



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS  
MESTRADO PROFISSIONAL

**DESENVOLVIMENTO DE LÓGICA PARA AUTOMATIZAÇÃO  
DAS MANOBRAS NOS CCMs DA PRECIPITAÇÃO PARA  
RETORNO DE ENERGIA EM CASO DE FALTA TOTAL OU  
PARCIAL**

**Getulio Furtado Pantoja Neto**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Orlando Fonseca Silva

Belém


Maio de 2015

**DESENVOLVIMENTO DE LÓGICA PARA AUTOMATIZAÇÃO DAS  
MANOBRAS NOS CCMs DA PRECIPITAÇÃO PARA RETORNO DE  
ENERGIA EM CASO DE FALTA TOTAL OU PARCIAL**

Getulio Furtado Pantoja Neto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

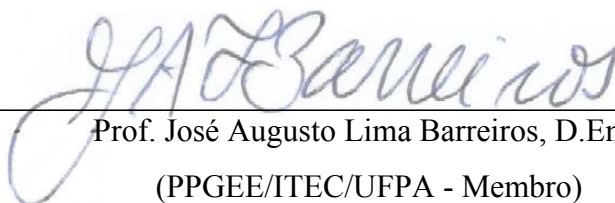
Examinada por:



---

Prof. Orlando Fonseca Silva, D.Eng.


(PPGEP/ITEC/UFPA - Orientador)



---

Prof. José Augusto Lima Barreiros, D.Eng.

(PPGEE/ITEC/UFPA - Membro)



---

Prof. André Maurício Damasceno Ferreira, D.Eng.

(IFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

MAIO DE 2015

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

Neto, Getulio Furtado Pantoja, 1983 -

Desenvolvimento de Lógica para Automatização das Manobras nos CCMs da Precipitação para Retorno de Energia em Caso de Falta Total ou Parcial / Getulio Furtado Pantoja Neto. - 2015.

Orientador: Orlando Fonseca Silva

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2015.

1. Energia Elétrica 2. MCCM/SDCD 3. Disjuntor I. Título

CDD 23. ed. 621.31

---

*Este trabalho é dedicado aos meus familiares que sempre apoiaram, incentivaram e de alguma forma contribuíram para a elaboração do mesmo. Em particular à minha esposa e à minha mãe pelo incentivo e perseverança.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pelas bênçãos.

À minha esposa Gleycianne de Nazaré Souza Pantoja pelo amor, incentivo em sempre fazer o melhor, dedicação e companheirismo.

Ao meu filho Getulio Furtado Pantoja Filho que me alegra todos os dias com seu sorriso e carinho.

À minha mãe Liette Vieira Pantoja que sempre me incentivou e cobrou de mim o melhor.

À empresa Hydro Alunorte por me proporcionar a oportunidade de cursar o Mestrado.

Ao Professor Orlando Fonseca Silva pela orientação, incentivo e ajuda na elaboração e composição do trabalho.

Aos amigos de trabalho José Luiz Correa, Sidnei Santos, Sidney Moraes e Antônio Machado pelo incentivo, ajuda e parceria.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGE/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M.Eng.)

**DESENVOLVIMENTO DE LÓGICA PARA AUTOMATIZAÇÃO DAS  
MANOBRAS NOS CCMs DA PRECIPITAÇÃO PARA RETORNO DE  
ENERGIA EM CASO DE FALTA TOTAL OU PARCIAL**

**Getulio Furtado Pantoja Neto**

Maio/2015

Orientador: Orlando Fonseca Silva

Área de Concentração: Engenharia de Processos

O cenário elétrico atualmente vem mostrando uma forte instabilidade na geração de energia devido ao baixo nível dos reservatórios das usinas hidroelétricas das regiões Sudeste e Nordeste, o que expõe o sistema interligado nacional a possíveis “apagões”, uma vez que a geração de energia elétrica nacional é majoritariamente hidroelétrica. Essa situação é bastante crítica para indústrias de grande porte com processo produtivo contínuo que em caso de parada de uma parte do processo, este pode levar bastante tempo para retomar o ritmo nominal, o que normalmente acarreta em grandes prejuízos. As refinarias de alumina enquadram-se nesta categoria e, em particular, há uma área bastante sensível, a da precipitação, que no caso da falta de energia por um período maior que 10 (dez) minutos provavelmente terá perdas de produção por alguns meses. Sendo assim, é fundamental disponibilizar energia elétrica para a precipitação em menos de 10 (dez) minutos após a ocorrência. No caso de falta total de energia elétrica, o reestabelecimento ocorre através de manobras pré-definidas para fornecimento de energia através da usina de geração de emergência e no caso de falta parcial, ou seja, apenas uma parte da área é desenergizada, o reestabelecimento ocorre através de manobras pré-definidas no interior das subestações. Atualmente essas manobras são realizadas pelos eletricitistas/operadores que, em muitos casos e por diferentes razões, acabam errando e, conseqüentemente, não conseguem disponibilizar a energia

rapidamente causando grandes impactos para a companhia. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma lógica para automatização dessas manobras, utilizando o controlador central da planta para supervisionar e atuar quando necessário, retirando assim as responsabilidades das manobras dos eletricitas/operadores. Com isso, busca-se reduzir o tempo de indisponibilidade de energia e, conseqüentemente, uma maior disponibilidade operacional.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M.Eng.)

**LOGIC FOR DEVELOPMENT OF AUTOMATION OPERATIONS IN CCMs  
RUSH TO RETURN POWER IN THE EVENT OF TOTAL OR PARTIAL**

**Getulio Furtado Pantoja Neto**

May/2015

Advisor: Orlando Fonseca Silva

Research Area: Process Engineering

The electric scenario is currently showing a strong instability in power generation due to low reservoir levels of hydroelectric plants in the Southeast and Northeast, which exposes the interconnected national system to potential "blackouts", since the generation of national electricity it is mostly hydroelectric. This situation is quite critical for large industries with continuous production process that in case of shutdown of one part of the process, it can take a long time to resume the nominal rate, which usually results in large losses. Alumina refineries fall into this category and, in particular, there is a very sensitive area, the rainfall, which in the case of power failure for a period greater than ten (10) minutes will probably have production losses for a few months. Therefore, it is essential to provide electricity to the precipitation in less than ten (10) minutes. In the event of total power failure, the re-establishment takes place through predefined maneuvers for power supply through the emergency generation plant and in the case of partial failure, or only part of the area is cleared, the re-establishment occurs through pre-defined inside the substation maneuvers. Currently, these maneuvers are performed by electricians / operators who, in many cases and for different reasons, end up missing and therefore cannot provide the quickly power causing major impacts for the company. The objective of this work is to develop a logic to automate these maneuvers, using the central controller of the plant to supervise and act when necessary, removing the maneuvers of electricians/operators's responsibilities. Thus, it seeks to reduce power downtime and hence greater operational availability.



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 - MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....  | 1         |
| 1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....  | 7         |
| <b>CAPITULO 2 – O SISTEMA ELÉTRICO DA PRECIPITAÇÃO.....</b>   | <b>8</b>  |
| 2.1 – DESCRIÇÃO.....  | 8         |
| 2.2 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE EMERGÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO... 9                                      | 9         |
| 2.3 - DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA.....  | 10        |
| 2.4 - DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO EM CASO DE AUSÊNCIA DE TENSÃO NA BARRA B SEM ATUAÇÃO DOS RELÉS 3 E 4..... | 11        |
| 2.5 - DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO EM CASO DE ATUAÇÃO DO RELÉ DIFERENCIAL 2.....                             | 12        |
| 2.6 - SITUAÇÕES POSSÍVEIS.....  | 13        |
| 2.7 – CONCLUSÃO.....  | 16        |
| <b>CAPITULO 3 - DESENVOLVIMENTO DA LÓGICA DE CONTROLE.....</b>  | <b>17</b> |
| 3.1 - DESENVOLVIMENTO DA TABELA VERDADE.....  | 17        |
| 3.2 - EQUAÇÕES LÓGICAS.....   | 21        |
| 3.3 - DIAGRAMAS LÓGICOS.....  | 24        |
| 3.4 – CONCLUSÃO.....  | 32        |
| <b>CAPITULO 4 - VALIDAÇÃO DA LÓGICA DE CONTROLE.....</b>  | <b>33</b> |
| 4.1 - PRIMEIRO TESTE: AUSÊNCIA DE TENSÃO NAS BARRAS A E B DO MCCM.....                                | 33        |
| 4.1.1 - Comando de Abertura do DJ1.....   | 34        |
| 4.1.2 - Comando de Fechamento do DJ1.....   | 34        |
| 4.1.3 - Comando de Abertura do DJ2.....   | 35        |
| 4.1.4 - Comando de Fechamento do DJ2.....   | 35        |
| 4.1.5 - Comando de Abertura do DJ3.....   | 36        |
| 4.1.6 - Comando de Fechamento do DJ3.....   | 36        |
| 4.1.7 - Comando de Fechamento do DJ4.....   | 37        |
| 4.2 - SEGUNDO TESTE: AUSÊNCIA DE TENSÃO NA BARRA B DO MCCM.....                                       | 37        |
| 4.2.1 - Comando de Abertura do DJ1.....   | 38        |
| 4.2.2 - Comando de Fechamento do DJ1.....   | 38        |
| 4.2.3 - Comando de Abertura do DJ2.....   | 39        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2.4 - Comando de Fechamento do DJ2.....                  | 39        |
| 4.2.5 - Comando de Abertura do DJ3.....                    | 40        |
| 4.2.6 - Comando de Fechamento do DJ3.....                  | 40        |
| 4.2.7 - Comando de Fechamento do DJ4.....                  | 41        |
| 4.3 - TERCEIRO TESTE: ATUAÇÃO DO RELÉ DIFERENCIAL RL2..... | 41        |
| 4.1.1 - Comando de Abertura do DJ1.....                    | 42        |
| 4.1.2 - Comando de Fechamento do DJ1.....                  | 42        |
| 4.1.3 - Comando de Abertura do DJ2.....                    | 43        |
| 4.1.4 - Comando de Fechamento do DJ2.....                  | 43        |
| 4.1.5 - Comando de Abertura do DJ3.....                    | 44        |
| 4.1.6 - Comando de Fechamento do DJ3.....                  | 44        |
| 4.1.7 - Comando de Fechamento do DJ4.....                  | 45        |
| 4.4 – CONCLUSÃO.....                                       | 45        |
| <b>CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>            | <b>46</b> |
| 5.1 – CONCLUSÕES.....                                      | 46        |
| 5.2 – SUGESTÕES.....                                       | 47        |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                            | 48        |

## LISTA DE FIGURAS

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Figura 1.1</b> | Processo Bayer [6].....  | 2  |
| <b>Figura 1.2</b> | Foto da cadeia de precipitadores da Hydro Alunorte.....                  | 3  |
| <b>Figura 1.3</b> | Esquema interno do precipitador de hidrato [6].....                      | 3  |
| <b>Figura 1.4</b> | Histórico de perdas de tanques.....                                      | 4  |
| <b>Figura 1.5</b> | Comunicado de força maior [3].....                                       | 4  |
| <b>Figura 1.6</b> | Operação do sistema elétrico até 2013.....                               | 5  |
| <b>Figura 1.7</b> | Operação centralizada do sistema elétrico.....                           | 6  |
| <b>Figura 2.1</b> | Diagrama típico do MCCM.....   | 8  |
| <b>Figura 2.2</b> | Situação do MCCM com ausência de tensão nas duas<br>entradas.....        | 10 |
| <b>Figura 2.3</b> | Situação do MCCM após a manobra de emergência.....                       | 10 |
| <b>Figura 2.4</b> | Situação do MCCM com subtensão na barra B.....                           | 11 |
| <b>Figura 2.5</b> | Situação do MCCM após interligação pela barra A.....                     | 11 |
| <b>Figura 2.6</b> | Situação do MCCM com atuação do relé de diferencial da<br>entrada A..... | 12 |
| <b>Figura 2.7</b> | Situação do MCCM após a manobra de interligação pela barra<br>B.....     | 13 |
| <b>Figura 3.1</b> | Diagrama unifilar do MCCM com subtensão na barra B.....                  | 20 |
| <b>Figura 3.2</b> | Diagrama unifilar do MCCM após manobra.....                              | 20 |
| <b>Figura 3.3</b> | Diagrama lógico Abre DJ1.....  | 25 |
| <b>Figura 3.4</b> | Diagrama lógico Fecha DJ1.....   | 26 |
| <b>Figura 3.5</b> | Diagrama lógico Abre DJ2.....  | 27 |
| <b>Figura 3.6</b> | Diagrama lógico Fecha DJ2.....   | 28 |
| <b>Figura 3.7</b> | Diagrama lógico Abre DJ3.....  | 29 |
| <b>Figura 3.8</b> | Diagrama lógico Fecha DJ3.....   | 30 |
| <b>Figura 3.9</b> | Diagrama lógico Fecha DJ4.....   | 31 |
| <b>Figura 4.1</b> | Ausência de tensão nas barras A e B do MCCM.....                         | 33 |
| <b>Figura 4.2</b> | Lógica de abertura do DJ1 ativa.....                                     | 34 |
| <b>Figura 4.3</b> | Lógica de fechamento do DJ1 inativa.....                                 | 34 |
| <b>Figura 4.4</b> | Lógica de abertura do DJ2 ativa.....                                     | 35 |
| <b>Figura 4.5</b> | Lógica de fechamento do DJ2 inativa.....                                 | 35 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 4.6</b>  | Lógica de abertura do DJ3 inativa.....                             | 36 |
| <b>Figura 4.7</b>  | Lógica de fechamento do DJ3 ativa.....                             | 36 |
| <b>Figura 4.8</b>  | Lógica de fechamento do DJ4 ativa.....                             | 37 |
| <b>Figura 4.9</b>  | Ausência de tensão na barra B do MCCM.....                         | 37 |
| <b>Figura 4.10</b> | Lógica de abertura do DJ1 inativa.....                             | 38 |
| <b>Figura 4.11</b> | Lógica de fechamento do DJ1 inativa.....                           | 38 |
| <b>Figura 4.12</b> | Lógica de abertura do DJ2 ativa.....                               | 39 |
| <b>Figura 4.13</b> | Lógica de fechamento do DJ2 inativa.....                           | 39 |
| <b>Figura 4.14</b> | Lógica de abertura do DJ3 inativa.....                             | 40 |
| <b>Figura 4.15</b> | Lógica de fechamento do DJ3 ativa.....                             | 40 |
| <b>Figura 4.16</b> | Lógica de fechamento do DJ4 inativa.....                           | 41 |
| <b>Figura 4.17</b> | Atuação do relé diferencial RL2.....                               | 41 |
| <b>Figura 4.18</b> | Lógica de abertura do DJ1 ativa.....                               | 42 |
| <b>Figura 4.19</b> | Lógica de fechamento do DJ1 inativa.....                           | 42 |
| <b>Figura 4.20</b> | Lógica de abertura do DJ2 inativa.....                             | 43 |
| <b>Figura 4.21</b> | Lógica de fechamento do DJ2 inativa.....                           | 43 |
| <b>Figura 4.22</b> | Lógica de abertura do DJ3 inativa.....                             | 44 |
| <b>Figura 4.23</b> | Lógica de fechamento do DJ3 ativa.....                             | 44 |
| <b>Figura 4.24</b> | Lógica de fechamento do DJ4 inativa.....                           | 45 |
| <b>Figura 5.1</b>  | Histórico de custo com recuperação de tanques na precipitação..... | 46 |

## LISTA DE TABELAS

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Tabela 2.1</b> | Resumo de atuação dos relés de proteção.....     | 9  |
| <b>Tabela 2.2</b> | Situações possíveis de atuação.....              | 14 |
| <b>Tabela 2.3</b> | Continuação da Tabela 2.2.....                   | 15 |
| <b>Tabela 3.1</b> | Tabela verdade com as condições de operação..... | 19 |

## LISTA DE SIGLAS

|      |  |
|------|--|
| CCM  | Centro de Controle de Motores            |
| MCCM | Centro de Controle de Motores de 4,16 kV |
| SDCD | Sistema Digital de Controle Distribuído  |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A matriz energética nacional é predominantemente hidroelétrica, e devido à falta de gestão e planejamento na conclusão das obras de infraestrutura voltadas ao setor elétrico, aliadas a crise hídrica sofrida pelo Sudeste desde o ano passado onde esta região enfrenta um dos piores regimes de falta de chuva de sua história, tornaram a situação atual da geração de energia no Brasil crítica, uma vez que os reservatórios das usinas hidroelétricas das regiões Sul e Sudeste encontram-se com níveis muito baixo, o que reduz a capacidade de geração destas unidades.

"O Brasil passa por um problema sério de energia devido à falta de água nas usinas hidrelétricas", diz José Luz Silveira, professor do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (Unesp) de Guaratinguetá. "Alguns reservatórios estão com volume tão baixo que sequer estão produzindo energia. Para se ter uma ideia, em 2001, quando tivemos uma crise, estávamos com 30% da capacidade armazenada. Hoje, temos apenas 20%. Só não estamos ainda na mesma situação graças às termelétricas, que atualmente têm operado em sua capacidade máxima para compensar os problemas nas hidrelétricas" [13].

Esse cenário apresenta uma real possibilidade de “apagão” a qualquer momento, que, em algumas regiões do país já estão ocorrendo. Essa instabilidade do sistema elétrico afeta diretamente indústrias com processo produtivo contínuo, uma vez que a interrupção destes normalmente acarreta em grandes prejuízos.

O processo produtivo da Hydro Alunorte é contínuo, denominado de Processo Bayer ilustrado na Figura 1.1 [6]. Este processo inicia na digestão da bauxita (rocha rica em cristais de alumina) vinda das minas de Paragominas ou de Porto Trombetas, nesta etapa a bauxita é misturada com soda cáustica superaquecida para agilizar o processo de diluição formado assim uma poupa, a qual é encaminhada para a área de clarificação onde serão separados os sólidos não diluídos (rejeito) do licor rico em alumina, esse processo se dá através de decantadores de alto rendimento, onde os sólidos não diluídos decantam por gravidade, com o auxílio dos floculantes (catalisadores que aceleram o

processo de decantação) formando uma polpa denominada de lama vermelha (rejeito proveniente do processo) a qual é direcionada para a área de rejeito. Outra parcela do processo de decantação fica em suspensão, o chamado licor rico, o qual é direcionado à área de filtração onde, como o próprio nome diz, será realizada a filtração fina do licor rico tornando assim o licor livre de impurezas. Esse licor é resfriado e enviado para a precipitação onde através de uma cadeia de tanques denominados de precipitadores será formado o hidrato e o excedente de licor retorna para a etapa de digestão, o hidrato é enviado para os calcinadores (fornos de alta temperatura) os quais eliminam a água contida no hidrato formando assim a alumina.

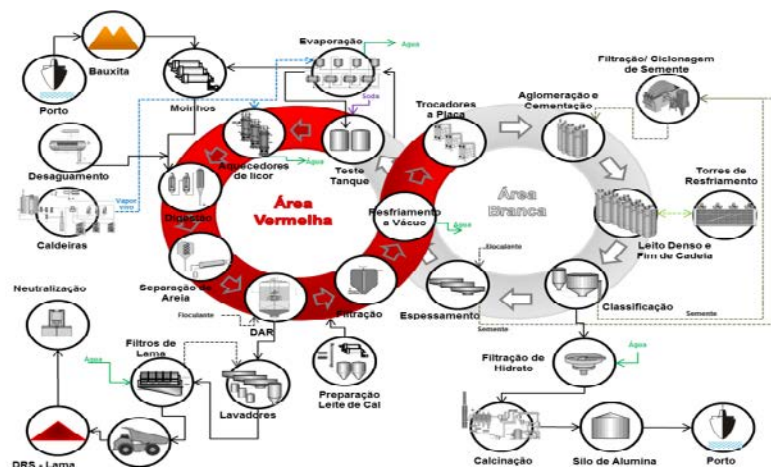


Figura 1.1: Processo Bayer [6].

Devido à característica de continuidade do processo Bayer isso o torna sensível à falta de energia elétrica em qualquer uma de suas etapas, pois se uma área parar, todo o fluxo fica interrompido. Devido suas particularidades a área da precipitação é a mais sensível à falta de energia. Como já mencionado, o processo de precipitação se dá através de uma cadeia de tanques denominados precipitadores, mostrados na Figura 1.2.





Figura 1.2: Foto da cadeia de precipitadores da Hydro Alunorte.

O licor rico vindo do processo de filtração chega aos precipitadores com alta concentração de cristais de alumina. O licor entra em processo de recirculação no interior do tanque, devido os agitadores instalados no topo dos tanques mostrados na Figura 1.3. Quanto melhor for essa etapa maior será a produtividade do processo, pois a recirculação propicia que os cristais de alumina se unam mais facilmente para uma posterior formação do hidrato. Parte do licor transborda para o próximo tanque da cadeia, no total são quatorze tanques por linha de produção, e o mesmo processo se repete. O agitador no topo do tanque tem também a importante função de não deixar que o licor entre em repouso, pois, caso isso ocorra, em menos de dez minutos os cristais de alumina precipitariam solidificando na base do tanque, indisponibilizando este por meses, o que resultaria em baixa produtividade do processo.

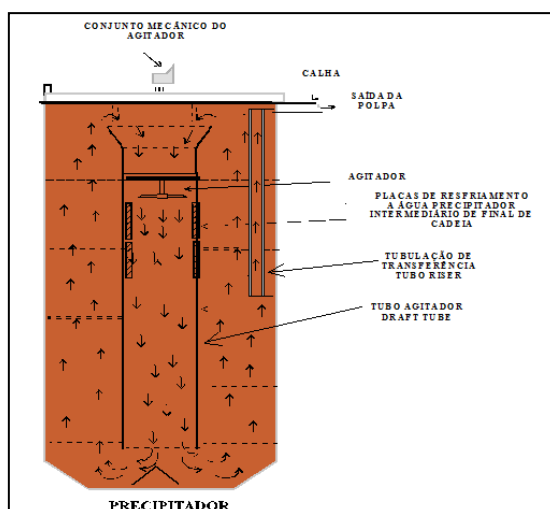


Figura 1.3: Esquema interno do precipitador de hidrato [6].

Sendo assim, caso ocorra falta de energia em uma subestação que alimente os motores dos agitadores essa energia deverá ser disponibilizada novamente em menos de dez minutos, caso contrário às chances de se perder um tanque será elevada.

Tomando como base o histórico dos últimos anos, mostrado na Figura 1.4, percebe-se um aumento no número de tanques perdidos por eventos ligados a falta de energia elétrica, chegando em 2013 a um número alarmante de onze tanques.

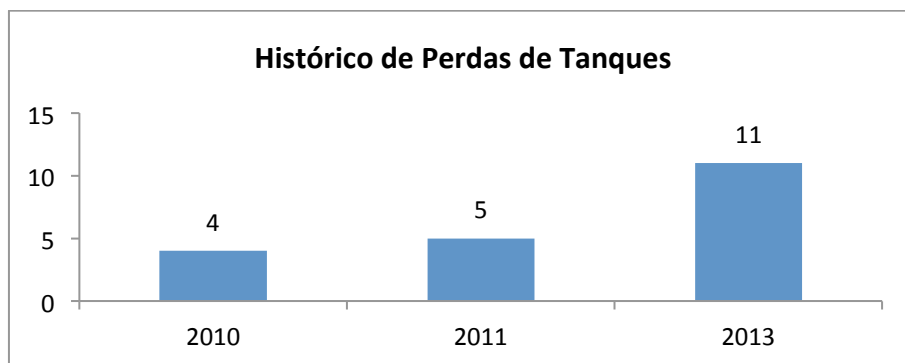


Figura 1.4: Histórico de perdas de tanques.

A perda de tantos tanques fez com que a Hydro lançasse neste mesmo ano um comunicado de força maior no mercado internacional como mostra a Figura 1.5 [3], onde a empresa informava seus clientes que por problemas provocados pela falta de energia na refinaria não conseguiria retomar o nível de produção até o final do ano e consequentemente não teria como honrar seus compromissos de fornecimento de alumina e hidrato.

Sobre o alumínio | Produtos | Operações no Brasil | **Imprensa** | Sustentabilidade | Empregos e carreiras | Sobre a Hydro

Home > Imprensa > Notícias > Hydro emite comunicado de força maior devido à queda de energia na Alunorte

## Hydro emite comunicado de força maior devido à queda de energia na Alunorte

A Hydro emitiu um comunicado de força maior para os seus clientes de alumina nesta quarta-feira, visto que as entregas de alumina para os clientes podem ser afetadas pelas quedas de energia e baixa produção na refinaria de alumina Alunorte. Nesse exato momento, não é possível determinar nem estimar se as entregas serão afetadas e de que maneira.

junho 12, 2013

**Últimas novidades**

- Hydro reforça Aspiração e "Para Sempre" em maior evento da indústria do Norte (8. maio 2015)
- Termina a manutenção prolongada na Hydro Paragominas (29. abril 2015)
- Primeiro trimestre de 2015: Resultados recordes com aumento de vendas e câmbio favorável (29. abril 2015)

Figura 1.5: Comunicado de força maior [3].

Parte destas perdas se justifica pelo fato de que, até meados de 2013 o sistema elétrico da Hydro Alunorte era operado pelos eletricitas mantenedores das áreas de processo, ou seja, não havia uma operação dedicada a essas atividades. Com isso, durante um evento de falta de energia os eletricitas deslocavam-se até as subestações para realizar as manobras denominadas de manobras de emergência, em um total de cinco subestações. Ou seja, o eletricitista fatalmente levaria um tempo maior que dez minutos para realizar as manobras, tendo em vista o tempo de deslocamento entre as subestações, adicionado ao tempo de execução das manobras, ilustrado na Figura 1.6.

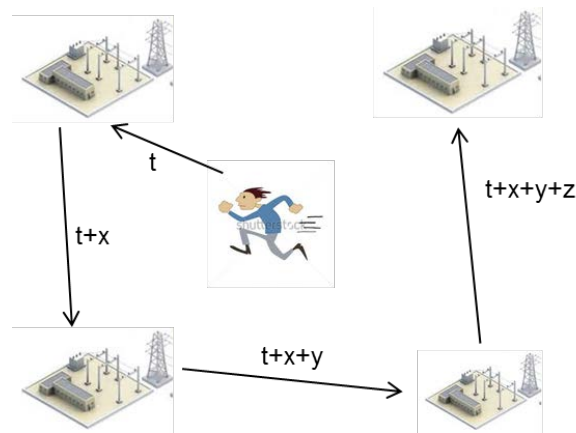


Figura 1.6: Operação do sistema elétrico até 2013.

Diante desse cenário alarmante, a empresa criou uma equipe de operação do sistema elétrico a qual passou a ser responsável pelas manobras nas subestações, onde essa equipe passou por treinamentos específicos preparando-os para as situações não corriqueiras. Mas, ainda assim, as manobras de emergência nos Centros de Controle de Motores (CCM's) da precipitação levariam um tempo superior a 10 minutos devido ao deslocamento até as subestações. Com isso, tomou-se a decisão de comissionar todos os comandos "Remotos" dos disjuntores dessas subestações, o que possibilitou a centralização das manobras nessas subestações a partir de uma sala de controle, vista na Figura 1.7, eliminando assim o tempo de deslocamento.

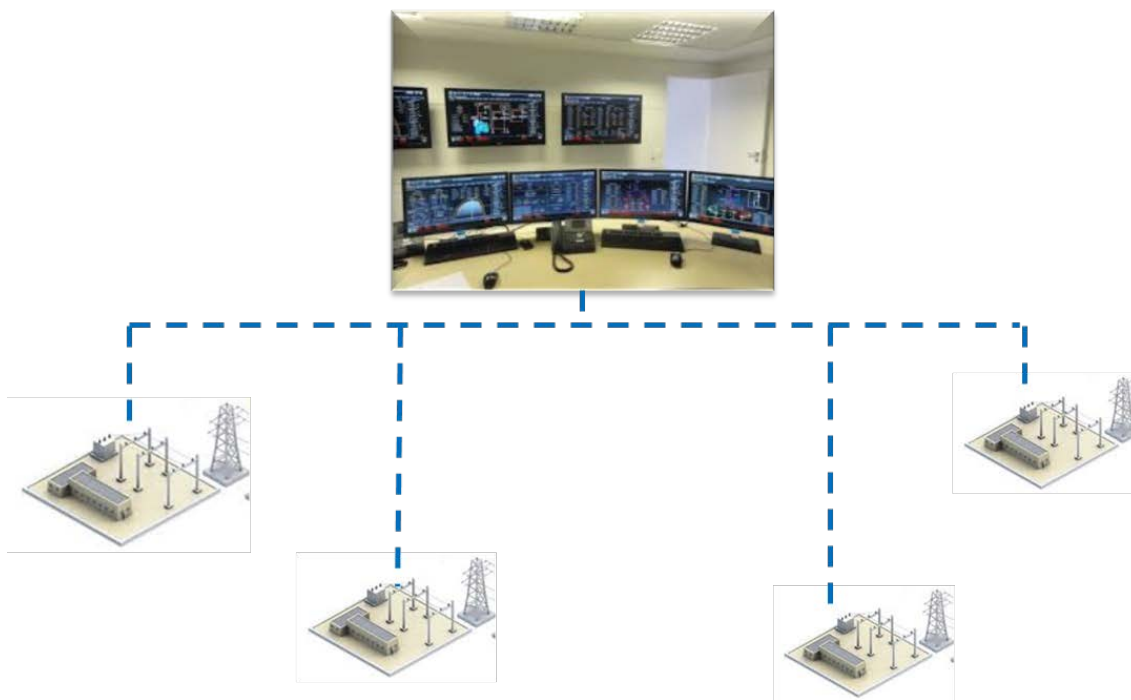


Figura 1.7: Operação centralizada do sistema elétrico.

Com isso tornou-se possível realizar as manobras de emergência em um tempo inferior a 10 minutos. Segundo dados reais de registro em um evento de falta de energia elétrica, ocorrido às 16:25 horas em 21/01/2014, o tempo de manobra foi inferior a 3 minutos [4].

Esse fato transmite a sensação de que o problema com os longos tempos de manobra estavam resolvidos, mas em outro evento (18/07/14) onde quatro subestações desligaram por falta de tensão nas barras, ocorreu erro de manobra mais uma vez [5]. O operador do sistema elétrico ao proceder com as manobras esqueceu-se de concluir o procedimento em duas subestações, só vindo a ser percebido pela equipe de campo, que concluiu as manobras posteriormente. Sendo assim, apesar de o sistema estar mais robusto, ainda existe o risco de erro humano durante as manobras para reestabelecimento de energia.

Diante desta situação o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma lógica para automatização das manobras nos painéis das subestações da precipitação, tanto para o caso de falta total ou parcial de energia elétrica, garantindo assim o cumprimento de todas as etapas das manobras e consequentemente a disponibilidade de energia.

## **1.2 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

No presente capítulo buscou-se enfatizar as motivações que levaram à necessidade de automatização das manobras nos painéis elétricos da precipitação, consistindo no objetivo do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o sistema elétrico da área da precipitação, também são apresentados os procedimentos de manobras durante os eventos de falta de energia.

O Capítulo 3 mostra o processo para o desenvolvimento da lógica de controle para atuação automática das manobras, que serão testadas e validadas no Capítulo 4.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e sugestões para a continuação do trabalho em etapas posteriores.

## CAPÍTULO 2

### O SISTEMA ELÉTRICO DA PRECIPITAÇÃO

Neste capítulo será apresentado o sistema elétrico da precipitação, bem como, as possibilidades de manobras durante os eventos de falta de energia.

#### 2.1 – DESCRIÇÃO

A planta industrial da Alunorte possui atualmente, como filosofia operacional do seu sistema elétrico, dupla alimentação nos Centros de Controle de Motores de 4,16 kV (MCCM's) da Precipitação [11], conforme diagrama típico apresentado na Figura 2.1.

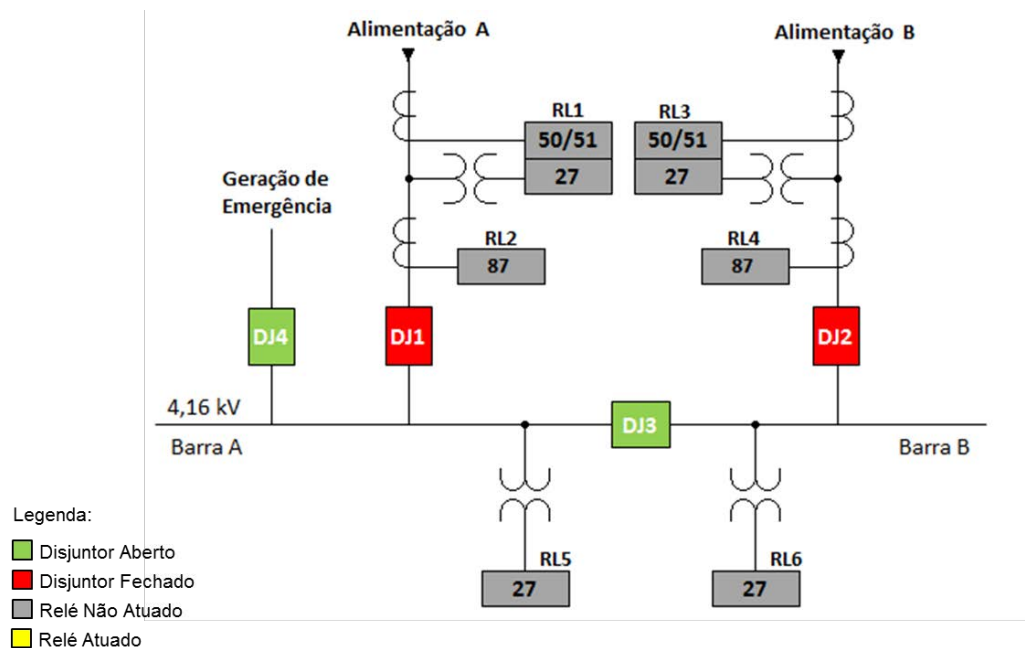


Figura 2.1: Diagrama típico do MCCM.

Cada alimentador representa uma entrada de barra (barra A ou B) conectada através de um disjuntor de interligação DJ3 [10]. Essa configuração permite que seja possível a operação simultânea de ambos alimentadores ou um alimentador suprindo as cargas das barras A e B simultaneamente.

Cada entrada é composta por dois relés RL1/2 e RL3/4 [12] sendo um com função de proteção para sobrecorrente (50/51) [7], e subtensão (27) [7] e o outro apenas com função diferencial (87) [7]. Em caso de contingência, as funções 50/51 enviam

sinal de *trip* (abertura) para o disjuntor de entrada do respectivo ramal (DJ1 ou DJ2) e também para o disjuntor de interligação (DJ3), a função 27 também pode enviar sinal de *trip* (atualmente não está enviando) e a função 87 envia sinal de *trip* para os disjuntores de entrada (DJ1 e DJ2).

A Tabela 2.1 resume a situação de atuação da proteção de cada relé representado na Figura 2.1.

Tabela 2.1: Resumo de atuação dos relés de proteção.

| ATUAÇÃO DO RELÉ | DJ1    | DJ2  | DJ3  | DJ4 |
|-----------------|--------|------|------|-----|
| RL1             | ABRE   | -    | ABRE | -   |
| RL2             | ABRE   | -    | -    | -   |
| RL3             | -      | ABRE | ABRE | -   |
| RL4             | -      | ABRE | -    | -   |
| RL5             | ALARME |      |      |     |
| RL6             |        |      |      |     |

## 2.2 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE EMERGÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO

Nas barras A e B estão conectadas as cargas que compõem a respectiva área, sendo que a alimentação proveniente dos geradores de emergência está conectada apenas na barra A.

O disjuntor DJ4 que conecta a barra A do MCCM à entrada de emergência possui intertravamento elétrico com os disjuntores de entrada das barras A e B, de forma que o DJ4 somente é fechado caso estes dois disjuntores de entrada estejam abertos.

Os geradores de emergência partem automaticamente quando ocorre falta de tensão nas barras A e B dos MCCM's levando energia ao disjuntor de entrada da barra de emergência (DJ4) em 4,16 kV.

Os conjuntos de manobra permitem operação local ou remota. A operação remota do MCCM's é realizada através do Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD), utilizando cartões de I/O (*input/output*) (subestações das linhas antigas) ou através da rede *Profibus* DP (subestações das linhas novas).

## 2.3 - DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA

Em caso de falta de tensão nas barras A e B do MCCM, conforme Figura 2.2, o electricista verifica se o desligamento foi causado pela atuação de proteção e, caso contrário, executa a abertura dos disjuntores das entradas A e B (DJ1 e DJ2) e o fechamento do disjuntor de interligação de barras e da entrada de emergência (DJ3 e DJ4), conforme Figura 2.3.

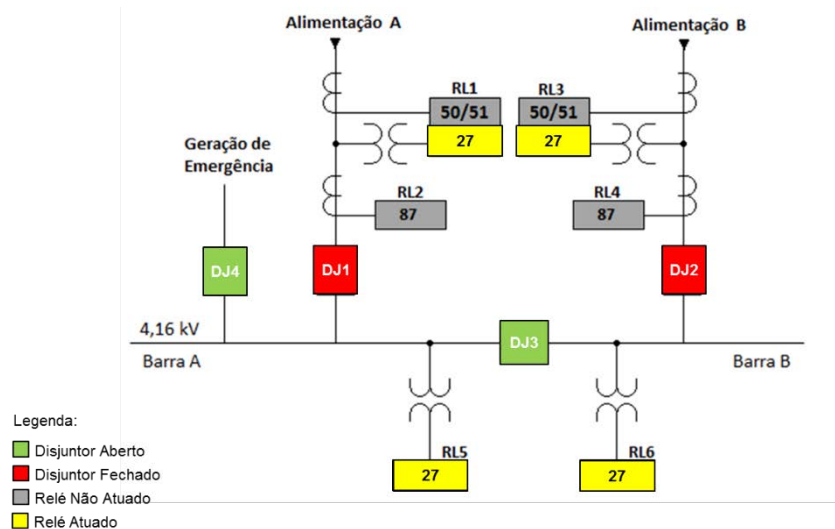


Figura 2.2: Situação do MCCM com ausência de tensão nas duas entradas.

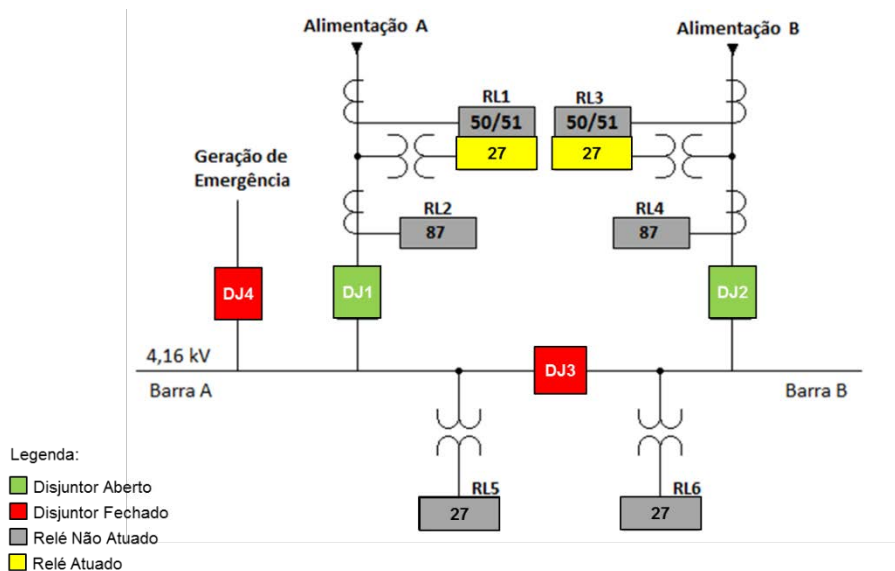


Figura 2.3: Situação do MCCM após a manobra de emergência.

Após o estabelecimento da energia através dos geradores de emergência, a equipe de operação da Alunorte parte somente as cargas prioritárias limitadas à potência dos geradores de emergência.



## 2.4 - DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO EM CASO DE AUSÊNCIA DE TENSÃO NA BARRA B SEM ATUAÇÃO DOS RELÉS 3 E 4

Em caso de falta de tensão na barra B do MCCM (Figura 2.4) o electricista verifica se o desligamento foi causado pela atuação de proteção (relé 3 ou 4) e, caso contrário, executa a abertura do disjuntor da entrada B (DJ2) e o fechamento do disjuntor de interligação de barras (DJ3), conforme a Figura 2.5.

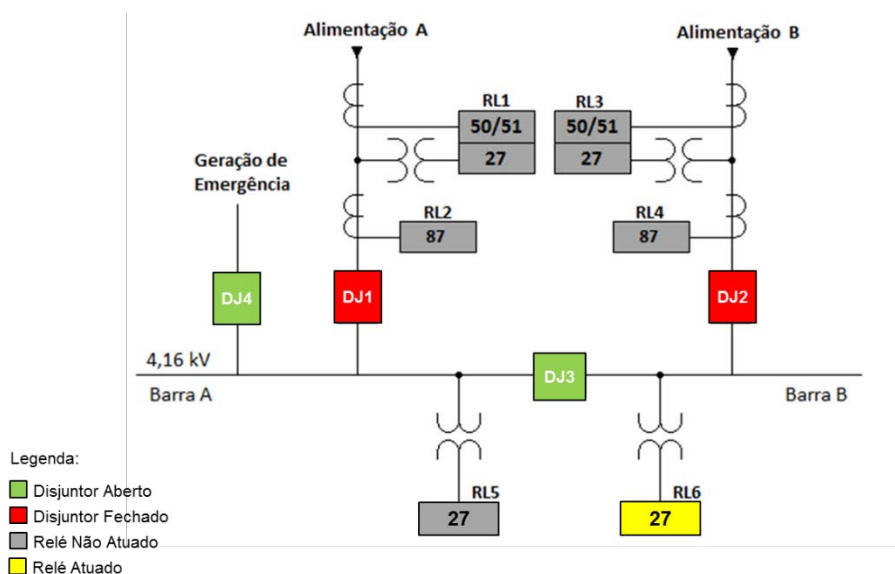


Figura 2.4: Situação do MCCM com subtensão na barra B.

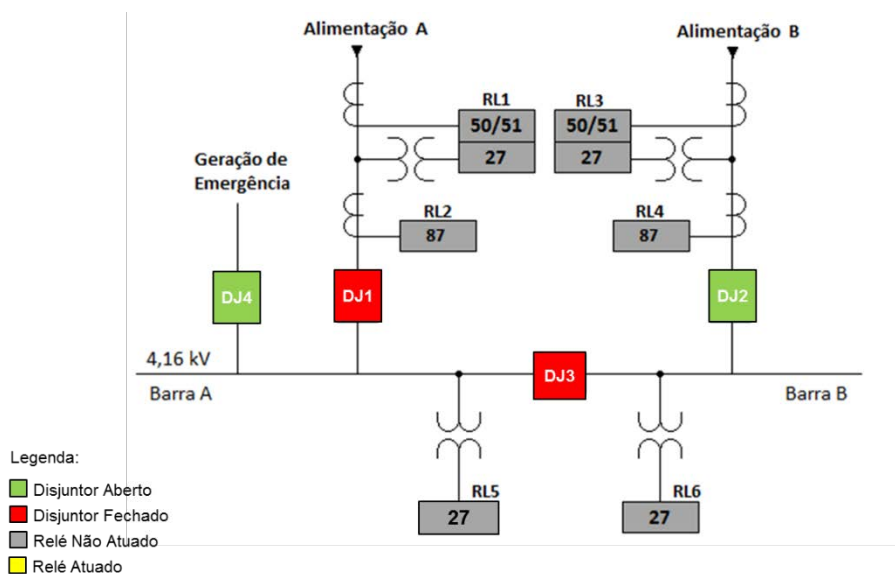


Figura 2.5: Situação do MCCM após interligação pela barra A.

Após o estabelecimento da energia pela barra A, a equipe de operação da Alunorte parte as cargas.

## 2.5 - DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO EM CASO DE ATUAÇÃO DO RELÉ DIFERENCIAL 2

Em caso de atuação do relé diferencial 2 (RL2) este envia comando de *trip* (abertura) para o disjuntor da entrada A (DJ1), isolando o ponto de defeito, o que causa a falta de tensão na barra A do MCCM, conforme Figura 2.6. O eletricista verifica se o desligamento foi causado pela atuação da proteção (relés 1 ou 2) e, confirmando a atuação do relé diferencial 2 (RL2) este não pode retornar com o disjuntor da entrada A (DJ1), com isso, executa o fechamento do disjuntor de interligação de barras (DJ3), conforme a Figura 2.7.

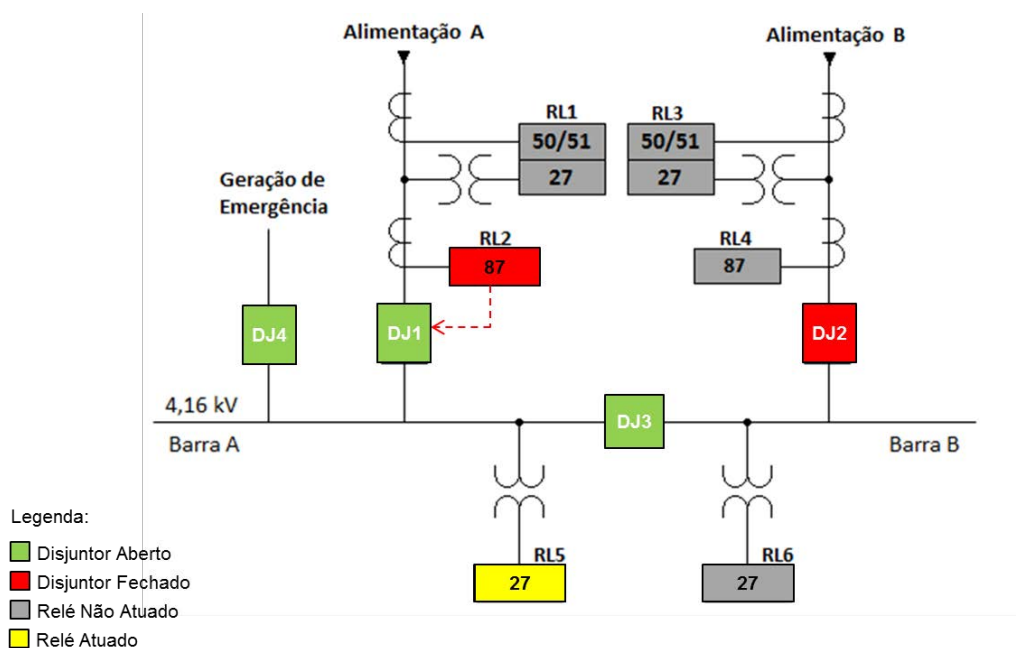


Figura 2.6: Situação do MCCM com atuação do relé de diferencial da entrada A.

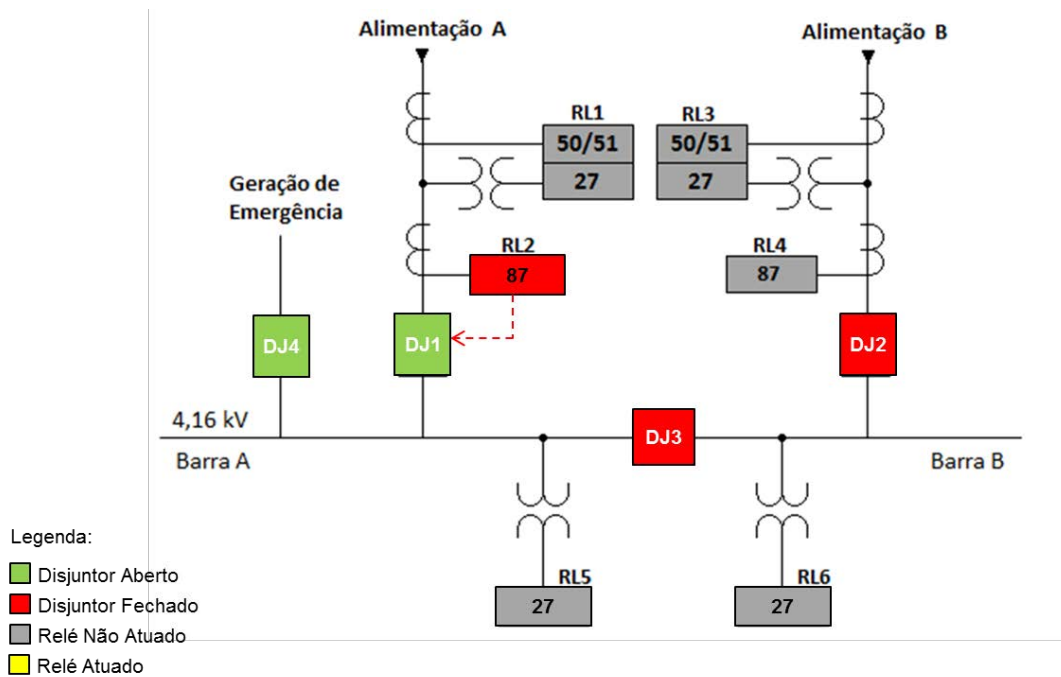


Figura 2.7: Situa o do MCCM ap s a manobra de interliga o pela barra B.

Ap s o estabelecimento da energia pela barra B, a equipe de opera o das  reas de processo partem as cargas e a equipe de manuten o de subesta es inicia a investiga o para encontrar e corrigir o ponto da falha.

## 2.6 - SITUA ES POSS VEIS

As Tabelas 2.2 e 2.3 resumem as situa es onde dever o ocorrer manobras e quais manobras dever o ser executadas.

Tabela 2.2: Situações possíveis de atuação.

| Status Pré-contingência |                   |                   | Pós-Contingência  |                   |                     |                     |                      |  |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--|
| DJ1                     | DJ3               | DJ2               | RL5               | RL6               | RL1                 | RL3                 | Tensão no RL1 ou RL3 | Ação   |
| Fechado                 | Aberto            | Fechado           | Com tensão        | Com tensão        | -                   | -                   | -                    | -  |
|                         |                   |                   | <b>Com tensão</b> | <b>Sem tensão</b> | <b>Não Atuado</b>   | <b>50/51 Atuado</b> | -                    | <b>DJ2 Aberto</b>                              |
|                         |                   |                   |                   |                   | <b>Não Atuado</b>   | <b>Não Atuado</b>   | -                    | <b>Abrir DJ2<br/>Fechar DJ3</b>                |
|                         |                   |                   | <b>Sem tensão</b> | <b>Com tensão</b> | <b>50/51 Atuado</b> | <b>Não Atuado</b>   | -                    | <b>DJ1 Aberto</b>                              |
|                         |                   |                   |                   |                   | <b>Não Atuado</b>   | <b>Não Atuado</b>   | -                    | <b>Abrir DJ1<br/>Fechar DJ3</b>                |
|                         |                   |                   | <b>Sem tensão</b> | <b>Sem tensão</b> | <b>Não Atuado</b>   | <b>Não Atuado</b>   | -                    | <b>Abrir DJ1/DJ2<br/>Fechar DJ3/DJ4</b>        |
|                         |                   |                   |                   |                   | <b>Não Atuado</b>   | <b>50/51 Atuado</b> | -                    | <b>DJ2 Aberto<br/>Abrir DJ1<br/>Fechar DJ4</b> |
|                         |                   |                   |                   |                   | 50/51 Atuado        | Não Atuado          | -                    | DJ1 Aberto                                     |
|                         |                   |                   |                   |                   | 50/51 Atuado        | 50/51 Atuado        | -                    | DJ1/DJ2 Abertos                                |
|                         |                   |                   | Fechado           | Fechado           | Aberto              | Com tensão          | Com tensão           | -  |
| <b>Sem tensão</b>       | <b>Sem tensão</b> | <b>Não Atuado</b> |                   |                   |                     | <b>Não Atuado</b>   | sim                  | <b>Abrir DJ1<br/>Fechar DJ2</b>                |
|                         |                   |                   |                   |                   |                     |                     | não                  | Abrir DJ1<br>Fechar DJ4                        |
|                         |                   | 50/51 Atuado      |                   |                   |                     | Não Atuado          | -                    | DJ1/DJ3 Abertos                                |

Tabela 2.3: Continuação da Tabela 2.2.

| Status Pré-contingência |         |         | Pós-Contingência |            |              |              |                      |                                 |
|-------------------------|---------|---------|------------------|------------|--------------|--------------|----------------------|---------------------------------|
| DJ1                     | DJ3     | DJ2     | RL5              | RL6        | RL1          | RL3          | Tensão no RL1 ou RL3 | Ação                            |
| Aberto                  | Fechado | Fechado | Com tensão       | Com tensão | -            | -            | -                    | -                               |
|                         |         |         | Sem tensão       | Sem tensão | Não Atuado   | Não Atuado   | sim                  | <b>Abrir DJ2<br/>Fechar DJ1</b> |
|                         |         |         |                  |            | Não Atuado   | 50/51 Atuado | não                  | Abrir DJ2<br>Fechar DJ4         |
| Fechado                 | Fechado | Fechado | Com tensão       | Com tensão | -            | -            | -                    | -                               |
|                         |         |         | Sem tensão       | Sem tensão | Não Atuado   | Não Atuado   | não                  | Abrir DJ1/2<br>Fechar DJ4       |
|                         |         |         |                  |            | Não Atuado   | 50/51 Atuado | não                  | DJ2/3 Abertos                   |
|                         |         |         |                  |            | 50/51 Atuado | Não Atuado   | não                  | DJ1/3 Abertos                   |
|                         |         |         |                  |            | 50/51 Atuado | 50/51 Atuado | não                  | DJ1/2/3 Abertos                 |

Para as demais situações como, por exemplo, DJ1 Fechado e DJ2 e DJ3 abertos são condições de falta de energia, por isso não estão listadas nas Tabelas 2.2 e 2.3. A proposta de automatismo das manobras visa à utilização do sistema de controle central existente, devido este direcionar para uma solução automática de custo reduzido, associado a um ganho significativo de velocidade para a entrada em operação do sistema, não excluindo a possibilidade de operação local.

## **2.7 – CONCLUSÃO**

Neste capítulo foi descrito o funcionamento do sistema de proteção dos MCCMs das subestações da precipitação, bem como foram avaliadas as situações em que deverão ocorrer manobras para o reestabelecimento de energia.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESENVOLVIMENTO DA LÓGICA DE CONTROLE**

Este capítulo tem como objetivo o desenvolvimento da lógica de controle para atuação nos disjuntores das entradas A e B, interligação de barras e a entrada de emergência.

#### **3.1 – DESENVOLVIMENTO DA TABELA VERDADE**

Para o desenvolvimento da lógica de controle utilizou-se o método de construção da tabela verdade [1], mostrada na Tabela 3.1, onde foram listadas todas as possíveis condições de atuação do sistema de proteção desses painéis. O sistema proposto é composto por dez entradas:

- 1) Status do disjuntor da entrada A (DJ1);
- 2) Status do disjuntor da entrada B (DJ2);
- 3) Status do disjuntor de interligação das barras A e B (DJ3);
- 4) Status do disjuntor da entrada de emergência (DJ4);
- 5) Atuação do relé de sobrecorrente (50/51) da entrada A (RL1);
- 6) Atuação do relé de sobrecorrente (50/51) da entrada B (RL3);
- 7) Atuação do relé de subtensão (27) na barra A (RL5);
- 8) Atuação do relé de subtensão (27) na barra B (RL6);
- 9) Atuação do relé de subtensão (27) no alimentador da entrada A (RL1);
- 10) Atuação do relé de subtensão (27) no alimentador da entrada B (RL3).

E sete saídas:

- 1) Comando de abertura do disjuntor da entrada A (Abre DJ1);
- 2) Comando de abertura do disjuntor da entrada B (Abre DJ2);
- 3) Comando de abertura do disjuntor de interligação das barras A e B (Abre DJ3);
- 4) Comando de fechamento do disjuntor da entrada A (Fecha DJ1);
- 5) Comando de fechamento do disjuntor da entrada B (Fecha DJ2);

- 6) Comando de fechamento do disjuntor de interligação das barras A e B (Fecha DJ3);
- 7) Comando de fechamento do disjuntor da entrada de emergência (Fecha DJ4).





Para exemplificar a lógica definida na tabela verdade será tomada a segunda linha (destacada em vermelho na Tabela 3.1). Os disjuntores das entradas A e B estão fechados ( $DJ1 = 1$  e  $DJ2 = 1$ ), os disjuntores de interligação das barras de entrada de emergência estão abertos ( $DJ3 = 0$  e  $DJ4 = 0$ ) e o relé de subtensão da barra B está atuado ( $RL6 = 1$ ). Esta condição é mostrada no diagrama da Figura 3.1.

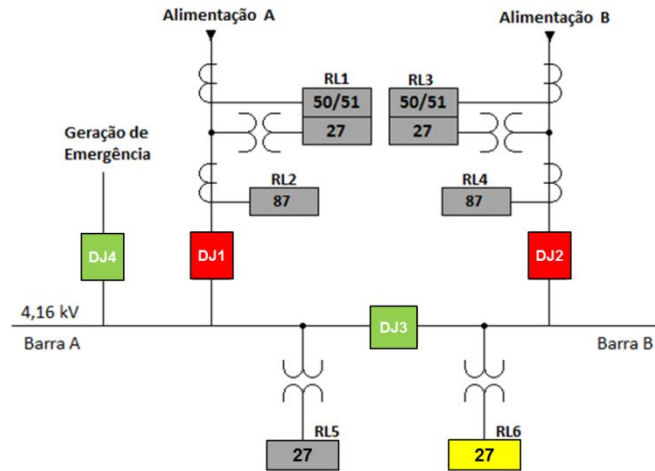


Figura 3.1: Diagrama unifilar do MCCM com subtensão na barra B.

A ação a ser tomada de acordo com a tabela verdade é abertura do disjuntor da entrada B (Abre DJ2) e fechamento do disjuntor de interligação (Fecha DJ3), conforme lustrado na Figura 3.2. Neste momento o MCCM passa a ser alimentado todo pela entrada A, normalizando a tensão nas barras.

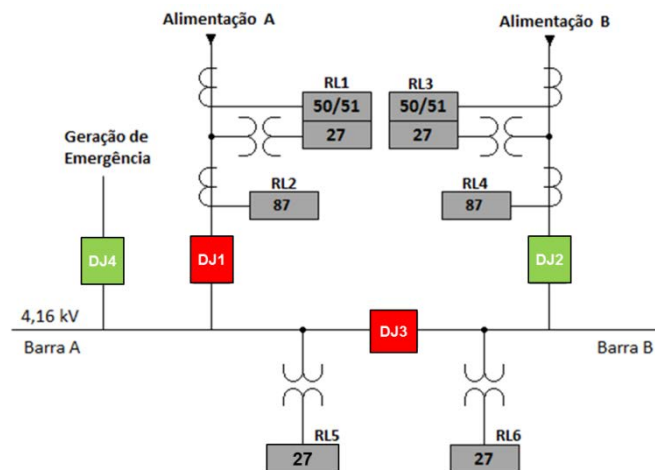


Figura 3.2: Diagrama unifilar do MCCM após manobra.

### 3.2 - EQUAÇÕES LÓGICAS

Para obtenção dos diagramas lógicos [2] foram extraídas as equações lógicas, a partir da tabela verdade, para cada ação de abertura e fechamento dos disjuntores: Abre DJ1, Fecha DJ1, Abre DJ2, Fecha DJ2, Abre DJ3, Fecha DJ3 e Fecha DJ4, sendo aplicado o método da simplificação algébrica, uma vez que, devido o elevado número de entradas ficaria bastante complexa a utilização do *Mapa de Karnaugh* [14].

Para facilitar a escrita das equações tomaram-se as variáveis lógicas A, B, C, D, E, F, G e H onde estas estão correlacionadas aos DJ1, DJ2, DJ3, DJ4, RL1 (50/51), RL3 (50/51), RL5, RL6, RL1 (27) e RL3 (27) respectivamente.

1) Para o comando de abertura do disjuntor da entrada A (Abre DJ1) tomou-se a Equação (3.1):

$$\begin{aligned}
 \text{Abre DJ1} = & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + ABC\bar{D}\bar{E}FG\bar{H} + ABC\bar{D}\bar{E}FGH + \\
 & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + ABC\bar{D}\bar{E}FG\bar{H} + ABC\bar{D}\bar{E}FGH + \\
 & \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{J} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \\
 & \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Agrupando as variáveis comuns da Equação (3.1) tem-se a Equação (3.2):

$$\begin{aligned}
 = & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(\bar{H} + H) + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(\bar{H} + H) + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(\bar{H} + H) + \\
 & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(\bar{H} + H) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(\bar{J} + J) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(\bar{F} + F) + \\
 & \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Aplicando a Propriedade da Identidade,  $\bar{A} + A = \mathbf{1}$ , na Equação (3.2) tem-se a Equação (3.3):

$$\begin{aligned}
 = & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G + \\
 & \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Reagrupando as variáveis comuns da Equação (3.3) tem-se a Equação (3.4):

$$\begin{aligned}
 = & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(\bar{F} + F) + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(\bar{F} + F) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(\bar{E} + E) + \\
 & \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(H + F\bar{H})
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Tomando a Propriedade,  $A + \bar{A}B = A + B$ , resultam as Equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8.

$$= ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(H + F) \tag{3.5}$$

$$= ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G(\bar{E} + E) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G[H + F] \tag{3.6}$$

$$= ABC\bar{D}G + C\bar{D}G[AB\bar{F}H + \bar{A}B\bar{E}(H + F)] \quad (3.7)$$

$$\boxed{\text{Abre DJ1} = \bar{D}G\{ABC\bar{C} + C[AB\bar{F}H + \bar{A}B\bar{E}(H + F)]\}} \quad (3.8)$$

2) Para o comando de fechamento do disjuntor da entrada A (Fecha DJ1) tomou-se a Equação 3.9:

$$\text{Fecha DJ1} = \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} \quad (3.9)$$

Agrupando as variáveis comuns da Equação 3.9 tem-se a Equação 3.10:

$$= \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{I}(\bar{H} + H) \quad (3.10)$$

Tomando,  $\bar{A} + A = 1$ , então resultam as Equações 3.11 e 3.12:

$$= \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{I} \quad (3.11)$$

$$= \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{G}\bar{I}(\bar{F}H + F) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} \quad (3.12)$$

Tomando  $A + \bar{A}B = A + B$ , têm-se as Equações 3.13 e 3.14:

$$= \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{G}\bar{I}(H + F) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} \quad (3.13)$$

$$\boxed{\text{Fecha DJ1} = \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}[\bar{F}G\bar{H} + \bar{G}\bar{I}(H + F) + \bar{F}G\bar{H}]} \quad (3.14)$$

3) Para o comando de abertura do disjuntor da entrada B (Abre DJ2) tomou-se a Equação 3.15:

$$\begin{aligned} \text{Abre DJ2} = & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + \\ & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \\ & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHI + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \\ & \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} = & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}H(\bar{G} + G) + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}H(\bar{G} + G) + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{G}H(\bar{F} + F) + \\ & ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(\bar{I} + I) + \\ & \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Aplicando a propriedade da Identidade,  $\bar{A} + A = 1$ , tem-se as Equações 3.17 a

3.21.

$$= ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}H + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}H + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{G}H + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} \quad (3.17)$$

$$= ABC\bar{D}\bar{E}\bar{H}(\bar{F} + F) + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{H}(\bar{G} + FG) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{G}H(\bar{F} + F\bar{I}) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} \quad (3.18)$$

$$= ABC\bar{D}\bar{E}H + ABC\bar{D}EH(\bar{G} + FG) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}GH(\bar{F} + F\bar{I}) + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H \quad (3.19)$$

$$= ABC\bar{D}\bar{H}[\bar{E} + E(\bar{G} + FG)] + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}H[G(\bar{F} + F\bar{I}) + F\bar{G}] + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ \quad (3.20)$$

$$\boxed{\text{Abre DJ2} = ABC\bar{D}\bar{H}[\bar{E} + E(\bar{G} + FG)] + C\bar{D}\bar{E}H\{\bar{A}B[G(\bar{F} + F\bar{I}) + F\bar{G}] + \bar{A}\bar{B}\bar{F}GJ\}} \quad (3.21)$$

4) Para o comando de fechamento do disjuntor da entrada B (Fecha DJ2) tomou-se a Equação 3.22 e agrupando as variáveis comuns tem-se a Equação 3.23:

$$\text{Fecha DJ2} = \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{J} + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHI \quad (3.22)$$

$$= \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}\bar{G}H(\bar{E} + E) + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}GH(\bar{E}j + E) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHI \quad (3.23)$$

Tomando  $\bar{A} + A = 1$  e  $A + \bar{A}B = A + B$ , resultam as Equações 3.24 a 3.26:

$$= \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}\bar{G}H + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}GH(j + E) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHI \quad (3.24)$$

$$= C\bar{D}\bar{H}[\bar{A}\bar{B}\bar{F}\bar{G} + \bar{A}\bar{B}\bar{F}G(j + E) + \bar{A}B\bar{E}\bar{F}GI] \quad (3.25)$$

$$\boxed{\text{Fecha DJ2} = C\bar{D}\bar{H}\{\bar{A}\bar{B}\bar{F}[\bar{G} + G(j + E)] + \bar{A}B\bar{E}\bar{F}GI\}} \quad (3.26)$$

5) Para o comando de abertura do disjuntor de interligação de barras (Abre DJ3) tomou-se a Equações 3.27 e 3.28:

$$\text{Abre DJ3} = \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH\bar{I} + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHI \quad (3.27)$$

$$= \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}\bar{G}H(\bar{E} + E) + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(\bar{I} + I) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(\bar{I} + I) \quad (3.28)$$

Aplicando a Propriedade da Identidade  $\bar{A} + A = 1$ , resultam as Equações 3.29 a 3.32:

$$= \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}\bar{G}H + \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH \quad (3.29)$$

$$= \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}H(\bar{G} + EG) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}GH(\bar{F} + F) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}FH(\bar{G} + G) \quad (3.30)$$

$$= \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}H(\bar{G} + EG) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}GH + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}FH \quad (3.31)$$

$$\boxed{\text{Abre DJ3} = \bar{A}\bar{B}C\bar{D}\bar{F}H(\bar{G} + EG) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}H(G + F)} \quad (3.32)$$

6) Para o comando de fechamento do disjuntor de interligação de barras (Fecha DJ3) tomou-se as Equações 3.33 e 3.34:

$$\begin{aligned} \text{Fecha DJ3} &= ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}G\bar{H} + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + \\ &ABC\bar{D}\bar{E}FG\bar{H} + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + A\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHI \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} &= ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}H(\bar{G} + G) + ABC\bar{D}\bar{E}G\bar{H}(\bar{F} + F) + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + \\ &C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(A\bar{B}J + \bar{A}BI) \end{aligned} \quad (3.34)$$

Aplicando a Propriedade da Identidade  $\bar{A} + A = 1$ , resultam as Equações 3.35 a 3.37:

$$= ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}H + ABC\bar{D}\bar{E}G\bar{H} + ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}\bar{G}H + C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(A\bar{B}J + \bar{A}BI) \quad (3.35)$$

$$= ABC\bar{D}\bar{F}H(\bar{E} + E\bar{G}) + ABC\bar{D}\bar{E}G\bar{H} + C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(A\bar{B}J + \bar{A}BI) \quad (3.36)$$

$$\boxed{\text{Fecha DJ3} = ABC\bar{D}[\bar{F}H(\bar{E} + E\bar{G}) + \bar{E}G\bar{H}] + C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(A\bar{B}J + \bar{A}BI)} \quad (3.37)$$

7) Para o comando de fechamento do disjuntor da entrada de emergência (Fecha DJ4) tomou-se as Equações 3.38 e 3.39:

$$\begin{aligned} \text{Fecha DJ4} &= ABC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH + ABC\bar{D}\bar{E}FGH + A\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \\ &\bar{A}BC\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHI + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}FG\bar{H}I + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}FGHI \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} &= ABC\bar{D}\bar{E}GH(\bar{F} + F) + A\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}GHI(\bar{F} + F) + \\ &\bar{A}BC\bar{D}\bar{E}FG\bar{H}I \end{aligned} \quad (3.39)$$

Aplicando  $\bar{A} + A = 1$ , então resultam as Equações 3.40 a 3.43:

$$= ABC\bar{D}\bar{E}GH + A\bar{B}C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GHJ + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}GHI + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}FG\bar{H}I \quad (3.40)$$

$$= A\bar{D}\bar{E}GH(B\bar{C} + \bar{B}C\bar{F}J) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}GI(H + F\bar{H}) \quad (3.41)$$

Aplicando  $A + \bar{A}B = A + B$ , então:

$$= A\bar{D}\bar{E}GH(B\bar{C} + \bar{B}C\bar{F}J) + \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}GI(H + F) \quad (3.42)$$

$$\boxed{\text{Fecha DJ4} = \bar{D}\bar{E}G[AH(B\bar{C} + \bar{B}C\bar{F}J) + \bar{A}BCI(H + F)]} \quad (3.43)$$

### 3.3 – DIAGRAMAS LÓGICOS

A partir das equações lógicas demonstradas, foram desenvolvidos os seguintes diagramas lógicos mostrados nas Figuras 3.3 a 3.9 a seguir.

1) Diagrama Lógico do Comando de Abertura do Disjuntor da Entrada A:

$$Abre DJ1 = \bar{D}G\{ABC\bar{C} + C[AB\bar{F}H + \bar{A}B\bar{E}(H + F)]\}$$

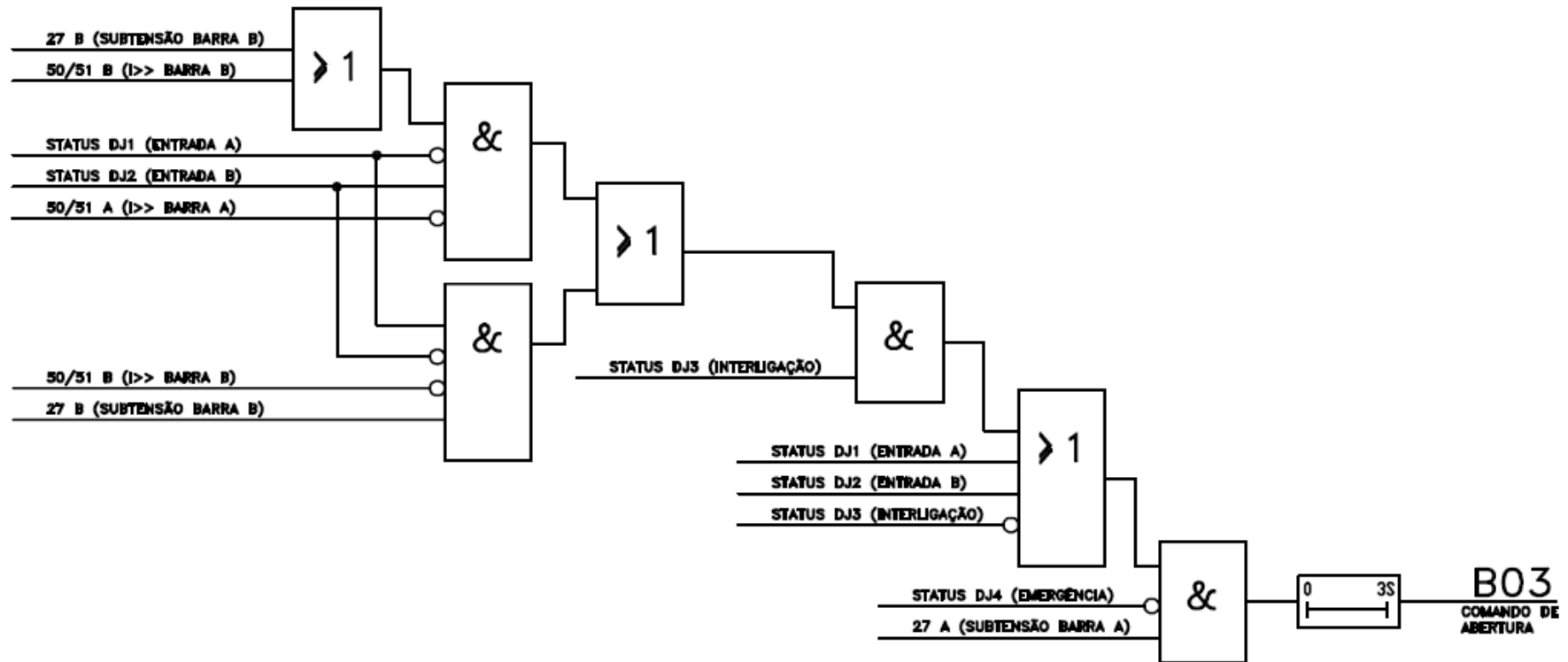


Figura 3.3: Diagrama lógico Abre DJ1.

2) Diagrama Lógico do Comando de Fechamento do Disjuntor da Entrada A:

$$\text{Fecha DJ1} = \bar{A}BC\bar{D}\bar{E}[\bar{F}G\bar{H} + G\bar{I}(H + F) + F\bar{G}H]$$

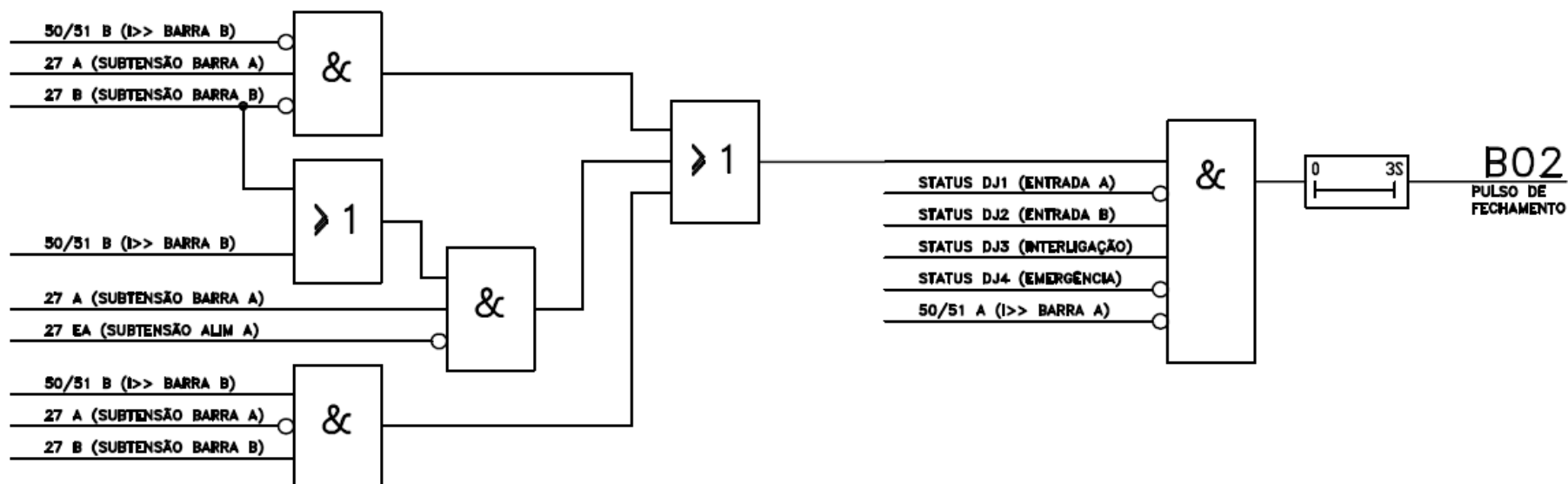


Figura 3.4: Diagrama lógico Fecha DJ1.



3) Diagrama Lógico do Comando de Abertura do Disjuntor da Entrada B:

$$Abre DJ2 = ABC\bar{D}H[\bar{E} + E(\bar{G} + FG)] + C\bar{D}\bar{E}H\{\bar{A}B[G(\bar{F} + F\bar{I}) + F\bar{G}] + A\bar{B}\bar{F}GJ\}$$

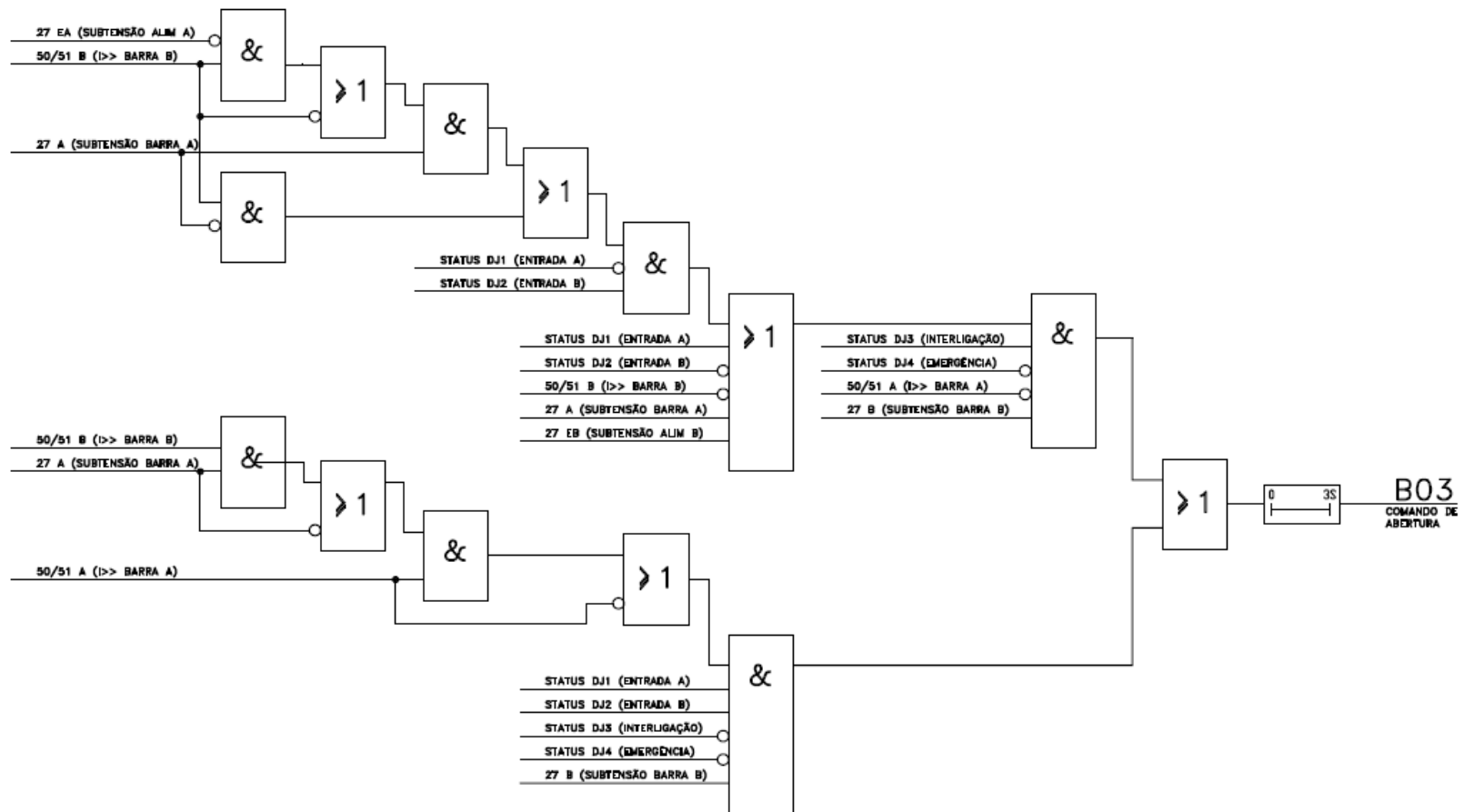


Figura 3.5: Diagrama lógico Abre DJ2.

4) Diagrama Lógico do Comando de Fechamento do Disjuntor da Entrada B:

$$Fecha DJ2 = C\bar{D}H\{A\bar{B}\bar{F}[\bar{G} + G(j + E)] + \bar{A}\bar{B}\bar{E}FGI\}$$

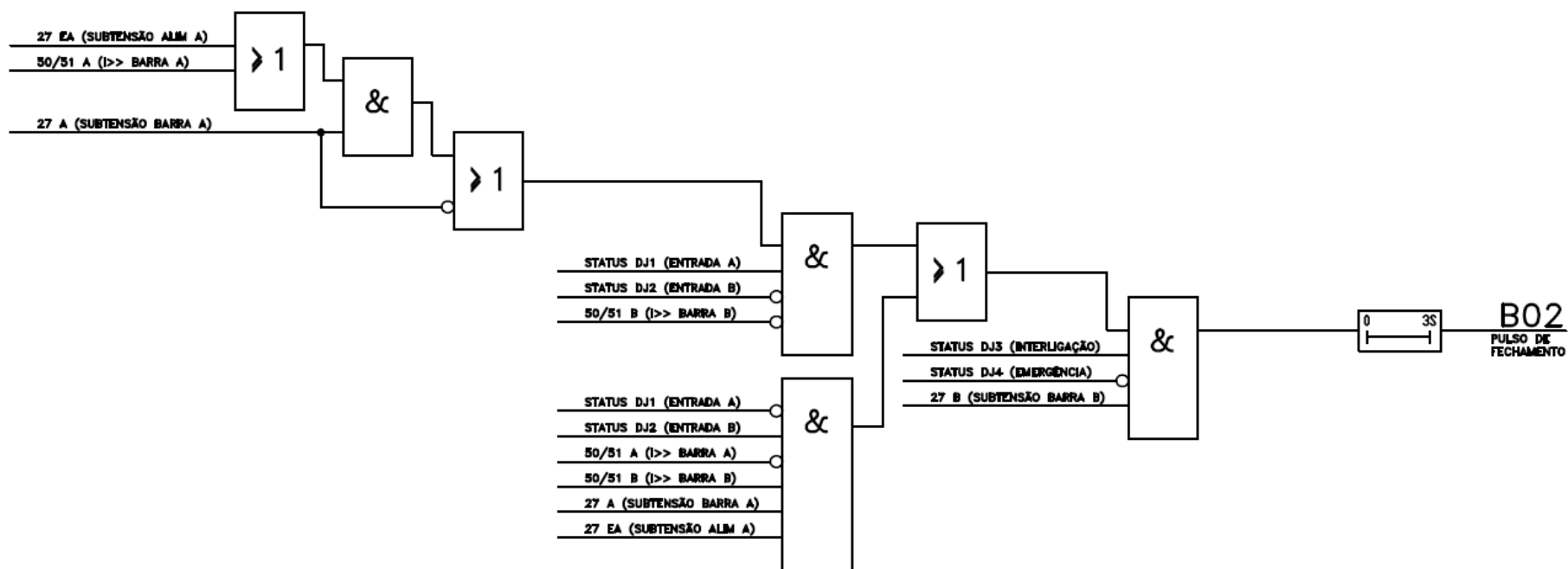


Figura 3.6: Diagrama lógico Fecha DJ2.

5) Diagrama Lógico do Comando de Abertura do Disjuntor de Interligação de Barras:

$$Abre DJ3 = \overline{A} \overline{B} C \overline{D} \overline{F} H (\overline{G} + EG) + \overline{A} B C \overline{D} \overline{E} \overline{H} (G + F)$$

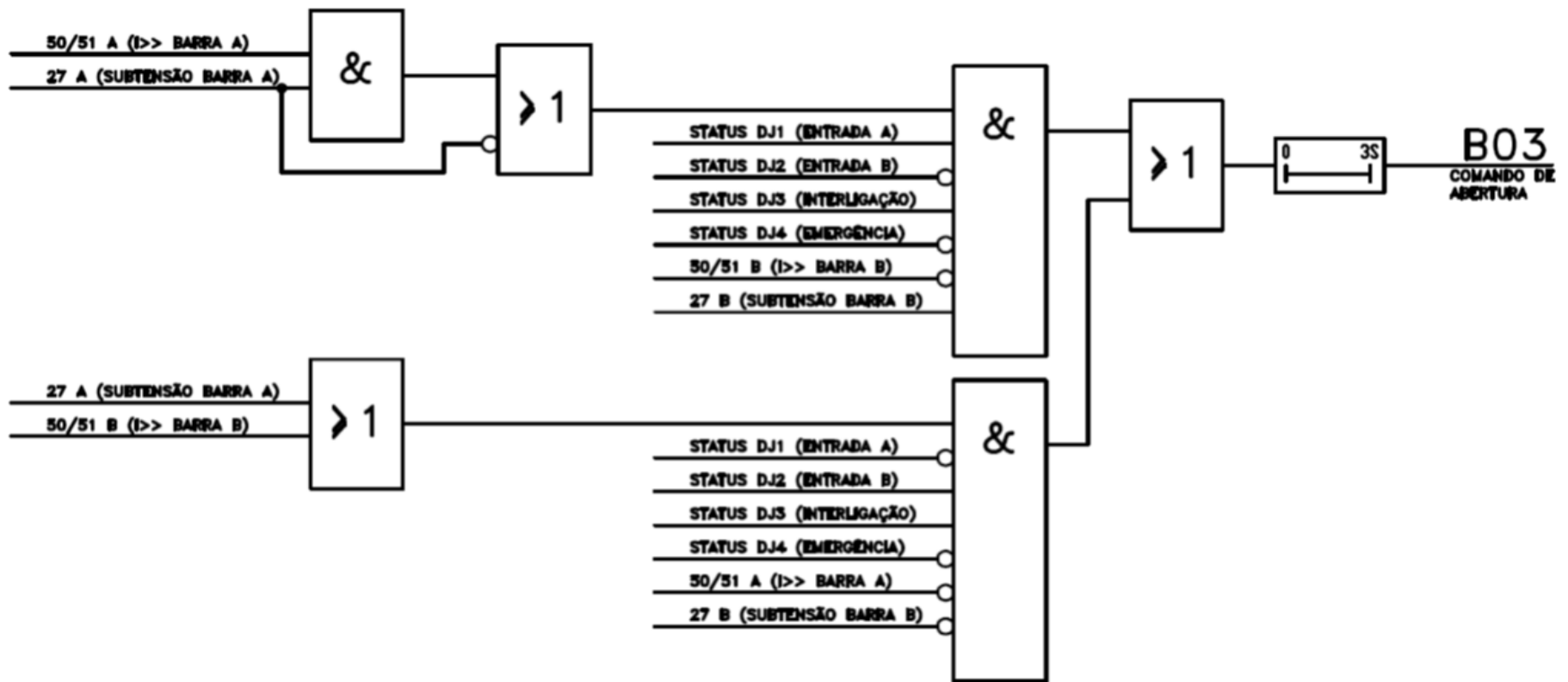


Figura 3.7: Diagrama lógico Abre DJ3.

6) Diagrama Lógico do Comando de Fechamento do Disjuntor de Interligação de Barras:

$$Fecha DJ3 = ABC\bar{D}[\bar{F}H(\bar{E} + E\bar{G}) + \bar{E}G\bar{H}] + C\bar{D}\bar{E}\bar{F}GH(\bar{A}\bar{B}J + \bar{A}BI)$$

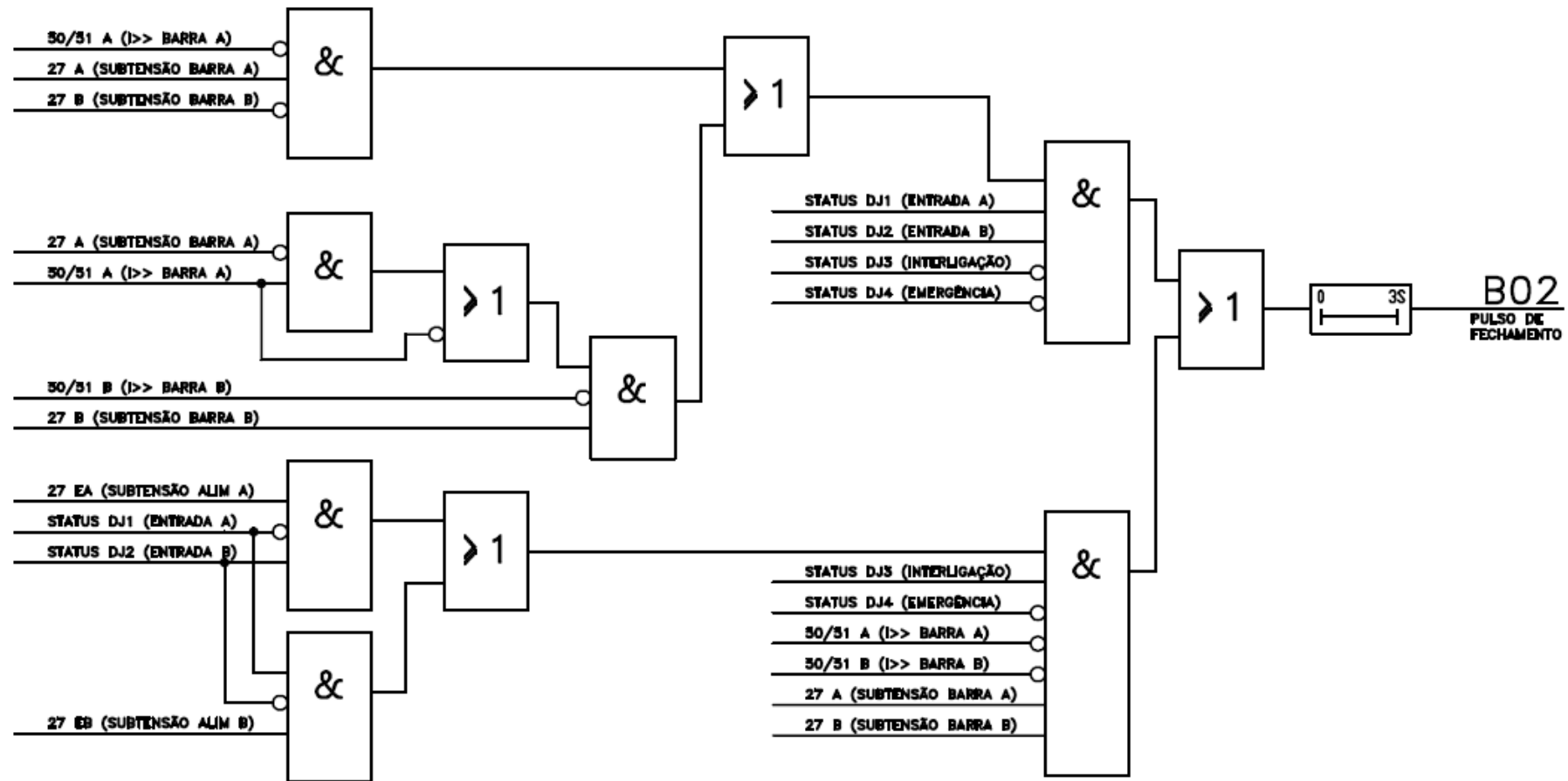


Figura 3.8: Diagrama lógico Fecha DJ3.

7) Diagrama Lógico do Comando de Fechamento do Disjuntor da Entrada de Emergência:

$$\text{Fecha DJ4} = \overline{D}\overline{E}\overline{G}[AH(\overline{B}\overline{C} + \overline{B}C\overline{F}J) + \overline{A}BCI(H + F)]$$

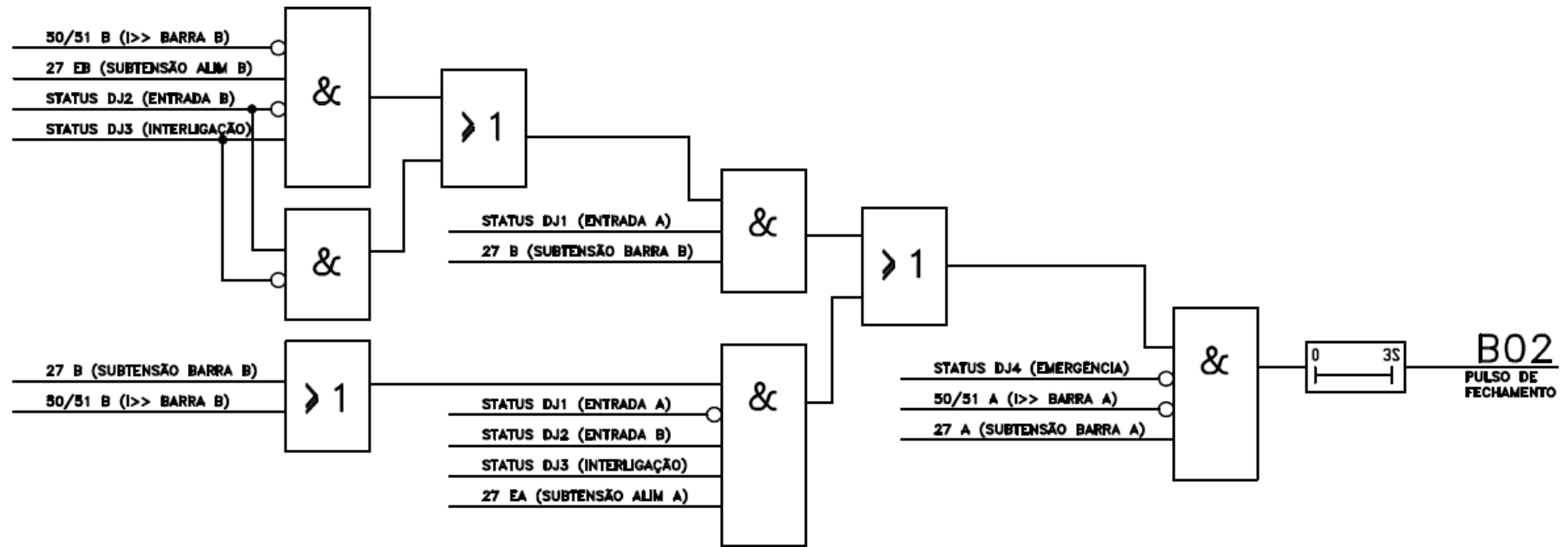


Figura 3.9: Diagrama lógico Fecha DJ4.

### **3.4 – CONCLUSÃO**

Neste capítulo foi apresentada a metodologia de desenvolvimento da lógica de controle. Onde, utilizando-se da tabela verdade e posteriormente extraindo as equações lógicas para cada ação de abertura e fechamento dos disjuntores e aplicando simplificação algébrica, chegou-se na lógica de blocos, a qual deverá ser implantada no controlador central da planta.

## CAPÍTULO 4

### VALIDAÇÃO DA LÓGICA DE CONTROLE

Este capítulo tem como objetivo a realização de testes na lógica desenvolvida no Capítulo 3 para fins de validação.

#### 4.1 – PRIMEIRO TESTE: AUSÊNCIA DE TENSÃO NAS BARRAS A E B DO MCCM

Considera-se que no momento anterior a falta os disjuntores de entrada das barras A e B estão fechados ( $DJ1 = 1$  e  $DJ2 = 1$ ) e os disjuntores de interligação e da entrada de emergência estão abertos ( $DJ3 = 0$  e  $DJ4 = 0$ ). No momento da falta dos relés de subtensão são ativos ( $RL1(27) = 1$ ,  $RL3(27) = 1$ ,  $RL5 = 1$  e  $RL6 = 1$ ), conforme a Figura 4.1.

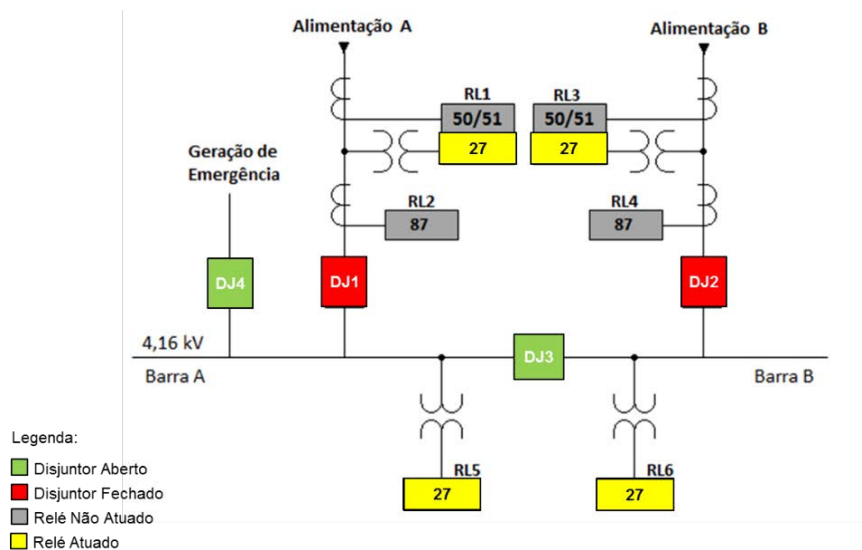


Figura 4.1: Ausência de tensão nas barras A e B do MCCM.

Para reestabelecer a energia deve-se abrir os disjuntores das entradas A e B (DJ1 e DJ2) e fechar o disjuntor de interligação (DJ3) e da entrada de emergência (DJ4). As linhas em azul representam nível lógico alto e as linhas em amarelo nível baixo.

#### 4.1.1 - Comando de Abertura do DJ1

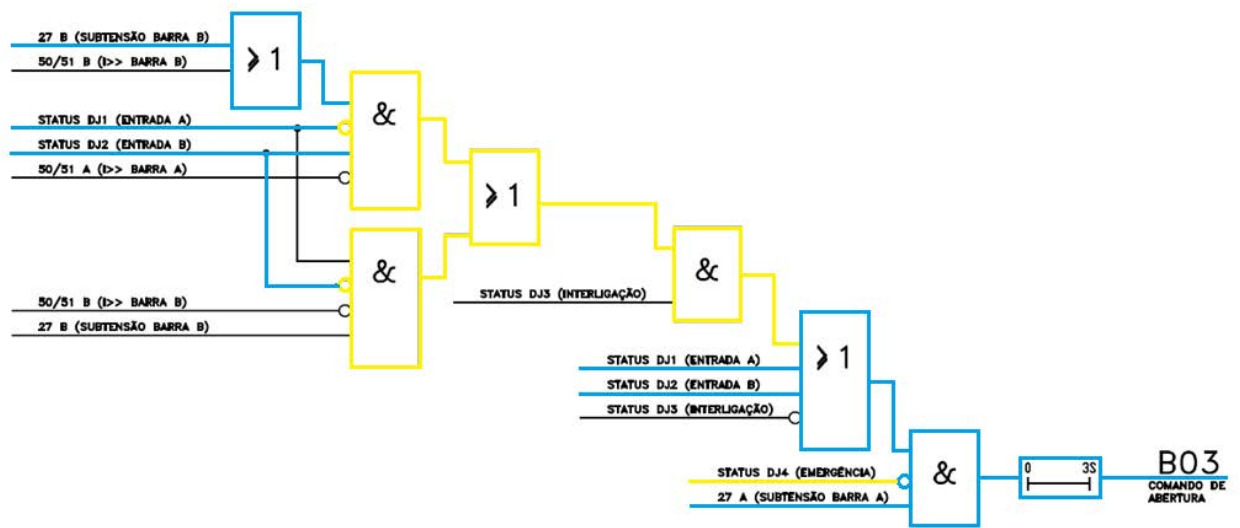


Figura 4.2: Lógica de abertura do DJ1 ativa.

#### 4.1.2 - Comando de Fechamento do DJ1

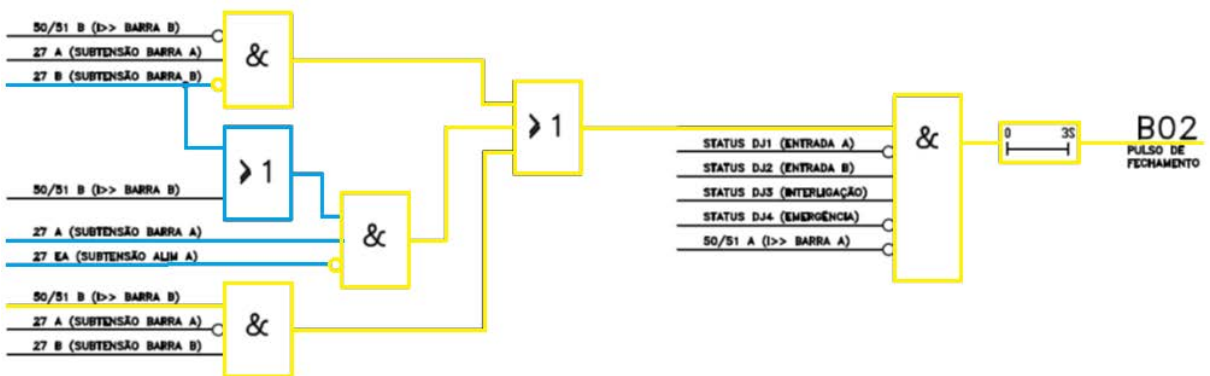


Figura 4.3: Lógica de fechamento do DJ1 inativa.



### 4.1.3 - Comando de Abertura do DJ2

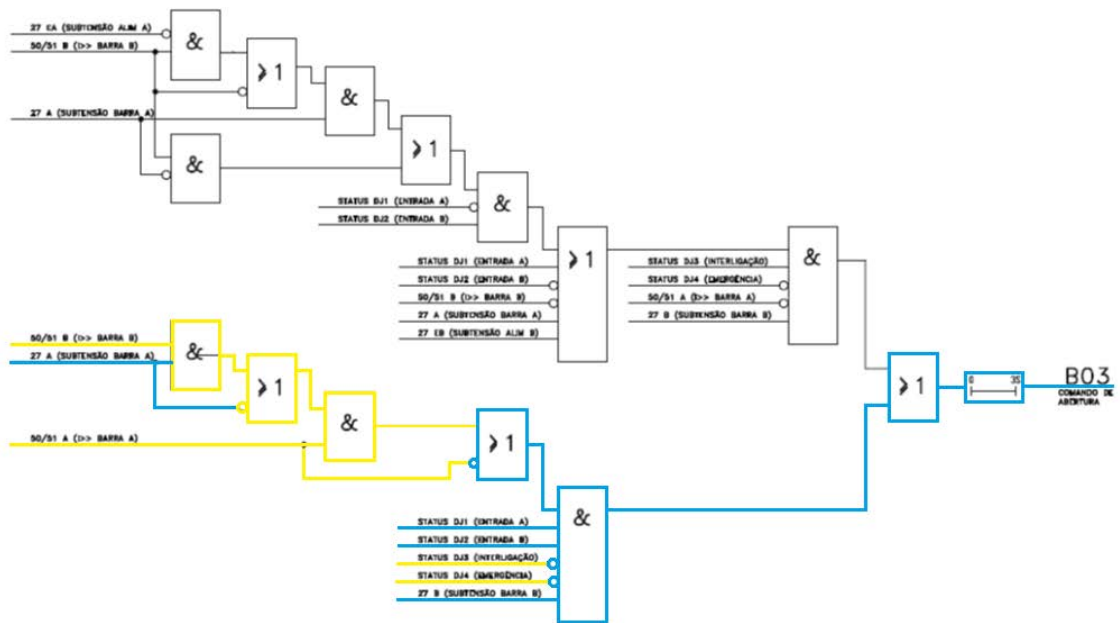


Figura 4.4: Lógica de abertura do DJ2 ativa.

### 4.1.4 - Comando de Fechamento do DJ2

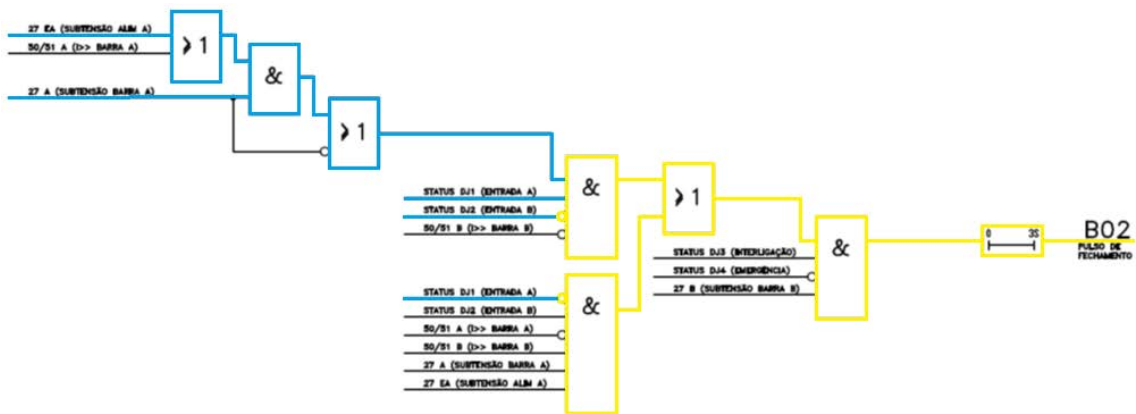


Figura 4.5: Lógica de fechamento do DJ2 inativa.

#### 4.1.5 - Comando de Abertura do DJ3

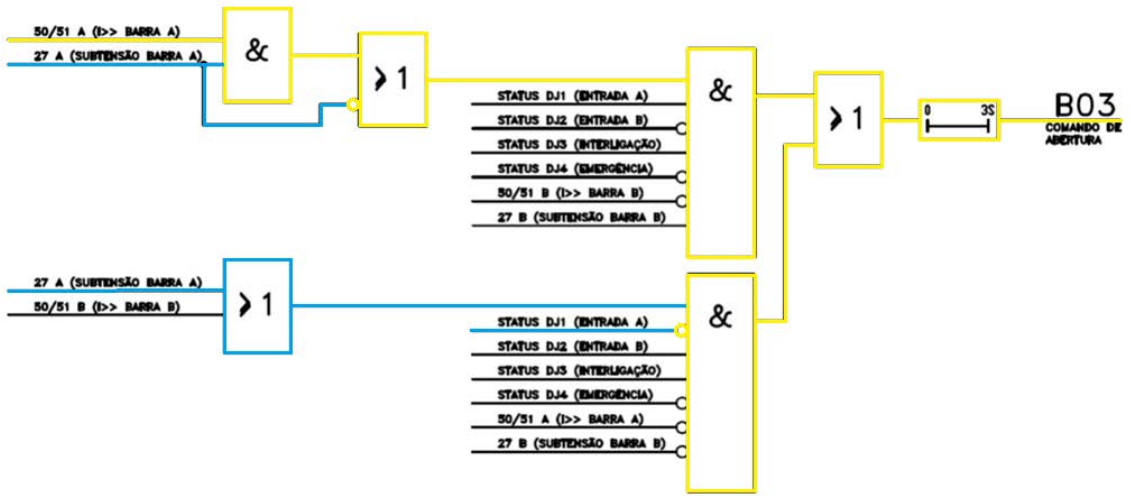


Figura 4.6: Lógica de abertura do DJ3 inativa.

#### 4.1.6 - Comando de Fechamento DJ3

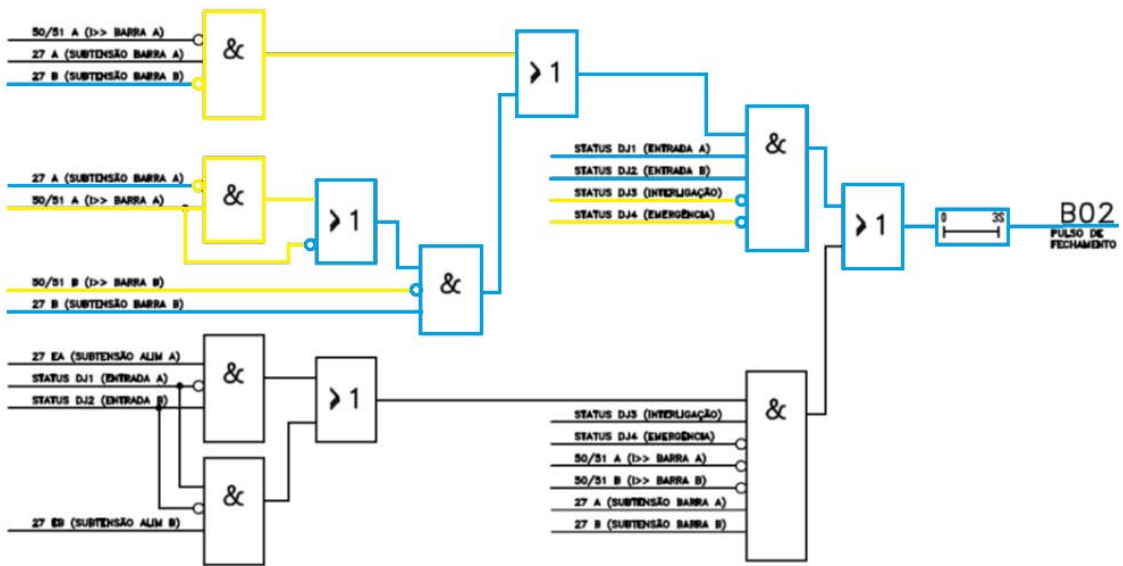


Figura 4.7: Lógica de fechamento do DJ3 ativa.

#### 4.1.7 - Comando de Fechamento DJ4

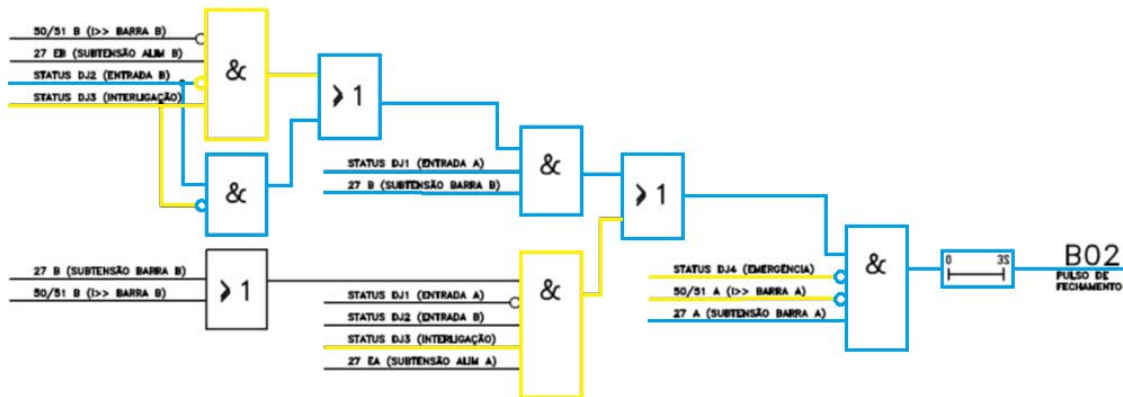


Figura 4.8: Lógica de fechamento do DJ4 ativa.

Conforme demonstrado nas Figuras 4.2 a 4.8, as únicas lógicas que atuarão nesta condição serão as de abertura das entradas A e B e fechamento da interligação e da entrada de emergência, conforme o esperado.

#### 4.2 - SEGUNDO TESTE: AUSÊNCIA DE TENSÃO NA BARRA B DO MCCM

Considera-se que no momento anterior a falta os disjuntores de entrada das barras A e B estavam fechados (DJ1 = 1 e DJ2 = 1) e os disjuntores de interligação e da entrada de emergência estavam abertos (DJ3 = 0 e DJ4 = 0). No momento da falta o relé de subtensão na Barra B é ativo (RL6 = 1), conforme Figura 4.9.

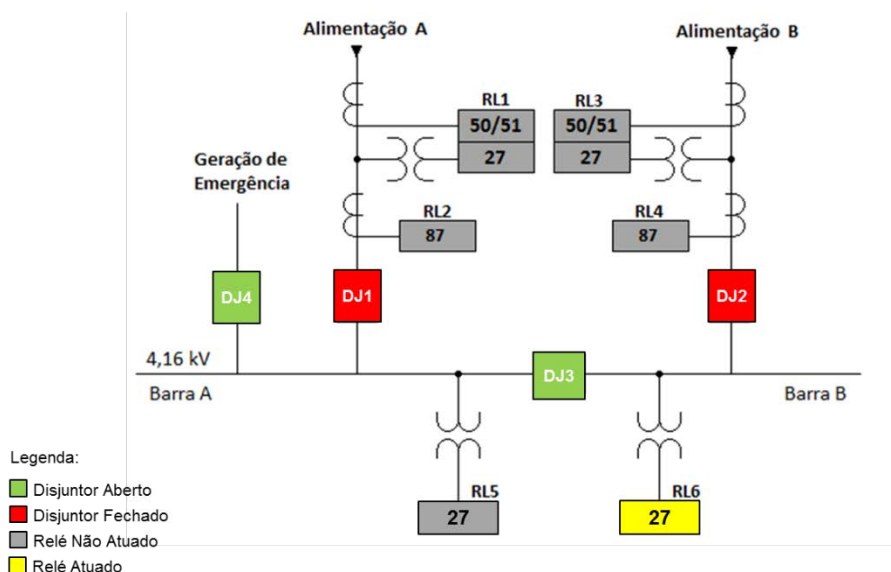


Figura 4.9: Ausência de tensão na barra B do MCCM.

Para reestabelecimento da energia deve-se abrir o disjuntor da entrada B (DJ2) e fechar o disjuntor de interligação (DJ3). As linhas em azul representam nível lógico alto e as linhas em amarelo nível baixo.

#### 4.2.1 - Comando de Abertura do DJ1

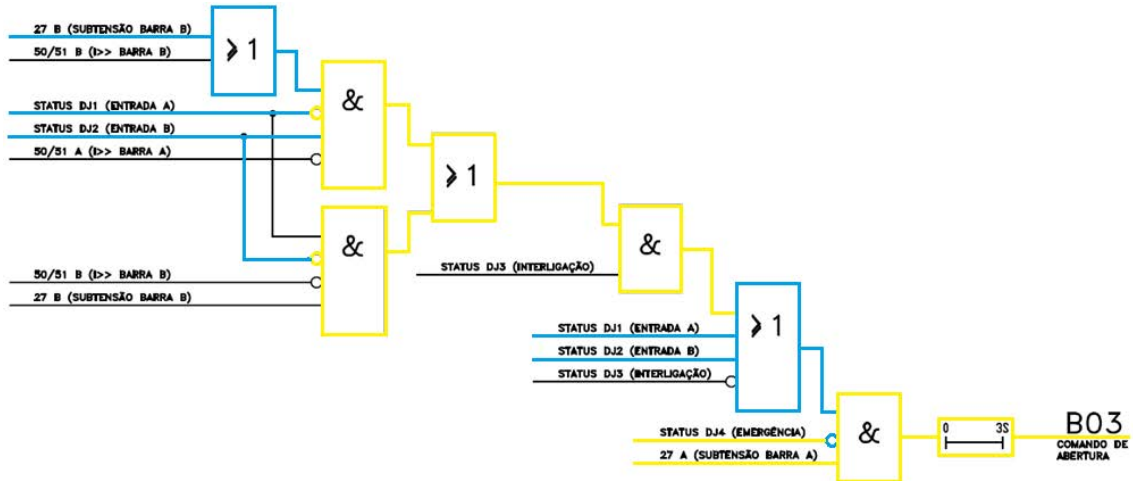


Figura 4.10: Lógica de abertura do DJ1 inativa.

#### 4.2.2 - Comando de Fechamento do DJ1

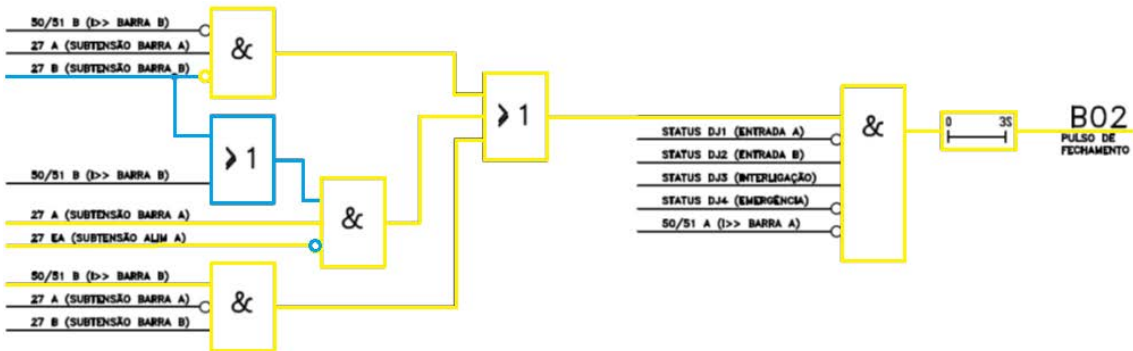


Figura 4.11: Lógica de fechamento do DJ1 inativa.

### 4.2.3 - Comando de Abertura do DJ2

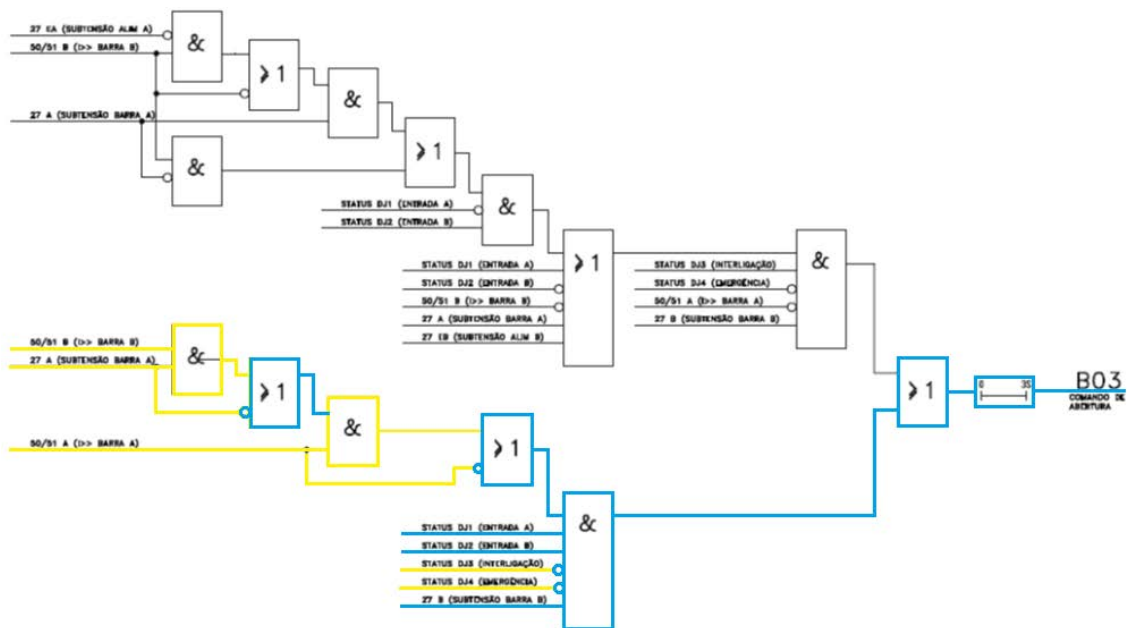


Figura 4.12: Lógica de abertura do DJ2 ativa.

### 4.2.4 - Comando de Fechamento do DJ2

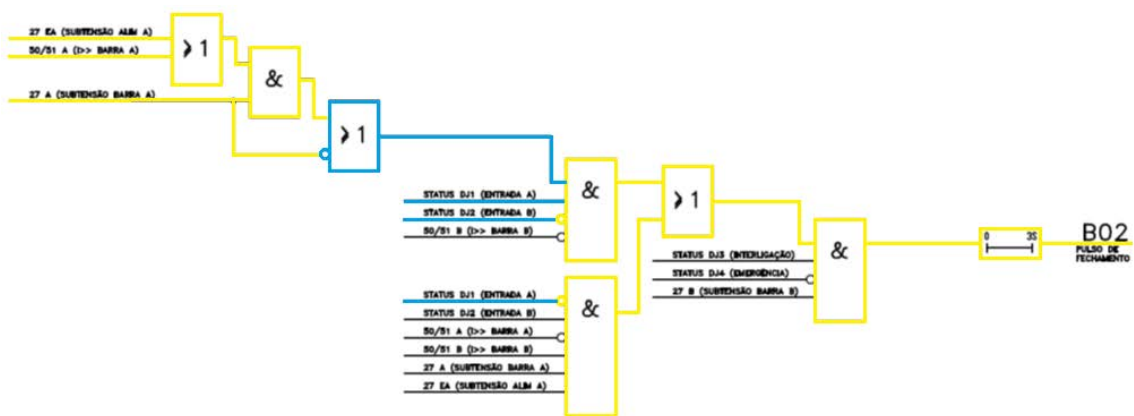


Figura 4.13: Lógica de fechamento do DJ2 inativa.

#### 4.2.5 - Comando de Abertura do DJ3

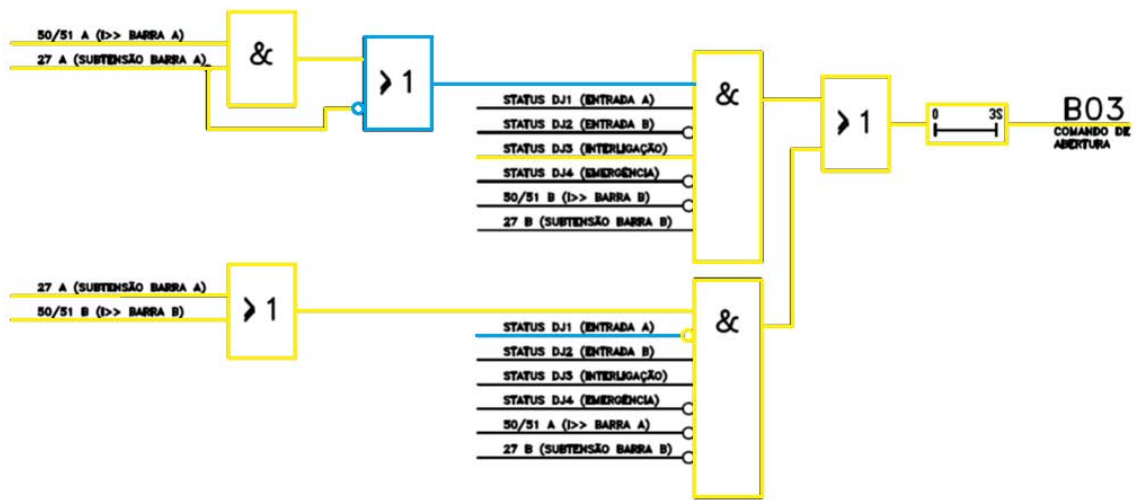


Figura 4.14: Lógica de abertura do DJ3 inativa.

#### 4.2.6 - Comando de Fechamento DJ3

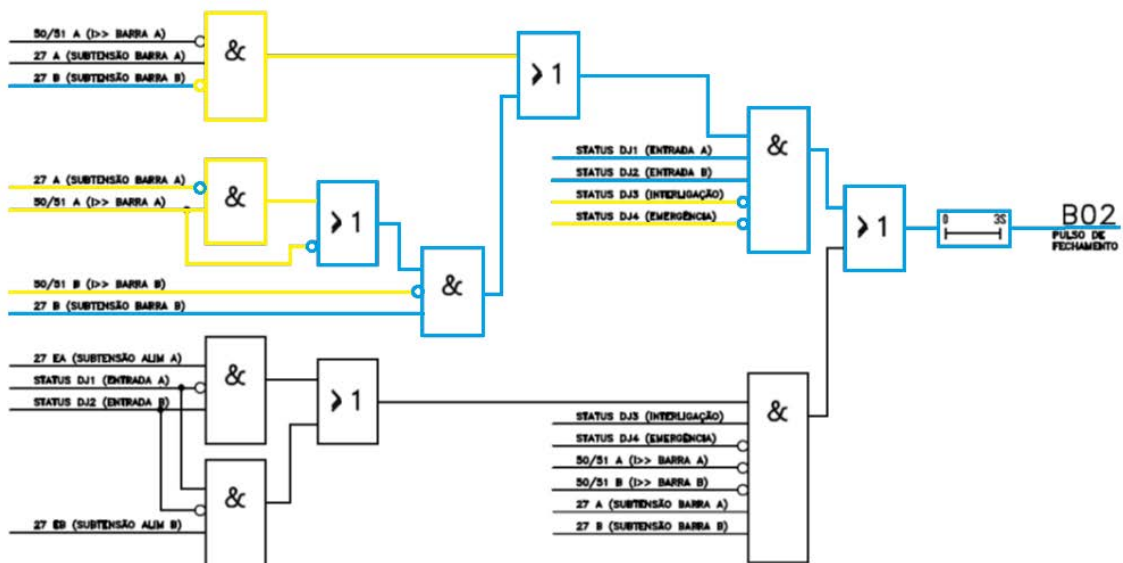


Figura 4.15: Lógica de fechamento do DJ3 ativa.

#### 4.2.7 - Comando de Fechamento DJ4

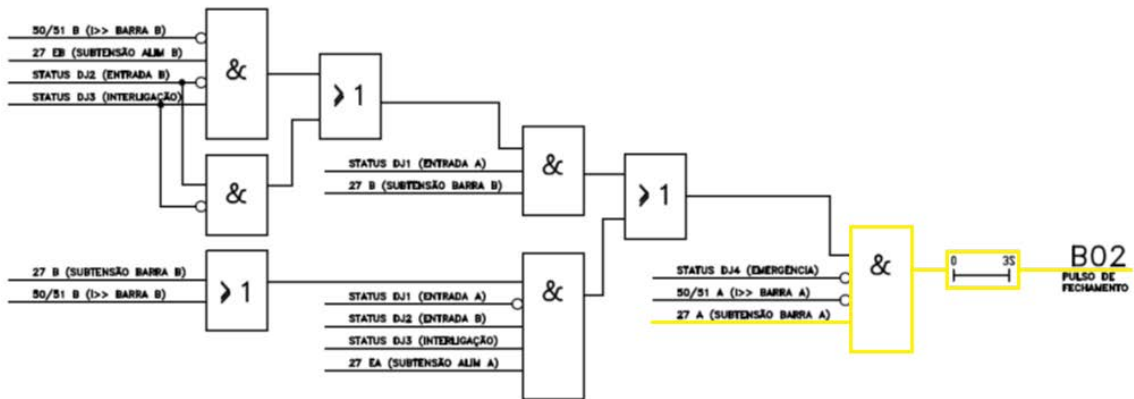


Figura 4.16: Lógica de fechamento do DJ4 inativa.

Assim como o teste anterior, este também respondeu de acordo com o esperado, abrindo o disjuntor da entrada B e fechando o de interligação como mostram as Figuras 4.10 a 4.16.

#### 4.3 - TERCEIRO TESTE: ATUAÇÃO DO RELÉ DIFERENCIAL RL2

Considera-se que no momento anterior a falta os disjuntores de entrada das barras A e B estavam fechados (DJ1 = 1 e DJ2 = 1) e os disjuntores de interligação e da entrada de emergência estavam abertos (DJ3 = 0 e DJ4 = 0). No momento da falta o relé diferencial atuou (RL2 = 1) causando subtensão na barra A (RL5 = 1), conforme a Figura 4.17.

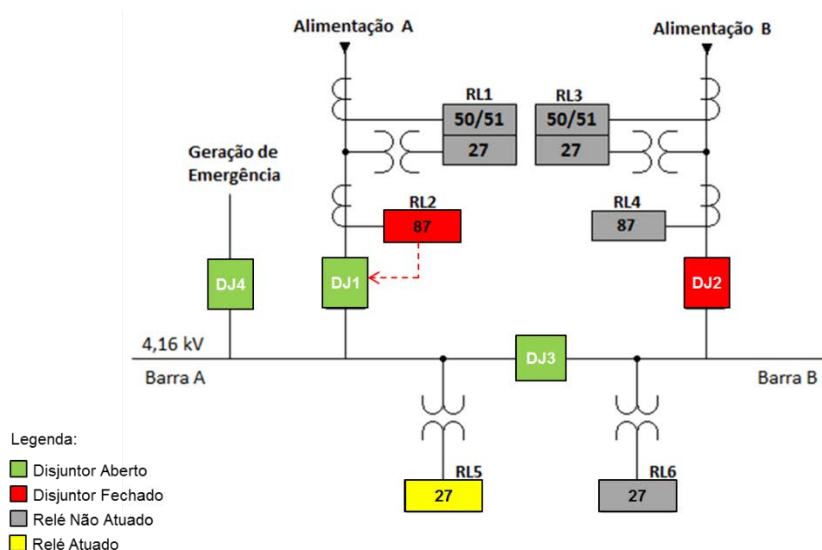


Figura 4.17: Atuação do relé diferencial RL2.

Para reestabelecimento da energia deve-se abrir o disjuntor da entrada A (DJ1) e fechar o disjuntor de interligação (DJ3). As linhas em azul representam nível lógico alto e as linhas em amarelo nível baixo.

#### 4.3.1 - Comando de Abertura do DJ1

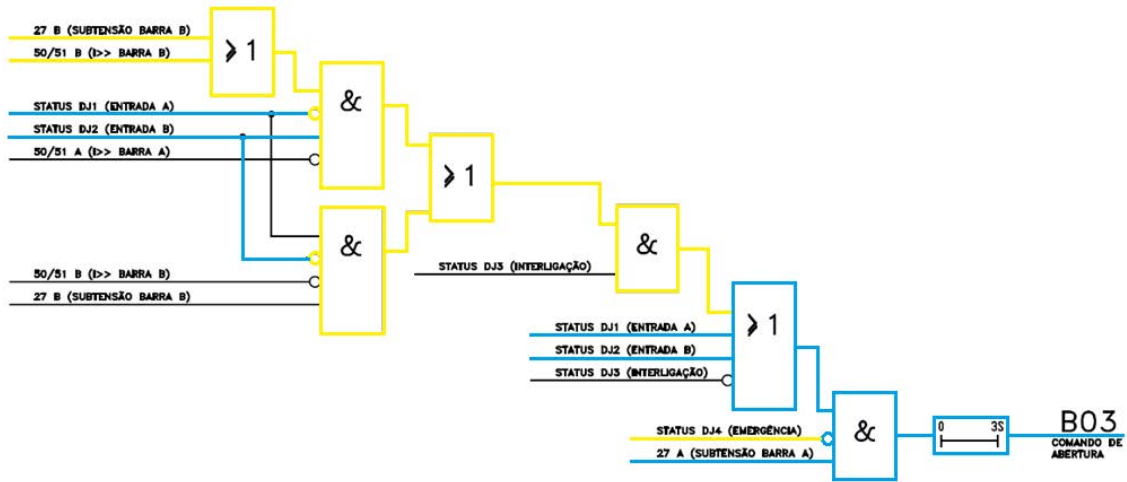


Figura 4.18: Lógica de abertura do DJ1 ativa.

#### 4.3.2 - Comando de Fechamento do DJ1

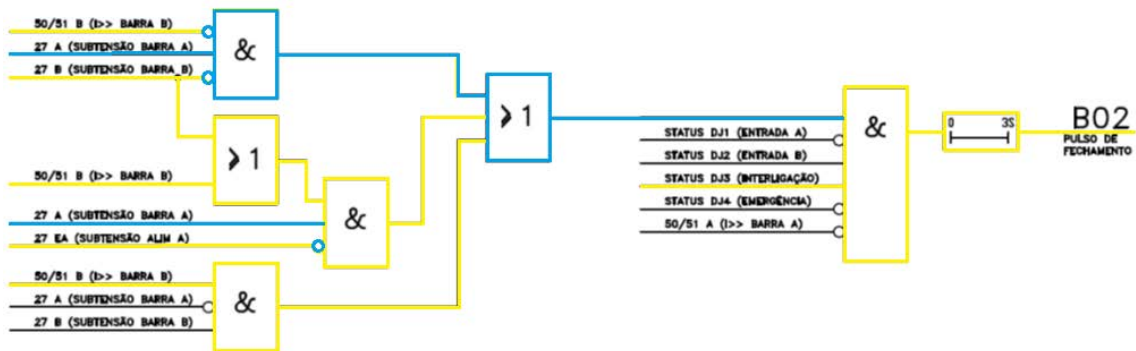


Figura 4.19: Lógica de fechamento do DJ1 inativa.



### 4.3.3 - Comando de Abertura do DJ2

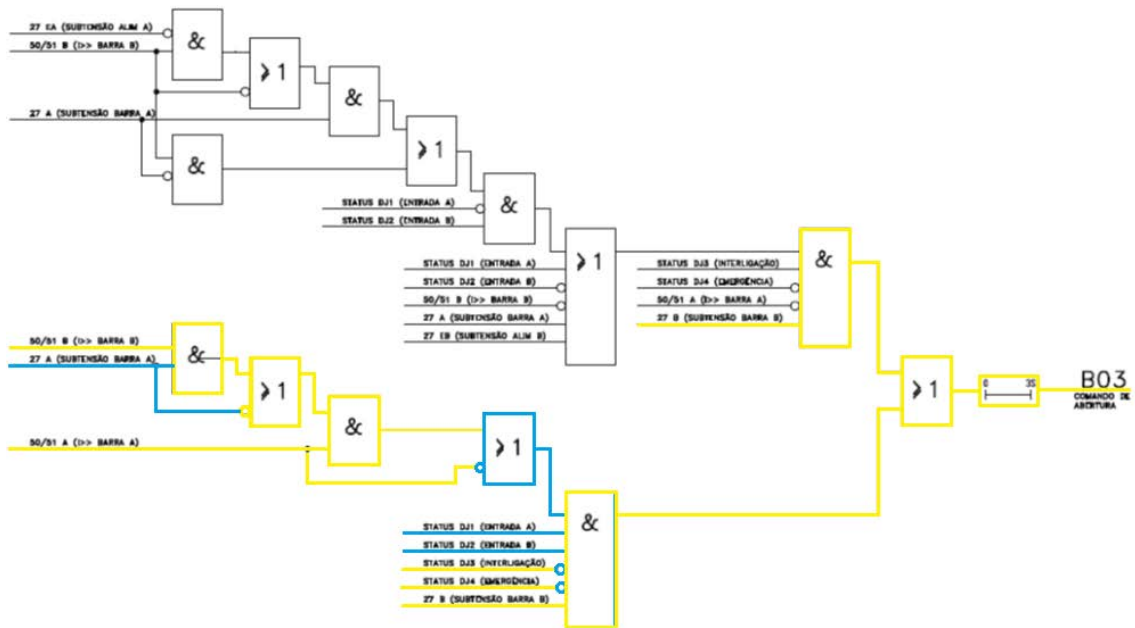


Figura 4.20: Lógica de abertura do DJ2 inativa.

### 4.3.4 - Comando de Fechamento do DJ2

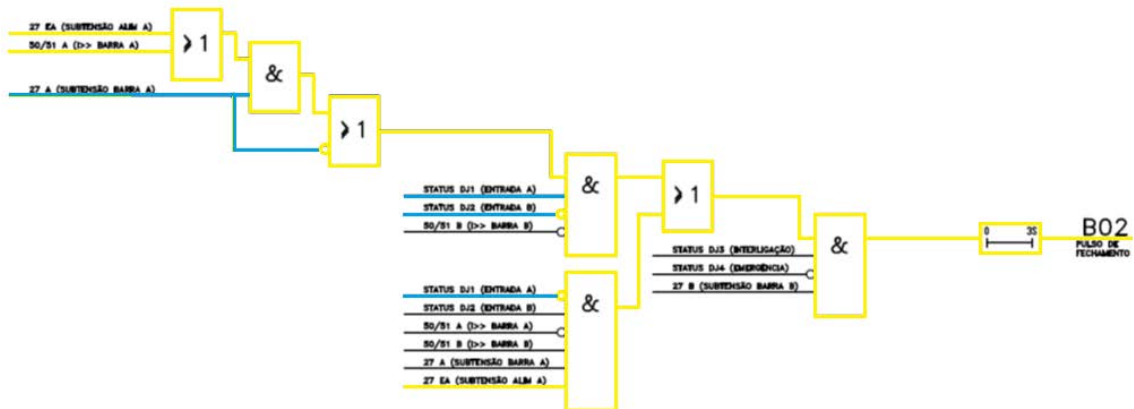


Figura 4.21: Lógica de fechamento do DJ2 inativa.

### 4.3.5 - Comando de Abertura do DJ3

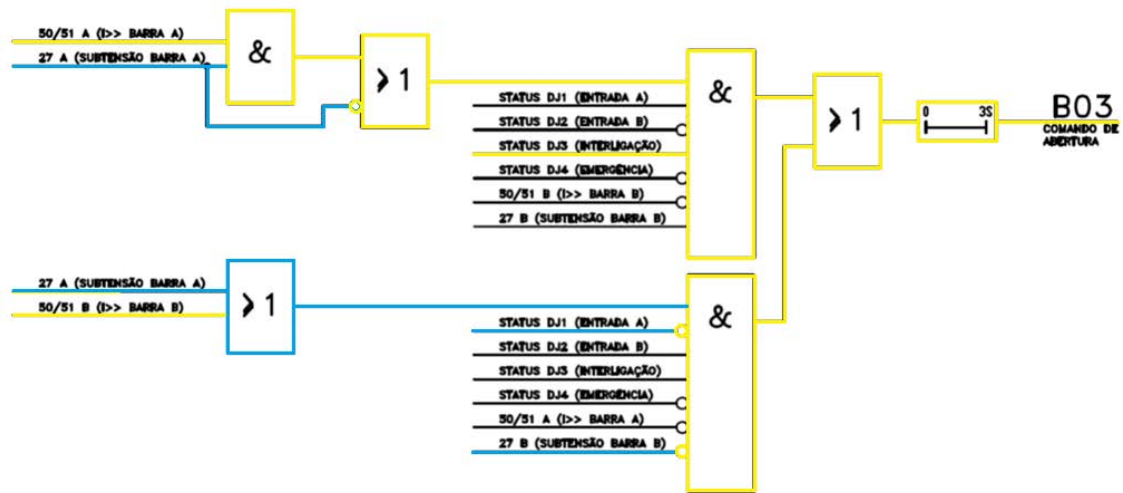


Figura 4.22: Lógica de abertura do DJ3 inativa.

### 4.3.6 - Comando de Fechamento DJ3

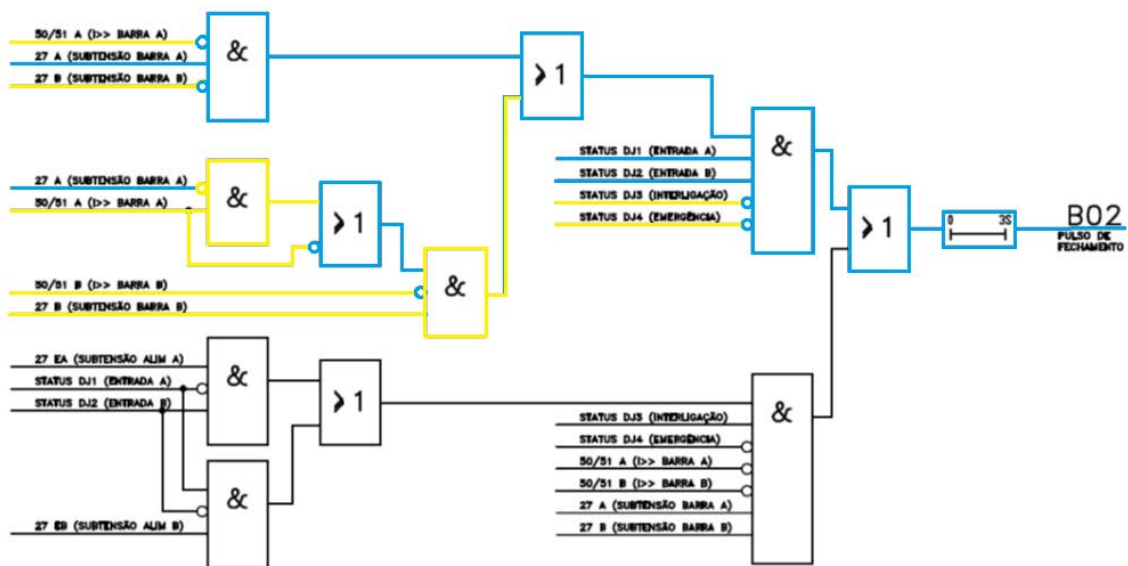


Figura 4.23: Lógica de fechamento do DJ3 ativa.

### 4.3.7 - Comando de Fechamento DJ4

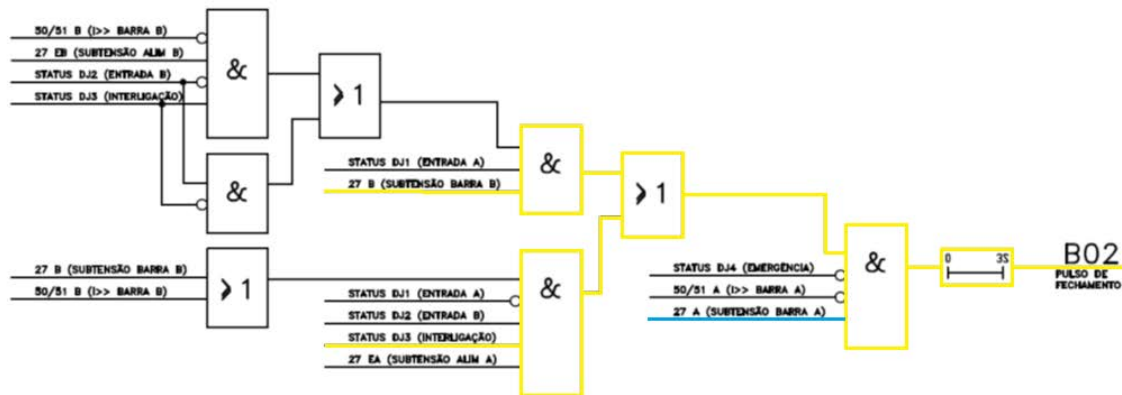


Figura 4.24: Lógica de fechamento do DJ4 inativa.

Assim como nos testes anteriores, este também respondeu de acordo com o esperado, abrindo o disjuntor da entrada A e fechando o de interligação como mostram as Figuras 4.18 a 4.24.

## 4.4 – CONCLUSÃO

Todos os testes realizados responderam de acordo com o esperado.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 - CONCLUSÕES

As lógicas desenvolvidas para automação das manobras nos CCM's da precipitação atuaram conforme o esperado, segundo os testes realizados, o que as valida para uma posterior implantação.

Avaliando os custos com recuperação de tanques da precipitação nos últimos anos, Figura 5.1, devido a problemas relacionados à falta de energia, é possível concluir que uma vez implantada a lógica para automatização das manobras nos CCM's da precipitação, essas perdas de precipitadores por falta de energia deixarão de ocorrer, o que eliminará à empresa um gasto médio, com recuperação de tanque, de R\$ 350.000,00 por tanque.

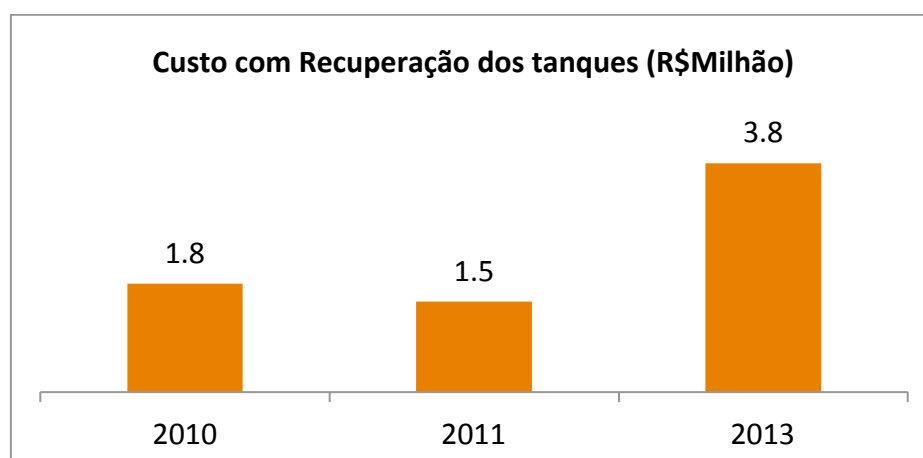


Figura 5.1: Histórico de custo com recuperação de tanques na precipitação.

Outros ganhos relacionados serão a eliminação do risco de erro humano durante as manobras, o que reduz o tempo de interrupção no fornecimento de energia para esses equipamentos, garantindo a disponibilidade de energia nos barramentos dos CCM's da precipitação em um tempo inferior a 2 minutos, o que resulta em maior disponibilidade operacional. Outro ponto relevante é a liberação da equipe de operação do sistema elétrico, que hoje disponibiliza um operador durante 24 horas, exclusivamente para operar o sistema da precipitação, para realizar outras atividades importantes como as

inspeções nas demais subestações, monitoramento e controle dos parâmetros elétricos da planta, etc.

## 5.2 – SUGESTÕES

As etapas a seguir são colocadas como sugestões para a continuação do trabalho desenvolvido:

- Implantar a lógica no controlador central da planta;
- Implantar nas telas de supervisão, comando para ativação e desativação do automatismo das manobras;
- Realizar testes de comissionamento simulando, *in loco*, as condições de operação para posterior liberação da lógica em tempo real.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BIGNELL, J. W., DONOVAN, R., Eletrônica Digital. 1ª Ed., Brasil, Novo acordo ortográfico, 2010.
- [2] CAPUANO, F. G., IDOETA, I. V., Elementos de Eletrônica Digital – Princípios e Aplicações. 35ª Ed., Brasil, Érica, 2003.
- [3] HYDRO Alunorte. Comunicado de força maior devido à queda de energia na Alunorte. 2013. Disponível em: <<http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Imprensa/Noticias/Hydro-emite-comunicado-de-forca-maior-devido-a-queda-de-energia-na-Alunorte-/>>. Acesso em Maio de 2015.
- [4] HYDRO Alunorte. Informe de ocorrência de falta de energia 002/14. Barcarena, Brasil, 2014.
- [5] HYDRO Alunorte. Informe de ocorrência de falta de energia 021/14. Barcarena, Brasil, 2014.
- [6] HYDRO Alunorte. Etapas do Processo Bayer. Barcarena, Brasil, 2015.
- [7] IEEE. Standard electrical power system device function numbers. USA, 1991.
- [8] KINDERMANN. G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 3ª Ed., Brasil, 2012.
- [9] ROBBA. E. J. Introdução a Sistemas Elétricos de Potência. 2ª Ed.. Brasil. Edgard Blucher, 2000.
- [10] SCHNEIDER. Manual do Usuário Disjuntor Evolis. 3ª Ed. Brasil, 2013.
- [11] SCHNEIDER. Manual do Usuário Painel de Média Tensão Evotech. 3ª Ed. Brasil, 2013.

- [12] SIEMENS. Relé de Proteção Multifuncional SIPROTEC. 4ª Ed. Brasil, 2002.
- [13] SILVEIRA. J. L. S. Energia: no melhor dos cenários, 2015 terá muitos sustos e alguns apaguinhos. Disponível em: <<http://www.edicaoms.com.br/brasil/energia-no-melhor-dos-cenarios-2015-tera-muitos-sustos-e-alguns-apaguinhos>>. Acesso em: 11/05/2015.
- [14] TOTTI. R. J. WÍDIMER. N. S. Sistemas Digitais – Princípios e Aplicações. 8ª Ed. Brasil, Pearson, 2003.