25	0,25	0,5	1	1,75	4,5	5,0	4,5	4,75

4. Estudo de caso

Com o intuito de demonstrar a aplicabilidade e a efetividade do método desenvolvido no capítulo anterior, no processo de tomada de decisão, será apresentado um caso fictício condizente com a realidade. Será aplicada a metodologia neste caso fictício e as configurações com melhores resultados serão analisadas. Como objeto de comparação ao caso fictício, é apresentado o diagrama unifilar de uma subestação real de alta tensão com características parecidas ao do caso. Assim, é possível analisar qual configuração foi adotada e traçar uma linha comparativa.

4.1 Caso fictício

É necessário a escolha da configuração de uma subestação que conectará uma usina térmica de 50 MW ao sistema de rede elétrica. A unidade geradora é constituída de dois geradores de 25 MW cada um. Estes serão conectados ao sistema elétrico no nível de tensão de 138 kV por meio de um *looping* com a linha de transmissão já existente. Portanto, a subestação não pode comprometer esta linha de transmissão em caso de uma falta na unidade geradora. Assim, a subestação terá dois barramentos de linha para manobrar a linha de transmissão por dentro da subestação e por fora, caso a mesma precise ser removida.

A aplicação do método começa pela avaliação da existência ou não de uma configuração predeterminada por alguma restrição física, tecnológica ou regulamentar. Neste caso, considera-se que não existe uma predeterminação da configuração.

A funcionalidade desta subestação está relacionada ao de uma subestação de geração, por estar conectando ao sistema dois geradores, mas também ao de uma subestação de interconexão, por ter que atender ao requisito de um *looping* com a linha de transmissão existente. Assim, o peso dos critérios pode ser uma combinação das ponderações de ambas. Este passo cabe aos projetistas e a proposta definida para esta pesquisa é apresentada na Tabela 14.

A ponderação considerou uma importância maior dos critérios de garantia e flexibilidade. O valor atribuído para ambos os critérios foi maior justamente pelas necessidades requeridas da subestação. Fornecer energia ao sistema e apresentar uma flexibilidade de operação para

assegurar o funcionamento da linha em caso de remoção da mesma levaram à uma ponderação maior destes critérios. O critério de garantia teve uma ponderação levemente maior, pois foi optado por garantir um nível maior de segurança do que de flexibilidade. O critério de continuidade durante manutenção teve uma ponderação baixa, visto que a necessidade de manutenção da subestação pode ser alinhada com a manutenção da unidade geradora e, neste caso, não haveria uma interferência na linha de transmissão, uma vez que configuração deve apresentar uma flexibilidade que permita a linha de operar mesmo que subestação esteja desconectada do sistema.

Tabela 14: Ponderação – Caso fictício.

	Garantia no fornecimento	Continuidade durante manutenção	Flexibilidade de operação
Subestação de geração	0,9	0,05	0,05
Subestação de interconexão	0,1	0,1	0,8
Subestação combinada	0,45	0,15	0,4

Na Tabela 15 pode-se verificar a pontuação e classificação de cada uma das configurações que foram avaliadas. Cada pontuação foi obtida pelo uso da fórmula a seguir, tal fórmula tem como fator de ponderação dos critérios os valores que foram definidos pela análise do parágrafo anterior. Lembrando que cada pontuação dos critérios de avaliação da configuração correspondente é especificada na Seção 3.2.

$$Pontuação\ Final = (0,45 * Garantia) + (0,15 * Continuidade) + (0,40 * Flexibilidade) \quad (2)$$

Tabela 15: Pontuação geral das configurações – Caso fictício.

	Garantia no Fornecimento	Continuidade durante manutenção	Flexibilidade de operação	Barra Simples	Barra Simples Seccionada	Barra Principal + Transferência	Barra Dupla – 4 Chaves	Barra Anel	Barra Dupla c/ disjuntor e mei
				Avaliação da configuração					
Subestação combinada	0,45	0,15	0,40	1	1,55	3,5	4,4	4,3	4,75

Pode-se observar que a configuração que obteve a maior pontuação frente todas as outras configurações que foram avaliadas foi a barra dupla com disjuntor e meio. Assim, pelo processo de aplicação da metodologia, esta é a escolha otimizada e será a configuração adotada para o caso fictício.

4.2 Caso real

Para o caso real, é apresentado no Anexo I o diagrama unifilar de uma subestação, localizada no interior do estado de São Paulo, que conecta dois geradores, um de 32,5 MW e outro de 16 MW, totalizando 48,5 MW de potência instalada ao sistema de transmissão.

Esta subestação apresenta as mesmas condições do caso fictício, onde conecta os geradores de 13,8 kV ao nível de 132 kV no sistema de transmissão elétrica. Em relação à linha de transmissão, existe a mesma preocupação. Caso ocorra uma falta primária na unidade geradora, a mesma deve ser removida do sistema, pela subestação, sem interferir ou interromper no funcionamento da linha de transmissão, no caso a linha de transmissão de Ilha Solteira para Jales.

É notável que a configuração desta subestação de alta tensão, a de arranjo barra dupla com quatro chaves, não é a mesma que o método adotou como configuração otimizada para o caso fictício.

4.3 Análise

A metodologia utilizada apresenta um alto nível de simplicidade. A partir da pontuação definida para os três critérios de avaliação e da ponderação pela funcionalidade da subestação, obtém-se um ranking das possíveis configurações que podem ser adotadas.

Porém, como as subestações que contam com configurações mais complexas apresentam uma pontuação maior, existe sempre uma tendência de as mesmas ficarem na frente de outras configurações. Ou seja, a metodologia pode ter uma inclinação de sempre apontar a configuração mais complexa como a melhor solução.

Um ponto que pode ser utilizado no caso fictício e, por consequência, no emprego da metodologia para uma contribuir em uma solução diferenciada e mais otimizada é não apenas escolher a configuração com maior pontuação, mas sim, estudar os pontos positivos e negativos dentre as opções com maiores pontuações.

No caso fictício, a escolha direta da melhor opção seria a configuração DJM. Porém, como visto no Capítulo 2, esta configuração apresenta um alto custo de instalação e de área de utilização devido à grande quantidade de disjuntores e chaves seccionadoras que devem ser empregados para a construção física da subestação. Também é destinada a pontos da rede com um fluxo de potência muito elevado, que exigem uma alta confiabilidade e continuidade. O caso apresentado não especifica ou necessita de uma configuração para esta finalidade. Assim, analisando por estes aspectos de custo e empregabilidade, a configuração indicada não foi a melhor opção para o caso.

Dentre as duas maiores pontuações, DJM e BD4, que apresentaram uma pequena diferença entre si, pode-se fazer uma avaliação dos prós e contras de cada uma das configurações tendo como base o custo para a construção, envolvendo os equipamentos e área ocupada e, a empregabilidade e/ou necessidade requisitada pela subestação dentro do SEP. Com estes pontos definidos para cada configuração, pode-se ter uma escolha mais coerente do que realmente é necessário, apresentando um melhor custo-benefício e, assim, convergindo para um resultado mais otimizado.

A configuração BD4 quando comparada ao caso real da subestação é condizente. Uma avaliação desta configuração mostra uma subestação que apresenta relativamente alta confiabilidade pelo número de disjuntores e chaves seccionadoras, porém em quantidade menor

do que na configuração DJM, representando um custo inferior e uma ocupação de área física menor. Além do mais, apresenta uma flexibilidade operacional maior pelo número de chaves seccionadoras. Assim, sob o ponto de vista de contornar a linha de transmissão em caso de uma falta na subestação e/ou unidade geradora, apresenta uma vantagem maior.

Analisando os pontos levantados nos últimos três parágrafos, pode-se perceber que após uma avaliação interpretativa do ranking e do panorama onde se encontrará a subestação, pode-se obter uma configuração mais apropriada ao invés de apenas escolher a opção mais bem pontuada.

O mesmo ocorre com as configurações mais simples, como a BS ou BSS, que ficariam com pontuações muito menores do que a BA ou DJM, por exemplo. Porém, não deixam de ser uma opção interessante, visto que pode existir a necessidade de uma configuração mais simples, ou não tão complexa.

Um outro ponto a ser observado para a comparação é o de como a configuração do caso real foi escolhida. No Brasil, a construção de uma subestação deve atender às normas redigidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e/ou pela concessionária local. A ONS é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) [21].

Assim, o estudo de caso apresentado por conectar geradores ao sistema de transmissão está sob os requisitos da ONS. Como visto em [3], a configuração dos barramentos é determinada conforme a classe de tensão. Não existe uma metodologia de escolha proposta pela ONS que analise outros pontos ou aspectos da configuração da subestação, uma vez que já há um estabelecimento das configurações. Portanto, a utilização desta metodologia que não parte da classe de tensão, mas de critérios de avaliação ligados aos aspectos de funcionalidade da subestação, torna-se mais efetivo e abrangente, ou seja, proporciona uma escolha mais otimizada.

Como é especificado, configurações alternativas podem ser utilizadas. Para tal, é necessário a apresentação de um estudo com base na confiabilidade e continuidade que comprove um desempenho similar ou superior da configuração em questão. Caso a metodologia apresente uma configuração diferente daquela estabelecida pelo ONS, a mesma pode ser utilizada como um suporte por trazer informações pertinentes ao estudo requisitado.

5. Conclusão

O objetivo deste trabalho foi apresentar e estudar a aplicação e efetividade da metodologia proposta de modo que se possa avaliar, de maneira simples, as possíveis configurações de barramento através da relação entre critérios vinculados aos requisitos da subestação e a funcionalidade desempenhada pela mesma dentro do SEP. Para assim, dar suporte ao processo de escolha.

Para tal, primeiramente, foram abordados os conceitos teóricos de subestação que são envolvidos pela metodologia. Os aspectos abordados foram a da funcionalidade e de nível de tensão, dos principais equipamentos que caracterizam a configuração de uma subestação e pelas configurações típicas de barramento.

Em seguida, a metodologia foi descrita e todos os seus aspectos de avaliação expostos. O próximo passo foi aplicá-la em um estudo de caso, de modo a avaliar sua utilização e verificar se o objetivo do trabalho é atendido.

A aplicação da metodologia seguiu todos os passos que foram propostos. A configuração selecionada como a otimizada, entretanto, não foi a que obteve a maior pontuação pelos aspectos avaliativos. Após uma análise interpretativa, feita pelo autor, do panorama no qual a subestação estaria inserida frente as configurações mais bem pontuadas, foi constatado uma escolha mais condizente. Assim, adicionar este passo de avaliação das configurações mais pontuadas, mesmo que as pontuações sejam um pouco menores, torna-se interessante.

Ainda foi observado que no Brasil, as configurações são determinadas pelo ONS de acordo com a classe de tensão. Como é possível a utilização de uma configuração alternativa através de um estudo de desempenho de confiabilidade e continuidade, mesmo que a metodologia aponte uma configuração diferente das estabelecidas, a aplicação da mesma é viável, pois traz em sua análise os quesitos exigidos pelo estudo e pode ser usada como um suporte neste processo.

Pode-se dizer que o objetivo do trabalho foi atendido. A utilização da metodologia, além de ser simples, traz aspectos em relação as configurações que são importantes para a discussão e análise durante o processo de tomada de decisão e podem influenciar na escolha.

A partir deste trabalho, é possível propor alguns tópicos para serem explorados em trabalhos futuros. Por exemplo, a comparação entre a metodologia apresentada neste trabalho

e a metodologia utilizada pelo ONS, alguma concessionária ou time de projetistas para a determinação da configuração de barramento. Tendo por objetivo expor os pontos positivos e as dificuldades encontradas em ambas.

Referências Bibliográficas

- [1] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Submódulo 4.1 Ampliações e reforços: visão geral*, 2016;
- [2] Gazeta do Povo - Estudo aponta uso de peças obsoletas em subestações. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/economia/estudo-aponta-uso-de-pecas-obsoletas-em-subestacoes-c06gnd7dezl7ci7pefuhx5ji>> Acesso 9 de setembro de 2017;
- [3] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Submódulo 2.3 Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos*, 2010;
- [4] CRIGRÉ WORKING GROUP B3.01 380. *The Impact of New Functionalities on Substation Design Cigré*, 2009;
- [5] SCHNEIDER ELECTRIC. *Design of Mv/Lv Substation Transformer*. [S.1.]. Disponível em: <http://file.scrip.org/pdf/ENG_2013011515012421.pdf> Acesso em 17 de setembro de 2017;
- [6] SIEMENS ENERGY MANAGEMENT DIVISION. *Power Engineering Guide, Edition 8.0*. Disponível em: <siemens.com/power-engineering-guide> Acesso em 17 de setembro de 2017;
- [7] MCDONALD, J. D. *Electric Power Substations Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [8] D'AJUZ, A. *Equipamentos Elétricos – Especificação e aplicação em subestações de alta tensão*. Rio de Janeiro: Furnas, 1985;
- [9] CRIGRÉ JOINT WORKING GROUP B3/C1/C2 585. *Circuit Configuration Optimization Cigré*, 2014;
- [10] IEC. *International Electrotechnical Vocabulary*, Conjunto de publicações das séries IEC 60050;
- [11] ABB GROUP. *AIS – Equipamentos de Alta Tensão Isolados a Ar*. Disponível em <<http://new.abb.com/high-voltage/pt/AIS>> Acesso em 6 de outubro de 2017;
- [12] HINRICHSSEN, VOLKER. *Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems*. Edition 3th. Berlin: Siemens AG, 2011.
- [13] IEE POWER AND ENERGY SOCIETY. *Instrument WGC57.13 – Instrument Transformers*. C57.13-2016, 2016;

- [14] DUALIBE, P. *Subestações: Tipos, equipamentos e proteção*. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 1999.
- [15] IEC 62271-102. *High-Voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches*. Edition 1.2, 2013;
- [16] GONCALVES, R. M. *Guia de projeto para subestações de alta tensão*. Monografia (Graduação). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012;
- [17] Centrais Elétricas Brasileiras S.A. *Diretrizes Básicas para Projeto de Subestações de Tipo Convencional Abert.* Volume 1: Subestações de Alta Tensão (138 a 230 kV), 1982;
- [18] ANEEL, 2000; Resolução nº 024, de 27 de Janeiro de 2000;
- [19] STREET, A.; OLIVEIRA, F.; ARROYO, J. M. Contingency-Constrained Unit Commitment With n-K Security Criterion: A Robust Optimization Approach, *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2014;
- [20] SISTEMA BDCONF – *Volume I: Indicadores de Desempenho Probabilístico de Componentes de Geração e Transmissão do SIN*; 26 de Julho de 2006;
- [21] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Sobre o ONS*. Disponível em: <ons.org.br/pt/sobre-o-ons> Acesso em: 13 de outubro de 2017.

Anexo I – Subestação

