

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

**MODELAGEM DE FUNÇÕES DE UMA SUBESTAÇÃO
UTILIZANDO CONTROLE SUPERVISÓRIO**

CLAUDECI FONSECA MEDEIROS

ITAJUBÁ
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

CLAUDECI FONSECA MEDEIROS

**MODELAGEM DE OPERAÇÕES DE UMA SUBESTAÇÃO
UTILIZANDO CONTROLE SUPERVISÓRIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciência em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Sousa Bastos

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Edival de Souza

ITAJUBÁ-MG

2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo seu amor incondicional e por ter permitido chegar até aqui.

Aos meus familiares que me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador e amigo, Guilherme Sousa Bastos, que sempre me deu sua ajuda e incentivo nos momentos que precisei e isso foi fundamental neste trabalho.

Aos meus pais por tudo que fizeram por mim.

Aos meus lindos filhos, Miguel e Alice, que fazem minha vida mais feliz a cada dia. Amo muito vocês!

E o agradecimento especial é para minha esposa, Elba, que sempre me incentivou em todos os momentos, sempre ao meu lado disposta a enfrentar tudo o que vier e sempre disponível a ajudar. Meu amor esta conquista é sua também! Te amo muito! Você é um presente de Deus na minha vida!

RESUMO

Hoje há cada vez mais competitividade em todas as áreas das indústrias, por isso é necessário que o sistema produtivo das fábricas seja eficaz para obter uma boa relação entre custo x benefício, fazendo com que o negócio do setor produtivo tenha lucro. Como os sistemas de automação são cada dia mais complexos, é necessário que se tenha uma ferramenta de apoio no intuito de evitar erros na implementação e que não leve em consideração apenas a interpretação de um memorial descritivo pelo desenvolvedor para colocar em operação os sistemas automatizados das fábricas. A Teoria de Controle Supervisório (TCS) para controle de sistemas a eventos discretos fornece um método para a síntese da lógica de controle de sistemas automatizados e faz com que os problemas de controle sejam solucionados, permitindo que se tenha uma solução minimamente restritiva e não bloqueante e que atenda grande parte ou totalmente às especificações de controle. O desenvolvimento deste trabalho propõe apresentar uma metodologia de implementação de controle supervisório para modelar algumas operações de uma subestação de energia, e a partir desse modelo, ser implementada em outras linguagens de programação para atender às diversas subestações existentes. Com o modelo de subestação adotado foram desenvolvidas modelagens de funções que são comuns a quase todas as subestações para que o mesmo fosse amplamente aproveitado no que diz respeito à visualização gráfica da especificação de controle.

Palavras-Chave: Subestações, Modelagem, Sistemas a eventos discretos, Controle Supervisório

ABSTRACT

Today there are more competitiveness in all areas of industry, so it is necessary that the production system of the plants to be effective for a good relationship between cost-effective, making the business of the productive sector has profit. As automation systems are increasingly complex, it is necessary to have a support tool in order to avoid errors in implementation and that does not take into account only the interpretation of a specification by the developer to put into operation the automated systems of plants. The Supervisory Control Theory (TCS) control systems for discrete event provides a method for automated synthesis of system control logic and causes the control problems are solved, allowing to have a minimal restrictive solution nonblocking and meets largely or wholly to control specifications. The development of this work proposes to present a supervisory control implementation methodology to model some operations of a power substation, and from that model be implemented in other programming languages to meet various existing substations. With the model adopted substation were developed modeling functions that are common to almost all substations so that it was widely taken advantage of with respect to the graphic display control specification.

Keywords: Substations, modeling, discrete event systems, Supervisory Control

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Modelagem monolítica.....	26
Tabela 2.2 - Modelagem modular local.....	29
Tabela 4.1 - Plantas Locais	55
Tabela 4.2 - Subsistemas	55
Tabela 4.3 - Especificações	55
Tabela 4.4 – Linguagens alvo.....	56
Tabela 4.5 - Supervisores Locais	56
Tabela 4.6 – Supervisores reduzidos	56
Tabela 4.7 – Eventos da operação de inverter o fluxo sem interrupção de energia	92
Tabela 4.8 – Estados da operação de inverter o fluxo sem interrupção de energia.....	92
Tabela 4.9 - Eventos da operação de inverter o fluxo com interrupção de energia	96
Tabela 4.10 – Estados da operação de inverter o fluxo com interrupção de energia	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Evolução temporal do estado de um SED.....	16
Figura 2.2 – Exemplo de autômato.....	18
Figura 2.3 - Autômato com estado não-coacessível e não-acessível	19
Figura 2.4 - Autômato $G1$	20
Figura 2.5 - Autômato $G2$	20
Figura 2.6 - Composição síncrona autômato $G1//G2$	20
Figura 2.7 - Autômato $G3$	21
Figura 2.8 - Autômato $G4$	21
Figura 2.9 - Composição síncrona autômato $G1//G2$	21
Figura 2.10 - SED em malha fechada	24
Figura 2.11 - Representação do controle modular local	25
Figura 2.12 - Autômato $G5$	27
Figura 2.13 - Autômato $G6$	27
Figura 2.14 - Autômato $G7$	27
Figura 2.15 - Autômato da planta G	27
Figura 2.16 - Autômato que contém a restrição da planta G	28
Figura 2.17 - Supervisor global	28
Figura 2.18 - Supervisor reduzido	28
Figura 2.19 - Autômato $G9$	29
Figura 2.20 - Autômato $G10$	29
Figura 2.21 - Autômato da planta $G9//G10$	29
Figura 2.22 - Restrição de comportamento da planta $G9//G10$	29
Figura 2.23 - Supervisor local $Sup1$	30
Figura 2.24 - Supervisor Reduzido de $Sup1$	30
Figura 2.25 - Autômato $G11$	30
Figura 2.26 - Autômato $G12$	30
Figura 2.27 - Autômato da planta $G11//G12$	31
Figura 2.28 - Restrição de comportamento da planta $G11//G12$	31
Figura 2.29 - Supervisor local $Sup2$	31
Figura 2.30 - Supervisor reduzido de $Sup2$	32
Figura 3.1 - Subestação de energia elétrica	34

Figura 3.2 - Disjuntor	37
Figura 3.3 - Religador automático.....	39
Figura 3.4 - Transformador de potência de grande porte.....	40
Figura 3.5 - Relé de proteção.....	40
Figura 3.6 - Barramento Simples	42
Figura 3.7 - Duplo Barramento Simples	43
Figura 3.8 - Barramento simples seccionado	44
Figura 3.9 - Barramento principal e de transferência	45
Figura 3.10 - Barramento duplo com disjuntor	46
Figura 3.11 - Barramento duplo com disjuntor duplo	47
Figura 3.12 - Barramento de disjuntor e meio.....	48
Figura 3.13 - Barramento em anel.....	49
Figura 3.14 – Diagrama da subestação 34.5kV / 13.8kV.....	51
Figura 4.1- Diagrama unifilar do circuito de 34.5kV	53
Figura 4.2 – Religador Automático RA 52-09	53
Figura 4.3 - Células de controle.....	57
Figura 4.4 – Autômato G1	58
Figura 4.5 - Autômato G2.....	59
Figura 4.6 - Planta GA.....	59
Figura 4.7 - Especificação de restrição E1.....	60
Figura 4.8 – Autômato $K1 = G1 E1$	61
Figura 4.9 – Supervisor Sup1	62
Figura 4.10 - Supervisor reduzido de Sup1	62
Figura 4.11 - Autômato G2	63
Figura 4.12 - Autômato G3	64
Figura 4.13 - Autômato G4	64
Figura 4.14 – Autômato planta GB	65
Figura 4.15 - Especificação de restrição E2.....	65
Figura 4.16 – Supervisor Sup2	66
Figura 4.17 - Supervisor reduzido de Sup2	67
Figura 4.18 - Autômato G3	68
Figura 4.19 - Autômato G5	68
Figura 4.20 - Planta GC	68
Figura 4.21 - Especificação de restrição E3.....	69

Figura 4.22 – Autômato $K3 = GC E3$	69
Figura 4.23 – Supervisor Sup3	70
Figura 4.24 - Supervisor reduzido SR3	71
Figura 4.25 – Autômato G3.....	72
Figura 4.26 - Autômato G6	72
Figura 4.27- Autômato da Planta GD	72
Figura 4.28 - Especificação de restrição E4.....	73
Figura 4.29 - Autômato $K=GD E4$	73
Figura 4.30 - Supervisor Sup4	74
Figura 4.31 – Supervisor Reduzido de SR4.....	75
Figura 4.32 – Barramento da subestação sendo alimentado com o fluxo de energia da.....	76
Figura 4.33 – Supervisor da modelagem de retirar regulador de tensão de operação	78
Figura 4.34 – Supervisor da modelagem de retirar de operação religador automático RA 52-09	79
Figura 4.35 – Supervisor da modelagem de manobrar chaves do barramento em anel da fonte A para a fonte B	80
Figura 4.36 – Supervisor da modelagem de colocar em operação o religador automático RA 52-09	81
Figura 4.37 - Supervisor da modelagem de colocar em operação o regulador de tensão 34.5kV.....	82
Figura 4.38 – Religador fonte bloqueado	83
Figura 4.39 – Regulador de tensão bloqueado	84
Figura 4.40 – Seccionadoras do regulador de tensão abertas	84
Figura 4.41 – RA 52-09 bloqueado e Religador fonte B alimentando o barramento	85
Figura 4.42 – Religador fonte A aberto.....	86
Figura 4.43 – Religador RA 52-09 fora de operação	86
Figura 4.44 – Seccionadoras do RA 52-09 abertas	87
Figura 4.45 – Chaves ch 29-01, ch 29-02, ch 29-03 e ch29-04 fechadas em paralelo	88
Figura 4.46 – chaves ch 29-02 e ch 29-03 abertas	88
Figura 4.47 – Religador RA 52-09 em operação	89
Figura 4.48 – Seccionadoras do regulador de tensão fechadas	90
Figura 4.49 – Regulador de Tensão em operação	91
Figura 4.50 – Operação de inversão de fluxo de A para B sem interrupção de energia	93
Figura 4.51 - Operação de inversão de fluxo de B para A sem interrupção de energia.....	95

Figura 4.52 - Operação de inversão de fluxo de A para B com interrupção de energia	98
Figura 4.53 - Operação de inversão de fluxo de B para A com interrupção de energia	100

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ – alfabeto de eventos
 Σ^* – linguagem composta por todas as possíveis sequências de eventos
 Σ_c – alfabeto de eventos controláveis
 Σ_u – alfabeto de eventos não controláveis
 L – linguagem
 L – prefixo fechamento de L
 ε – palavra de comprimento nulo
 s – cadeia de eventos
 (Q, Σ, f, q_0, Q_m) – quintupla que representa um autômato
 Q - é o conjunto de estados
 δ - função de transição de estados do autômato
 Q_0 - estado inicial
 Q_m - conjunto dos estados marcados
 $\delta(q, \sigma)$ – função de transição para o par q e σ
 G – autômato para a planta
 $L_m(G)$ – linguagem marcada por G
 $L(G)$ – linguagem gerada por G
 \parallel – operador de produto síncrono
 A_c – componente acessível
 S – Supervisor
 S/G – sistema controlado
 S_r – supervisores reduzidos
 E – Especificação de controle
 K – Linguagem alvo
 $C(K,G)$ – conjunto de sublinguagens de K que são controláveis em relação a G
 $\text{Sup}C(K,G)$ – suprema linguagem controlável

LISTA DE ABREVIATURAS

SC – Sistema de Controle

SEDs – Sistemas a Eventos Discretos

TCS – Teoria de Controle Supervisório

CLP – Controlador Lógico Programável

LD – *Ladder Diagram* (linguagem de programação de CLP)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO.....	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO	15
2.1	SISTEMA A EVENTOS DISCRETOS.....	15
2.2	LINGUAGENS E AUTÔMATOS	16
2.3	COMPOSIÇÃO SÍNCRONA	19
2.4	TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO	22
2.4.1	Modelagem da Planta	22
2.4.2	Especificações.....	22
2.4.3	Linguagem Alvo K.....	23
2.4.4	Síntese dos Supervisores	23
2.4.5	Abordagem monolítica	24
2.4.6	Abordagem modular local	25
2.4.7	Exemplo de modelagem com controle supervisório.....	26
2.4.8	Aplicações com controle supervisório	32
3	SUBESTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	33
3.1	DEFINIÇÃO DE SUBESTAÇÃO	33
3.2	CLASSIFICAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS.....	34
3.2.1	Classificação em relação ao tipo de instalação	34
3.2.2	Classificação em relação a forma de operação de uma subestação.....	35
3.3	EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO	36
3.3.1	DISJUNTORES.....	36
3.3.2	RELIGADOR	38
3.3.3	TRANSFORMADOR.....	39
3.3.4	RELÉS.....	40
3.3.5	REGULADORES DE TENSÃO.....	41
3.3.6	BARRAMENTOS	41
3.3.7	UNIFILAR DE UMA SUBESTAÇÃO	50
4	SUBESTAÇÃO MODELADA	52
4.1	MODELAGEM DA FUNÇÃO DE RETIRAR O RELIGADOR AUTOMÁTICO RA 52-09 DE OPERAÇÃO.....	58
4.1.1	Modelagem da função de fechar a chave de by-pass ch 29-11.....	58
4.1.2	Modelagem da função de abrir o religador automático RA 52-09.....	63

4.1.3	Modelagem da função de abrir a chave de saída ch 29-10	67
4.1.4	Modelagem da função de abrir a chave de entrada ch 29-08	71
4.2	MODELAGEM DA OPERAÇÃO INVERSÃO DE FLUXO SEM INTERRUPÇÃO NO FORNECIMENTO DE ENERGIA, DA FONTE A PARA A FONTE B.	75
4.2.1	Modelagem da função de retirar de operação o regulador de tensão de 34,5 kV sem interrupção de energia.	77
4.2.2	Modelagem da função de retirar o religador automático RA 52-09 de operação sem interrupção de energia.	78
4.2.3	Modelagem da função de manobrar chaves do barramento em anel da fonte A para a fonte B	79
4.2.4	Modelagem da função de colocar em operação o religador automático RA 52-09 sem interrupção de energia.....	80
4.2.5	Modelagem da função de colocar em operação o regulador de tensão de 34,5 kV sem interrupção de energia.	81
4.2.6	Sequência de operação para modelagem de inversão de fluxo sem interrupção de energia da fonte A para a fonte B.....	82
4.2.7	Autômato da modelagem de inverter o fluxo sem interrupção de energia da fonte A para fonte B	91
4.3	INVERSÃO DE FLUXO SEM INTERRUPÇÃO NO FORNECIMENTO DE ENERGIA, DA FONTE B PARA A FONTE A	93
4.4	INVERSÃO DE FLUXO COM INTERRUPÇÃO NO FORNECIMENTO DE ENERGIA, DA FONTE A PARA A FONTE B	95
4.5	INVERSÃO DE FLUXO COM INTERRUPÇÃO NO FORNECIMENTO DE ENERGIA, DA FONTE B PARA A FONTE A	98
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	APÊNDICE I	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A indústria nos últimos anos se desenvolve de forma acelerada, impulsionada pela competitividade e pelo grande desenvolvimento das tecnologias. Há uma necessidade de otimização de recursos para redução de custos de produção/operação e isso precisa ser feito de forma segura e confiável, pois em qualquer linha produtiva, a ausência de uma coordenação lógica otimizada, pode ocasionar desvios na operação do conjunto, levando a situações não previstas na especificação de projeto, bloqueando por completo o processo.

Uma das maneiras de se conseguir isto consiste em automatizar processos ou simplesmente aperfeiçoar sistemas já automatizados. Essa otimização demanda a utilização de ferramentas específicas, capazes de projetarem sistemas de controle.

Para a instalação de um processo produtivo onde se deve obter um modelo com o intuito de representar o objetivo de controle, pode-se conseguir modelos gráficos de processos de manufatura ou outros processos automatizados.

Este trabalho consiste em estudar a implementação através da Teoria de Controle Supervisório (TCS), (RAMADGE; WONHAM, 1989), as operações de uma subestação de energia elétrica onde se deseja modelar dentre uma sequência de passos, os de colocar e retirar de operação seus principais equipamentos.

A pesquisa bibliográfica mostrou que não há trabalhos relacionados à modelagem de operações subestações utilizando a TCS e o motivo de modelar operações de subestação esta no fato de que cada vez mais é necessário buscar soluções que tornem suas operações mais seguras evitando desligamentos contínuos.

A sequência de passos de operação de uma subestação utilizando controle supervisório permite uma visualização gráfica atraente e de fácil interpretação pelo programador/projetista.

Neste trabalho serão utilizadas duas abordagens: a abordagem modular local que explora a modularidade da planta e das especificações de forma a sintetizar um conjunto de supervisores locais e a abordagem monolítica onde apenas um supervisor é sintetizado a fim de controlar a planta (CURY, 2001).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um modelo de implementação de controle supervísório para as principais operações de uma subestação de 34,5/13,8 kV (MIT160808, 2010). As operações de qualquer subestação são sequenciais e executam funções pré-definidas no intuito de torna-la cada vez mais seguras.

Esta modelagem com o controle supervísório se propõe a buscar um sequenciamento para operações da subestação (MIT160808, 2010) e apresentar de forma gráfica através de autômatos respeitando os intertravamento das operações da subestação para evitar conflitos e desligamentos indesejados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma: no capítulo 2 serão abordados os SED's Sistemas a Eventos Discretos que segundo (CURY, 2001), SED é um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência abrupta de eventos físicos, em intervalos de tempo, em geral, irregulares e desconhecidos e também será abordada a Teoria de Controle Supervísório (TCS) que foi introduzida por (RAMADGE; WONHAM, 1989). Para o controle de sistemas a eventos discretos, nesta abordagem, a modelagem do sistema é feita utilizando linguagens formais e autômatos.

No capítulo 3 são apresentados os principais equipamentos de uma subestação de energia elétrica, bem como suas características e funções que tem o papel de disponibilizar energia aos consumidores finais como casas, comércios, indústrias, entre outros.

No capítulo 4 serão apresentadas algumas características da subestação adotada para este trabalho de dissertação, assim como as modelagens de funções da subestação através da aplicação da teoria do controle supervísório introduzida por (RAMADGE; WONHAM, 1989) e por fim o capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e os trabalhos futuros.

2 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

Neste capítulo serão apresentados os Sistemas a Eventos Discretos (*SEDs*), com suas representações por linguagens e autômatos. Será apresentada também a Teoria de Controle Supervisório (*TCS*) para o desenvolvimento de sistemas de controle a eventos discretos.

2.1 SISTEMA A EVENTOS DISCRETOS

Segundo (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 1999), um Sistema a Eventos Discretos (*SED*) é um sistema de estados discretos, dirigido a eventos, isto é, sua evolução de estado depende da ocorrência de eventos discretos assíncronos no tempo. Segundo (CURY, 2001), *SED* é um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência abrupta de eventos físicos, em intervalos de tempo, em geral, irregulares e desconhecidos.

Eventos são estímulos sem duração de tempo que afetam o comportamento de um sistema. Um evento pode ser a chegada de um cliente em uma fila ou a saída de um produto do armazém, etc. (ALMEIDA, 2012).

A ocorrência de um evento pode causar então uma transição ou mudança de estado no sistema, de forma que sua evolução no tempo pode ser representada pela trajetória percorrida no seu espaço de estados (CURY, 2001). O comportamento de um *SED* pode ser representado por linguagens, autômatos, Redes de Petri, Cadeias de Markov e Teoria das Filas, dentre outros (ALMEIDA, 2012). Neste trabalho será apresentado o comportamento de um *SED* representado por linguagens e autômatos.

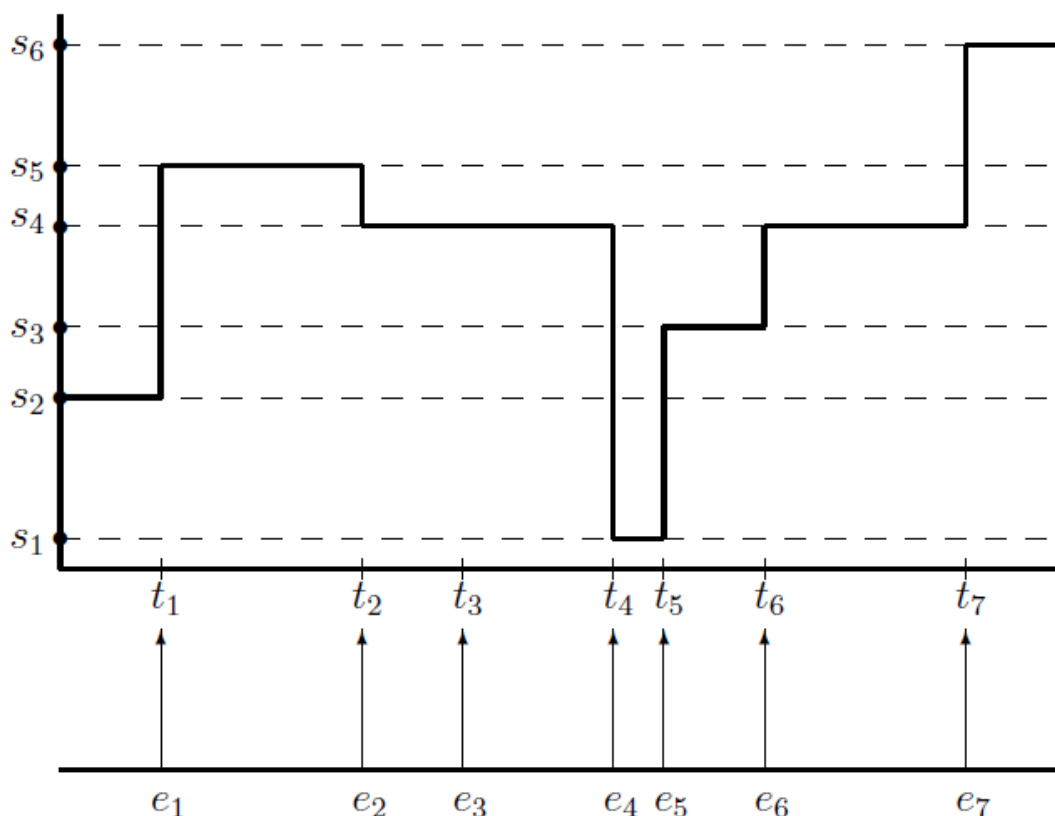


Figura 2.1- Evolução temporal do estado de um SED
 Fonte: (CASSANDRAS; LAFORTUNE 1999).

2.2 LINGUAGENS E AUTÔMATOS

Linguagens

A linguagem é a maneira formal de representar os *SEDs*, e especifica todas as sequências possíveis de eventos que um *SED* pode processar, sem a necessidade de qualquer estrutura adicional.

Uma linguagem L , definida a partir de um conjunto de eventos S , é um conjunto de cadeias de tamanhos finitos formadas a partir dos elementos (eventos).

Considerando o conjunto de eventos $S = \{a, b, g\}$, as seguintes linguagens podem ser definidas:

- $L1 = \{e, a, abb\}$; ou
- $L2 = \{\text{todas as possíveis cadeias de comprimento 3}\}$; ou
- $L3 = \{\text{todas as possíveis cadeias de comprimento finito que comecem com o}$

evento a }.

onde ϵ é a cadeia vazia que não é composta por nenhum evento. O conjunto de todas as cadeias possíveis formadas por elementos do conjunto S , inclusive a cadeia vazia ϵ , é chamado de fechamento Kleene, e é representado por Σ^* , e qualquer linguagem sobre Σ é um subconjunto de Σ^* .

Sendo uma linguagem um conjunto, portanto todas as operações de conjunto como união, interseção, diferença e complemento são aplicáveis. Adicionalmente, as seguintes propriedades podem ser definidas:

Concatenação: é uma das principais operações na formação de cadeias, e consequentemente, de linguagens. A cadeia abb por exemplo, é a concatenação da cadeia ab com o evento b .

Em um determinado sistema S , onde Σ representa o conjunto de todos os eventos possíveis em S , $L \subseteq \Sigma^*$ representa o conjunto de todas as cadeias de eventos possíveis de ocorrerem, linguagem gerada. $L_m \subseteq L$ é a chamada linguagem marcada, que representa o conjunto das cadeias em L que correspondem a tarefas completas executadas pelo sistema. Dessa maneira, o comportamento do sistema S pode ser completamente descrito por um par (L, L_m) , e as seguintes propriedades são válidas:

- $L \supset L_m$, a linguagem marcada está contida na linguagem gerada pelo sistema;
- $L = L$, a linguagem gerada por S é prefixo-fechada (KAWAMURA, 2012).

Autômatos

Um autômato é uma representação gráfica de uma linguagem e isso ocorre por regras definidas. É formado por estados, que são ligados uns aos outros por arcos, que representam os eventos. O conjunto de estados é representado por $X = \{0, 1, 2, 3\}$ e os arcos representam as funções de transição entre esses estados $f : X \times \Sigma \rightarrow X$

A função de transição para o autômato da figura 2.2 é apresentada a seguir.

$$f(0, a) = 3, f(0, b) = 3, f(1, b) = 3, f(2, c) = 2, f(2, a) = 1, f(2, b) = 0$$

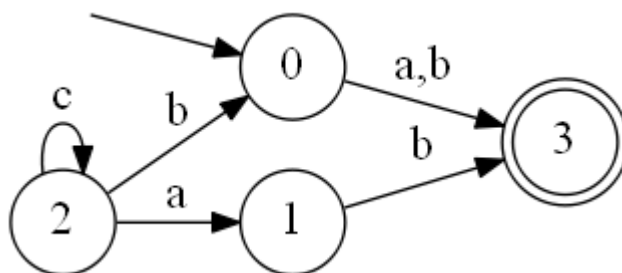


Figura 2.2 – Exemplo de autômato

A notação $f(0, a) = 3$ significa que, se o autômato estiver no estado 0, e ocorrer o evento a, instantaneamente ocorre uma transição para o estado 3.

Na figura 2.2 observa-se o conjunto de eventos $\Sigma = \{a, b, c\}$ e o conjunto de estados $X = \{0, 1, 2, 3\}$ o estado inicial é marcado por uma seta e o estado marcado, ou seja, estado final que representa uma tarefa completa é representado por um círculo duplo.

A um autômato são associadas duas linguagens, a linguagem gerada e a linguagem marcada. Um estado do autômato é acessível se a partir do estado inicial for possível alcançá-lo através de uma sequência de eventos. Um estado é co-acessível ou não bloqueante se a partir do mesmo é possível alcançar um estado marcado. Um autômato é acessível se todos os estados forem acessíveis e é co-acessível se todos os estados forem co-acessíveis. (CURY, 2001).

Segundo (SANTOS, 2008) dois autômatos podem ter funções de transições e quantidades de estados diferentes, mas serão equivalentes se suas linguagens geradas e marcadas forem iguais. Define-se a operação $Ac(G)$ como a eliminação de todos os estados não acessíveis de um autômato.

A operação $Trim(G)$ elimina todos os estados não-acessíveis e os não-coacessíveis, e o resultado é um autômato chamado aparado ou trim. Um autômato é bloqueante se possui pelo menos um estado não-coacessível. Se todos os estados do autômato forem co-acessíveis, então o autômato é não bloqueante. Para que o autômato seja não-bloqueante é necessário que $Lm(G) = L(G)$ (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 1999). Dois autômatos são ditos equivalentes se ambas suas linguagens geradas e marcadas forem iguais (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 1999).

O autômato da figura 2.3 é bloqueante, pois uma vez no estado 3, o mesmo não consegue alcançar nenhum estado marcado sendo esse estado, portanto, não-coacessível, já o estado 4 do autômato é não-acessível pois não há ocorrência de eventos em outros estados que façam com que o estado 4 seja alcançado.

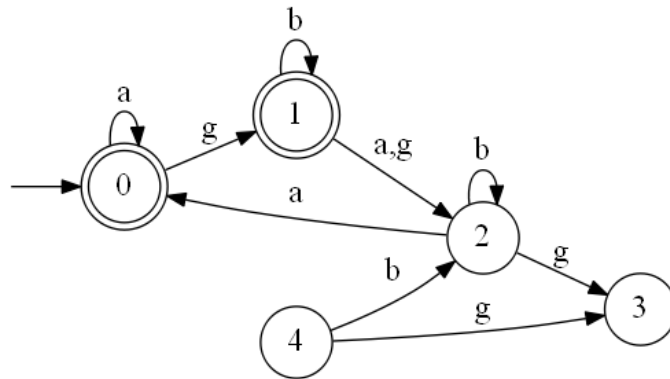


Figura 2.3 - Autômato com estado não-coacessível e não-acessível
Fonte: (SANTOS, 2008)

2.3 COMPOSIÇÃO SÍNCRONA

Uma operação que pode ser feita com os autômatos é a composição síncrona e esta operação é muito utilizada na TCS (RAMADGE; WONHAM, 1989).

A Planta G é uma notação para um autômato gerado pelos subsistemas que foram compostos, representando o comportamento do sistema sem qualquer ação de controle, onde todos os eventos ocorrem livremente.

A composição síncrona de dois autômatos $G1$ apresentado na figura 2.4 e $G2$ apresentado na figura 2.5 é representada pela composição síncrona de $G1 \parallel G2$ apresentado na figura 2.6 e consiste em sincronizar eventos em comum nestes autômatos, já as figuras 2.7 e 2.8 apresentam mais dois autômatos $G3$ e $G4$ que realizam uma composição síncrona com eventos comuns como apresenta a figura 2.9. Um evento comum só pode ser executado em sincronia nos dois autômatos, porém eventos diferentes podem ser executados independentemente (ALMEIDA, 2012).

Sendo os autômatos

$$G1 = (X1; \Sigma1; f1; x01; Xm1)$$

$$G2 = (X2; \Sigma2; f2; x02; Xm2)$$

$$G3 = (X3; \Sigma3; f3; x03; Xm3)$$

$$G4 = (X4; \Sigma4; f4; x04; Xm4)$$

$$G1 \parallel G2 = Ac (X1 \times X2, \Sigma1 \cup \Sigma2, f1 \parallel 2, (x01 ; x02), Xm1 \times Xm2)$$

$$G3||G4 = Ac (X3 \times X4, \Sigma3 \cup \Sigma4, f3||4, (x03 ; x04), Xm3 \times Xm4)$$

O Autômato $G1$ é composto por um conjunto de 02 estados sendo $X1=\{0,1\}$ e os eventos que são representados por $\Sigma1=\{x,y\}$. A função de transição para este autômato é dada por $f(0, x) = 1, f(1, y) = 0$

$G1$:

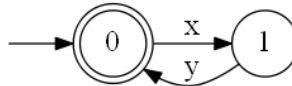


Figura 2.4 - Autômato $G1$

O Autômato $G2$ é composto por um conjunto de 02 estados sendo $X2=\{0,1\}$ e os eventos que são representados por $\Sigma2=\{z,w\}$. A função de transição para este autômato é dada por $f(0, z) = 1, f(1, w) = 0$

$G2$:

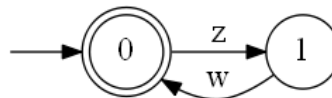


Figura 2.5 - Autômato $G2$

O Autômato $G1||G2$ é resultado da composição síncrona entre o autômato $G1$ e o autômato $G2$, o qual é composto por um conjunto de 04 estados, sendo $X=\{0,1,2,3\}$ e um conjunto de eventos representados por $\Sigma=\{x,y,z,w\}$. A função de transição para este autômato é dada por $f(0, x) = 1, f(1, y) = 0, f(1, z) = 3, f(3, w) = 1, f(3, y) = 2, f(2, x) = 3, f(2, w) = 0, f(0, z) = 2$

Composição síncrona $G1||G2$

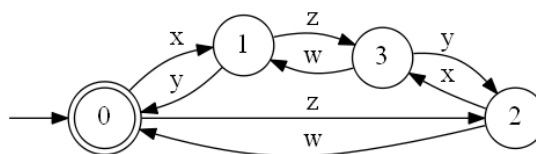


Figura 2.6 - Composição síncrona autômato $G1||G2$

O Autômato $G3$ é composto por um conjunto de 02 estados sendo $X3=\{0,1\}$ e os eventos que são representados por $\Sigma3=\{t,y\}$. A função de transição para este autômato é dada por $f(0, t) = 1, f(1, y) = 0$

$G3$:

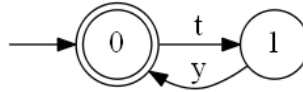


Figura 2.7 - Autômato $G3$

O Autômato $G4$ é composto por um conjunto de 02 estados sendo $X4=\{0,1\}$ e os eventos que são representados por $\Sigma4=\{x,y\}$. A função de transição para este autômato é dada por $f(0, x) = 1, f(1, y) = 0$

$G4$:

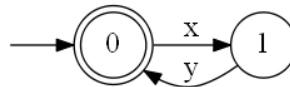


Figura 2.8 - Autômato $G4$

O Autômato $G3//G4$ é resultado da composição síncrona entre o autômato $G3$ e o autômato $G4$ e é composto por um conjunto de 04 estados sendo $X=\{0,1,2,3\}$ e também um conjunto de eventos que são representados por $\Sigma=\{x,y,z,w\}$. A função de transição para este autômato é dada por $f(0, t) = 2, f(0, x) = 1, f(1, t) = 3, f(2, x) = 3, f(3, y) = 0$

Composição síncrona $G3//G4$ com o evento y em comum.

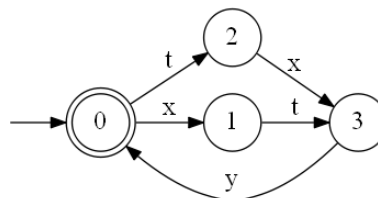


Figura 2.9 - Composição síncrona autômato $G1//G2$

2.4 TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

Nesta seção será apresentado a Teoria de Controle Supervisório (TCS) para SEDs apresentando suas formas de representação por linguagens e autômatos. Esta teoria foi desenvolvida inicialmente por (RAMADGE; WONHAM,1989). Este desenvolvimento baseia-se em (WONHAM, 2004), (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 1999), (CURY, 2001) e (ZILLER, 1993). Será apresentado também as etapas para o desenvolvimento de um sistema de controle segundo a TCS e duas formas de fazer o controle com o supervisor pela abordagem monolítica e a abordagem modular local.

Primeiramente são apresentados os passos para modelagem, a definição da especificação da restrição, a linguagem alvo e por fim a síntese dos supervisores.

Para implementar os autômatos bem como calcular a planta G , a linguagem alvo, o supervisor e o supervisor reduzido será utilizado o software GRAIL que é um ambiente de computação simbólica que envolve linguagens finitas, expressões regulares e máquinas de estados finitos. Foi desenvolvido sob o paradigma da orientação a objeto e implementado em C++ e aprimorado dentro do Departamento de Automação e Sistemas (DAS) da Universidade Federal de Santa Catarina. Caracteriza-se por sua modularidade, por sua facilidade de expansão e por se tratar de um ambiente de código aberto (REISER, 2005).

O apêndice I apresenta o passo a passo para implementação com este software.

2.4.1 Modelagem da Planta

Uma planta que é o resultado de uma composição síncrona entre dois ou mais autômatos, geralmente se refere a um conjunto de subsistemas independentes a fim de cumprir um determinado objetivo ainda não especificado, ou seja, é o comportamento do sistema sem nenhuma ação de controle, onde todos os eventos ocorrem livremente. A planta modela todos os comportamentos possíveis em malha aberta, inclusive os indesejáveis (TEIXEIRA, 2008)

2.4.2 Especificações

No intuito de restringir o comportamento da planta a fim de que a mesma não apresente comportamentos indesejados, são introduzidas as especificações de controle. Na

TCS estas especificações são modeladas por autômatos, sendo que para cada especificação é apresentado um modelo específico (ALMEIDA, 2012). Essas especificações limitam o funcionamento, evitando que estados indesejados sejam alcançados, para isto, é necessário a obtenção da linguagem $E \subset Lm(G)$ que restringe o comportamento do sistema a um comportamento que atenda aos objetivos de projeto.

2.4.3 Linguagem Alvo K

O comportamento desejado para a planta sob supervisão é chamado de linguagem alvo, denotado por K . Por simplicidade, neste trabalho utiliza-se a mesma notação tanto para a linguagem quanto para o autômato que marca esta linguagem, ou seja, denota-se por K o autômato que marca a linguagem alvo. Assim, K é obtido através da composição síncrona de $K = G // E$ isto é, $K = Trim$, o autômato possui acessibilidade e co-acessibilidade (ALMEIDA, 2012). Uma linguagem K é dita ser controlável em relação a G se $K\Sigma \cap L \subseteq K$, ou seja, mesmo com a ocorrência de um evento não controlável no sistema, após uma cadeia de K , não gera uma sequência que desrespeite a especificação.

2.4.4 Síntese dos Supervisores

A TCS faz distinção entre o sistema a controlar, denominado planta, e o agente de controle, denominado supervisor. O supervisor, chamado de S , tem o papel de controlar a planta, desabilitando eventos que façam com que a mesma tenha um comportamento indesejável (TEIXEIRA, 2008); (CURZEL, 2008); (VIEIRA, 2007), ou seja, o supervisor S é um autômato, definido sobre o alfabeto Σ , em que as mudanças de estado ocorrem de acordo com a sequência de eventos na planta G .

Para cada estado da planta, o supervisor S executa uma ação de controle, desabilitando em G os eventos que não podem ocorrer em S após uma sequência de eventos observada. Em cada estado do supervisor pode-se também ser identificado um conjunto de eventos a serem desabilitados. Segundo a TCS, o conjunto de eventos Σ é particionado em um conjunto de eventos controláveis, Σ_c , e um conjunto de eventos não controláveis, Σ_u .

Um evento é classificado como controlável se sua ocorrência pode ser impedida, desabilitada pela ação de um agente de controle. Caso isto não seja possível o evento é classificado como não controlável (CURY, 2001).

Um supervisor S não bloqueante existe para G tal que $Lm(S/G) = K$ se e somente se K for controlável. (CURY, 2001). Seja $C(K,G)$ o conjunto de todas as sub linguagens de K que são controláveis em relação a G . Conforme (QUEIROZ, 2004), existe um único elemento supremo contido em $C(K,G)$, o qual é representado por $SupC(K,G)$. Assim, se a linguagem K não é controlável, é necessário calcular a linguagem controlável que mais se aproxime de K , e o supervisor ótimo S é tal que $Lm(S/G) = SupC(K,G)$.

A ação do supervisor S no sistema controlado, S/G , conforme apresenta a figura 2.10 tem como objetivo desabilitar os eventos em G que não podem ocorrer. O comportamento do sistema controlado S/G pode ser descrito pelo SED resultante da composição síncrona $S // G$, o qual permite somente a ocorrência das transições possíveis em G e não desabilitadas por S . O comportamento em malha fechada se dá por $L(S/G) = L(S // G)$ e $Lm(S/G) = Lm(S // G)$ (CURY, 2001). Um sistema controlado S/G é não bloqueante se $Lm(S/G) = L(S/G)$, ou seja, a partir de qualquer palavra gerada pelo sistema sob supervisão é possível sempre completar uma tarefa (ALMEIDA, 2012).

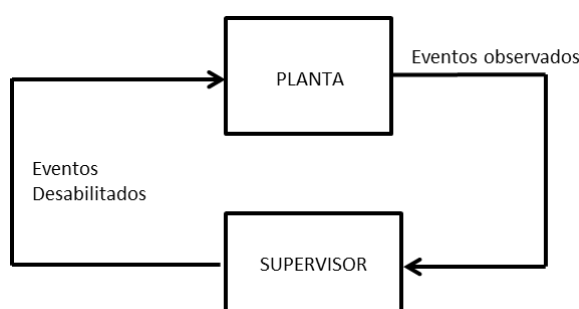


Figura 2.10 - SED em malha fechada
Fonte: (CURY, 2001)

2.4.5 Abordagem monolítica

Na abordagem monolítica considera-se que um único supervisor interage com a planta numa estrutura em malha fechada como na Figura 2.10 foi apresentado. O supervisor mapeia a sequência de eventos gerados pela planta e impede a ocorrência de determinados eventos, restringindo o comportamento do sistema ao comportamento desejado.

Nesta abordagem é necessário que se faça a obtenção da planta pela composição de todos os subsistemas, também é necessário que se obtenha o modelo da especificação pela composição síncrona das especificações individuais dos subsistemas e por fim se obtenha a linguagem controlável.

A abordagem monolítica apresenta duas dificuldades. A primeira consiste no crescimento exponencial do número de estados do supervisor à medida que se aumenta o número de subsistemas e especificações, exigindo grande capacidade de processamento computacional para criar o supervisor.

Como segunda dificuldade, a existência de um único supervisor gera um programa muito grande que dificulta seu desenvolvimento, implementação, entendimento e manutenção (CURY, 2001).

2.4.6 Abordagem modular local

Segundo (SANTOS, 2008) a abordagem do controle modular local explora, além da modularidade das especificações, a modularidade da planta. Assim, a planta é dividida em subsistemas, representados por modelos de menor tamanho, o que diminui a complexidade computacional da síntese dos supervisores. A Figura 2.11 apresenta o funcionamento da malha fechada do controle modular local. Os dois supervisores $S1$ e $S2$ geram as ações de controle $S1(s1)$ e $S2(s2)$, e controlam apenas partes da planta, chamadas plantas locais $G1$ e $G2$. Cada supervisor enxerga apenas uma parte dos eventos ocorridos na planta, que são as cadeias $s1$ e $s2$.

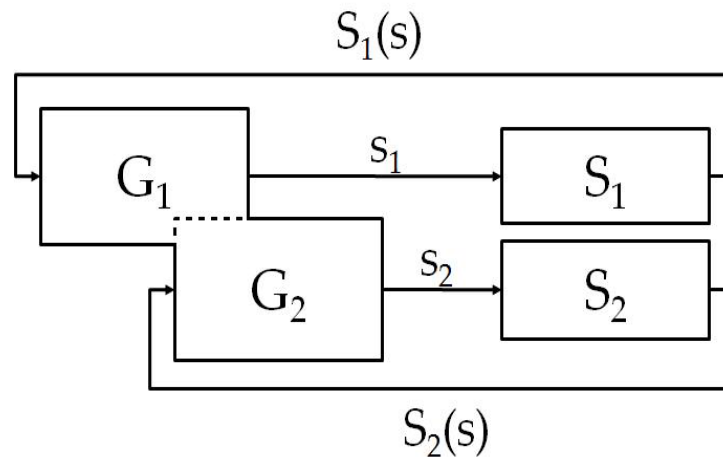


Figura 2.11 - Representação do controle modular local
Fonte: (SANTOS, 2008)

No controle modular local a planta é formado por subsistemas, modelados por vários autômatos, $G_i = (\mathcal{X}_i, \Sigma_i, f_i, \mathcal{X}_{0i}, \mathcal{X}_{mi})$, sendo $i = \{1, \dots, n\}$. Também são construídas as

especificações genéricas locais $E_{gen,j}$, sendo $j = 1, \dots, m$, definidas em subconjuntos de eventos $\Sigma_{gen,j} \subseteq \Sigma$, de forma que expressem os objetivos de controle.

O comportamento desejado do sistema é então, expresso localmente em relação apenas às plantas afetadas por cada especificação genérica local. Assim, definem-se plantas locais para cada especificação genérica.

Cada planta local $G_{loc,j}$ é uma composição síncrona das sub-plantas afetadas direta e indiretamente pela especificação genérica local $E_{gen,j}$, ou seja, a planta local é a composição síncrona de toda planta cujo conjunto de eventos Σ_i possua algum evento comum ao conjunto de eventos da especificação genérica local $E_{gen,j}$ (SANTOS, 2008).

2.4.7 Exemplo de modelagem com controle supervisorio

Para modelar uma planta é necessário representar o comportamento de cada subsistema por autômatos. No passo seguinte é executada a composição síncrona para todos os subsistemas envolvidos. Na sequência, serão identificados os eventos controláveis e não controláveis que podem ser desabilitados pela ação do supervisor ao realizar as modelagens das especificações de controle para que a planta não apresente comportamentos indesejados.

MODELAGEM MONOLÍTICA

Esta modelagem se dá conforme descrito no item 2.4.5 com um único supervisor desabilitando eventos indesejados na planta.

Tabela 2.1- Modelagem monolítica

Especificações	Sub-Sistemas	Plantas Locais	Supervisor
$E1$	$G5, G6, G7$	$GA = G5//G6//G7$	S

As figuras 2.12, 2.13 e 2.14 apresentam os autômatos $G5, G6$ e $G7$ todos com 2 estados e 2 eventos.

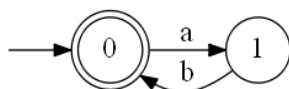


Figura 2.12 - Autômato G5



Figura 2.13 - Autômato G6

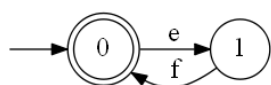
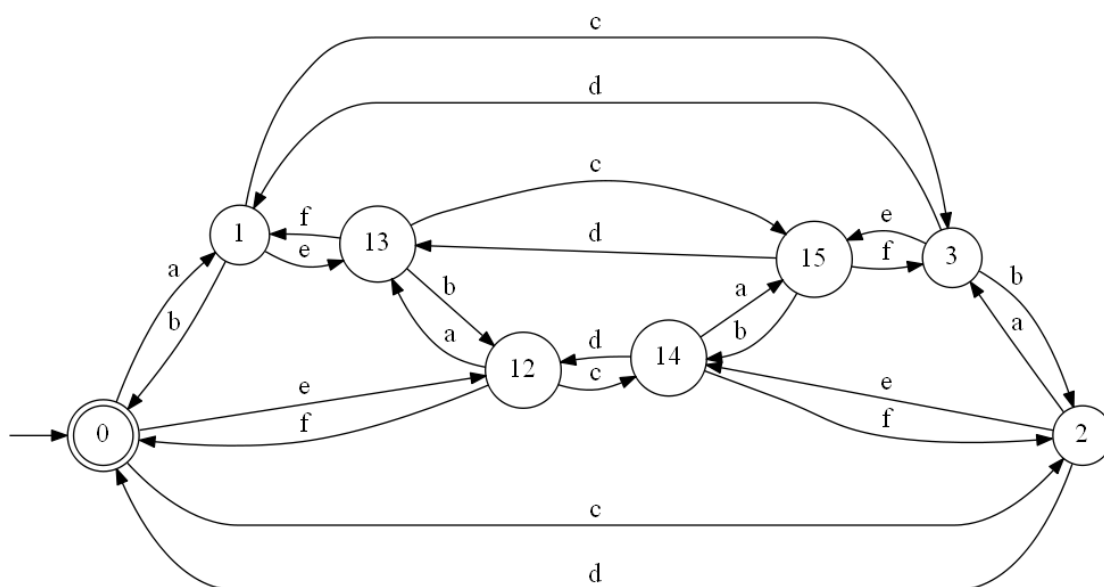


Figura 2.14 - Autômato G7

Para determinar o autômato que representa a planta G conforme apresentado na figura 2.15 é necessário realizar a composição síncrona $G5//G6//G7$.

Figura 2.15 - Autômato da planta G

A figura 2.16 apresenta o autômato que representa a restrição de comportamento da planta, esta restrição é utilizada no cálculo do supervisor para conseguir o comportamento especificado.

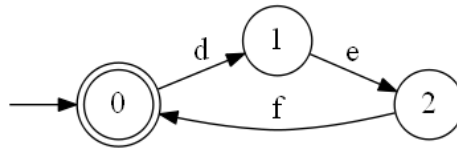


Figura 2.16 - Autômato que contém a restrição da planta G

É necessário identificar os eventos controláveis e não controláveis de todos os subsistemas que compõe a planta G para o cálculo do supervisor $\Sigma_c = \{a, c, e, g\}$, $\Sigma_u = \{b, d, f, h\}$. A figura 2.17 apresenta o supervisor global da abordagem monolítica.

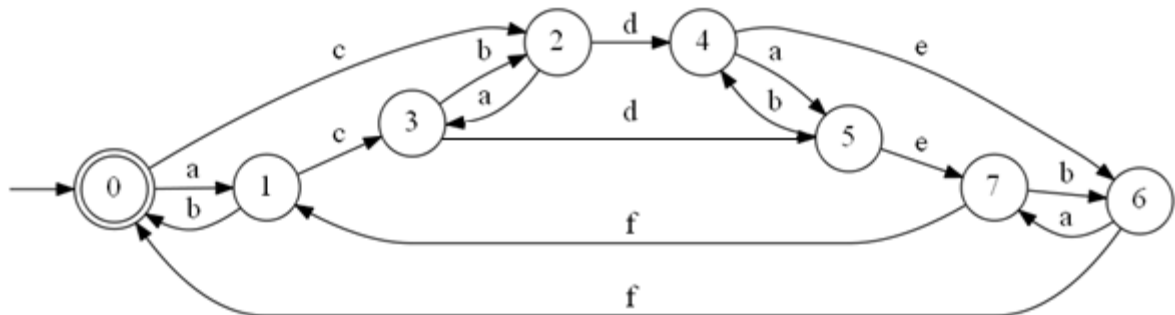


Figura 2.17 - Supervisor global

A figura 2.18 apresenta o supervisor reduzido obtido para atender as especificações.

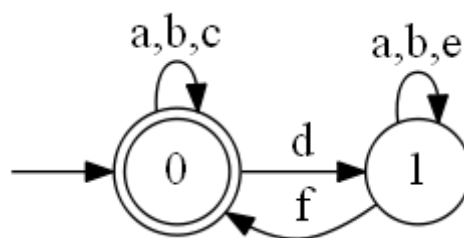


Figura 2.18 - Supervisor reduzido

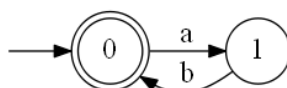
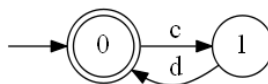
MODELAGEM MODULAR LOCAL

Esta modelagem como descrito na seção 2.4.6 tem como objetivo encontrar supervisores locais dividindo a planta em subsistemas conforme apresenta a tabela 2.2 para que não haja explosão de estados e os supervisores locais estejam representados por autômatos de menor tamanho.

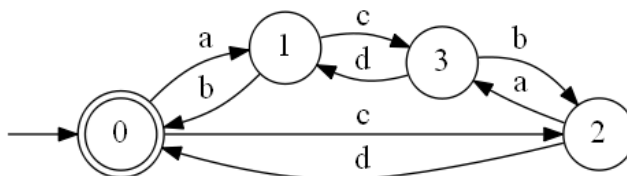
Tabela 2.2 - Modelagem modular local

Especificações	Sub-Sistemas	Plantas Locais	Supervisor
$E1$	$G9, G10$	$GA = G9//G10$	$Sup1$
$E2$	$G11, G12$	$GB = G11//G12$	$Sup2$

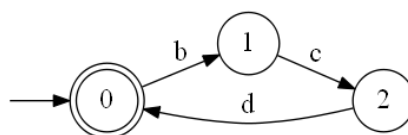
As figuras 2.19 e 2.20 apresentam os autômatos $G9$, $G10$ contendo cada um 02 estados e 02 eventos para o calculo do $Sup1$.

Figura 2.19 - Autômato $G9$ Figura 2.20 - Autômato $G10$

Para determinar o autômato que representa a planta G conforme apresentado na figura 2.21 é necessário realizar a composição síncrona $G9//G10$

Figura 2.21 - Autômato da planta $G9//G10$

A figura 2.22 apresenta o autômato que representa a restrição de comportamento da planta, esta restrição é utilizada no cálculo do supervisor para conseguir o comportamento especificado.

Figura 2.22 - Restrição de comportamento da planta $G9//G10$

É necessário identificar os eventos controláveis e não controláveis de todos os subsistemas que compõe a planta G para o cálculo do supervisor:

$$\Sigma_c = \{a, c\}$$

$$\Sigma_u = \{b, d\}$$

A figura 2.23 apresenta o supervisor $Sup1$ da abordagem modular local onde a restrição de comportamento é respeitada com eventos desabilitados pelo supervisor.

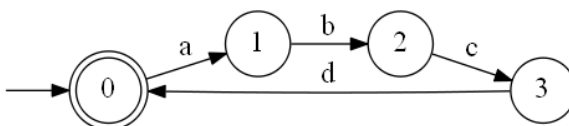


Figura 2.23 - Supervisor local $Sup1$

A figura 2.24 apresenta o supervisor reduzido obtido para atender as especificações, porém mantendo as linguagens gerada e marcada da modelagem.

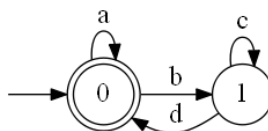


Figura 2.24 - Supervisor Reduzido de $Sup1$

As figuras 2.25 e 2.26 apresentam os autômatos $G11$, $G12$ contendo cada um 02 estados e 02 eventos para o cálculo do $Sup2$.

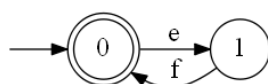


Figura 2.25 - Autômato $G11$

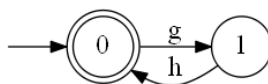


Figura 2.26 - Autômato $G12$

Para determinar o autômato que representa a planta G conforme a figura 2.27 é necessário realizar a composição síncrona $G11//G12$:

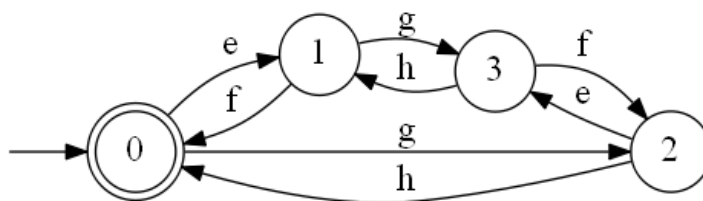


Figura 2.27 - Autômato da planta $G11//G12$

A figura 2.28 apresenta o autômato que representa a restrição de comportamento da planta $G11//G12$. Esta restrição é utilizada no cálculo do supervisor para conseguir o comportamento especificado.

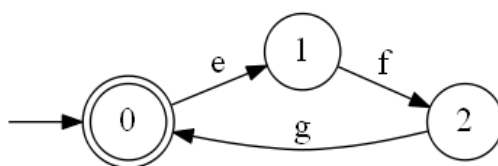


Figura 2.28 - Restrição de comportamento da planta $G11//G12$

É necessário identificar os eventos controláveis e não controláveis de todos os subsistemas que compõe a planta G para o cálculo do supervisor, como a seguir:

$$\Sigma_c = \{e, g\}$$

$$\Sigma_u = \{f, h\}$$

A figura 2.29 apresenta o supervisor $Sup2$ da abordagem modular local onde a restrição de comportamento é respeitada com eventos desabilitados pelo supervisor.

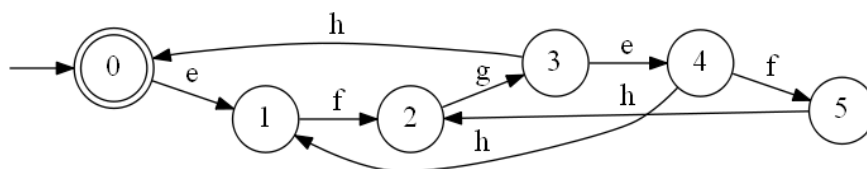


Figura 2.29 - Supervisor local $Sup2$

A figura 2.30 apresenta o supervisor reduzido obtido para atender as especificações, porém mantendo as linguagens gerada e mardada da modelagem.

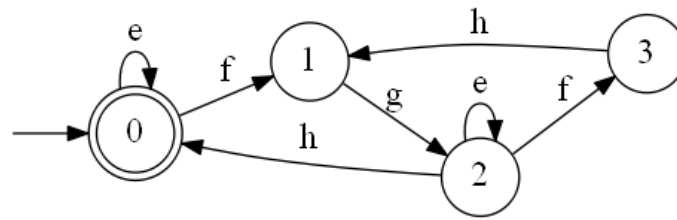


Figura 2.30 - Supervisor reduzido de *Sup2*

2.4.8 Aplicações com controle supervisorío

O controle supervisorío tem suas aplicações voltadas para diversas áreas como: manufatura, automação industrial, robótica etc. Estas aplicações validam a teoria de supervisorío e contribuem para o desenvolvimento de novas aplicações com a utilização desta técnica.

Dentre essas várias aplicações podem-se destacar algumas como:

- Aplicação da teoria de controle supervisorío no projeto de controladores para sistemas de rota variável centrado em robô (SILVA, 2007);
- Contribuições à análise de desempenho de células de manufatura baseada na teoria de controle supervisorío (KAWAMURA, 2012);
- Implementação de controle supervisorío em clps usando linguagem de alto nível (ALMEIDA, 2012)
- Modelagem e projeto de um sistema de controle supervisorío para um processo de lavagem de microplacas (SANTOS, 2008)

Estas aplicações com controle supervisorío, são possíveis de serem utilizadas em diversos sistemas a eventos discretos, além disso é uma ferramenta gráfica de auxílio à engenharia de controle e automação na concepção de projetos.

3 SUBESTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 DEFINIÇÃO DE SUBESTAÇÃO

As subestações de energia elétrica constituem um ponto do sistema elétrico de potência onde a energia é transformada, controlada e distribuída. Deste modo, devem possuir ações e comandos coordenados e filosofias de operação, em conformidade com os sistemas de medição e proteção.

As subestações são conjuntos de instalações elétricas de média ou de alta tensão que tem a característica de proporcionar a operação segura das partes (MAMEDE FILHO, 2005).

As subestações têm os equipamentos que as compõe agrupadas em um único lugar conforme apresenta a figura 3.1.

Dentro das subestações elétricas, existem inúmeras maneiras de se promover as ligações entre os vários componentes. Estas ligações definem o arranjo ou a topologia da subestação que, agregam a relação confiabilidade/custo, que delineiam a qualidade de fornecimento de energia elétrica em diversas condições de operação.

As características operativas de uma subestação são definidas pelos equipamentos de manobra e pelo seu arranjo de barra. Cada arranjo possui suas vantagens e desvantagens, sendo cada um deles adequado a cada tipo de implementação.

O condicionamento dos arranjos das subestações, para atender a premissa de maior confiabilidade do sistema elétrico, deve abranger também as características que permitam absorver os impactos das condições normais de operação. Na subseção a seguir serão apresentadas algumas características de subestações quanto a instalação, tipo e funções.



Figura 3.1 - Subestação de energia elétrica

Fonte: <http://www.weg.net/br/Media-Center/Noticias/Produtos-e-Solucoes/Votorantim-instala-subestacao-no-CE>

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS

Existem várias formas de se classificar uma subestação elétrica, por exemplo, quanto à função, nível de tensão, tipo de instalação e formas de operação. A seguir serão apresentadas estas classificações. Uma das características da subestação elétrica é de ser uma subestação de transformação e dentro destas características estão:

- Subestação elétrica elevadora;
- Subestação elétrica de manobra;
- Subestação elétrica abaixadora;
- Subestação elétrica de distribuição;
- Subestação de regulação de tensão;
- Subestações elétricas conversoras.

3.2.1 Classificação em relação ao tipo de instalação

As subestações podem ser classificadas quanto ao tipo de instalação. A seguir serão apresentados alguns tipos destas instalações:

SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DESABRIGADAS

Estas subestações são normalmente instaladas em locais ao ar livre, campo aberto e sem cobertura para seus equipamentos;

SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS ABRIGADAS

Estas subestações são normalmente instaladas em locais com cobertura, onde os equipamentos que as compõe estão protegidos do sol e da chuva, com isso sua conservação se dá por não estarem tão expostas;

SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS BLINDADAS

Instaladas em locais com cobertura e com equipamentos protegidos, também isolados em óleo ou em gás. Nesse tipo de subestação não é possível visualizar os barramentos e tantos outros equipamentos por estarem isolados em óleo ou a gás, o que nas subestações comuns seria de fácil visualização.

3.2.2 Classificação em relação a forma de operação de uma subestação

As subestações podem ser classificadas quanto a forma de operação, a seguir serão apresentados algumas formas de operação:

SUBESTAÇÕES COM OPERADOR

Neste tipo de subestação os colaboradores tem que ser submetidos a treinamentos constantes para serem capacitados a operá-la sem que haja dúvida na operação por parte deles. Nem todas as subestações têm sistema de supervisão por computador e operação local, isso só se justifica para grandes instalações;

SUBESTAÇÕES SEMI-AUTOMÁTICAS

Estas subestações possuem muitos intertravamentos específicos que impedem operações indevidas por parte do operador local;

SUBESTAÇÕES AUTOMATIZADAS

Estas subestações tem supervisão remota por computadores e SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) o que faz com que os operadores somente monitorem o seu funcionamento em condições normais e somente tomem algum tipo de ação com o controle em local e manual em raros casos de emergência.

3.3 EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO

Os equipamentos listados quando instalados em conjunto compõem uma subestação elétrica e são eles:

- Linhas e alimentadores;
- Equipamentos de disjunção como os disjuntores, religadores e chaves;
- Equipamentos de transformação: transformadores de potência, transformadores de instrumentos, transformador de potencial e de corrente, e transformador de serviço;
- Equipamentos de proteção como os relés primário, retaguarda e auxiliar, fusíveis, para-raios e malha de terra;
- Equipamentos de compensação como os reatores, capacitores, compensadores síncronos, compensadores estáticos.
- Barramentos;

Nas próximas subseções serão apresentados os principais equipamentos de uma subestação de energia elétrica.

3.3.1 DISJUNTORES

O disjuntor como apresentado na figura 3.2 é um equipamento de manobra. Suas funções principais são: interromper ou religar um circuito com carga e proteger a instalação contra as anormalidades do sistema como as de um curto circuito (GEBRAN, 2014).



Figura 3.2 - Disjuntor
Fonte: www.weg.net

Os disjuntores têm a função principal de proteger o circuito e principalmente garantir a segurança das instalações. Uma característica que os disjuntores devem ter é a de possuir velocidade de fechamento e abertura em condições normais ou não de operação.

O tempo para interrupção deve ser o mínimo possível, com o intuito de diminuir o risco de perda de estabilidade do sistema. Outros aspectos importantes a serem definidos são o meio de extinção do arco elétrico, o meio isolante e o tipo de mecanismo de operação a ser utilizado (GEBRAN, 2014).

Os disjuntores devem ser projetados levando em consideração alguns dados de onde serão aplicados como:

- Tensão nominal;
- Frequência nominal;
- Corrente nominal;
- Capacidade de interrupção em curto-circuito simétrico;
- Tempo de interrupção em ciclos: 3-8 ciclos em 60 Hz.

CLASSIFICAÇÃO DOS DISJUNTORES

Os disjuntores são classificados e denominados segundo a tecnologia empregada para a extinção do arco elétrico. Os tipos comuns de disjuntores são:

- Disjuntores a sopro magnético;

- Disjuntores a óleo;
- Disjuntores a vácuo;
- Disjuntores a ar comprimido;
- Disjuntores a SF6 (Hexafluoreto de enxofre).

3.3.2 RELIGADOR

O Religador é um dispositivo utilizado em sistemas elétricos com a função de protegê-los contra problemas transitórios. Segundo (MAMEDE FILHO, 2005) os religadores são dispositivos de proteção que podem ser trifásicos ou monofásicos, com programação flexível permitindo a interrupção automática com abertura e fechamento instantâneo, o qual é temporizado de acordo com o surgimento de defeitos transitórios, bem como a abertura permanente em defeitos permanentes, de acordo com a programação imposta ao equipamento.

Normalmente os religadores são projetados para ter uma sequência de religamento de no mínimo uma até quatro operações e ao fim da sequência completa a abertura final bloqueará a sequência. As sequências podem ser combinadas em até 04 operações sendo:

- 01 rápida- 3 lentas;
- 02 rápidas- 2 lentas;
- 03 rápidas- 1 lenta;
- 04 rápidas;
- 04 retardadas.

No caso de defeito permanente, o religador ficará aberto para proteger o sistema elétrico, até que seja rearmado manualmente após a solução do problema que causou a atuação do religador.

Este tipo de atuação ocorre, pois no caso de linhas aéreas de distribuição ou transmissão, a maioria dos defeitos são transitórios, provocados por toques de partes de plantas nas linhas, induzidas por rajadas de vento ou por materiais sendo levados pelo vento.

O desligamento e posterior religamento após um tempo necessário para a extinção do arco elétrico ou para a remoção natural dos materiais que provocaram o curto-circuito, são suficientes para evitar grandes problemas no sistema elétrico, reduzindo drasticamente a

indisponibilidade de energia para os consumidores ligados à linha em questão. A figura 3.3 apresenta um religador automático.



Figura 3.3 - Religador automático
Fonte : <http://www.schneider-electric.com/>

O Religador tem a característica de diferenciar as faltas permanentes das faltas transitórias. Quando uma chave fusível é atuada no caso de uma falta transitória ocorrem vários problemas para a concessionária de energia, pois quanto maior for o tempo em que a concessionária deixou de disponibilizar energia, maior é a probabilidade de resultar em pagamento de multas a terceiros (MAMEDE, 2005).

3.3.3 TRANSFORMADOR

A transmissão da energia elétrica é realizada em tensões elevadas, visando diminuir as perdas. Quando chega aos centros de consumo, a energia tem sua tensão reduzida para níveis compatíveis com os sistemas de distribuição. A conexão entre os vários níveis de tensão é feita através dos transformadores. A função primária do transformador de distribuição é reduzir a tensão de níveis de transmissão e subtransmissão para níveis de distribuição. Nas subestações podem existir um ou mais transformadores, dependendo do porte da rede de distribuição. As subestações podem ser formadas por transformadores trifásicos ou transformadores monofásicos, conectados de forma a constituir banco trifásico (GEBRAN, 2014).

Os transformadores podem ser descritos, de forma simplificada, como: equipamentos elétricos estacionários para uso em sistemas elétricos, cuja função principal é a transferência de energia elétrica de um circuito primário para um circuito secundário, mantendo a mesma frequência do sinal, alternado e adequando os valores de corrente e tensão. A figura 3.4 apresenta um transformador do sistema de potência.



Figura 3.4 - Transformador de potência de grande porte.
Fonte: (SOUZA, 2008)

3.3.4 RELÉS

Os relés são dispositivos que comandam os esquemas de proteção dos sistemas elétricos de potência. A função principal do relé é identificar de forma rápida os defeitos, localizá-los e promover através de disparos de alarmes, sinalizações e comandos de aberturas de disjuntores a interrupção da falta. O relé através de transformadores de instrumentos e cálculos internos monitora grandezas do sistema elétrico de potência e possui características de sensibilização para anomalias no sistema. As características funcionais primordiais dos relés são as mesmas para qualquer tipo, sejam eles eletromecânicos, eletrônicos ou digitais (MAMEDE FILHO, 2005) . A figura 3.5 apresenta um relé de proteção industrial.



Figura 3.5 - Relé de proteção
Fonte: <http://www.selinc.com.br/>

3.3.5 REGULADORES DE TENSÃO

O grau de qualidade da energia elétrica está diretamente ligado ao nível da tensão entregue aos consumidores. A regulação de tensão é um dos principais fatores que devem ser considerados para uma adequada operação do sistema elétrico de distribuição.

O regulador de tensão é um dispositivo que tem como finalidade manter o nível de tensão de um sistema elétrico em uma faixa de valores predeterminados (MAMEDE FILHO, 2005).

O regulador de tensão é baseado no projeto de um autotransformador. Pode elevar ou reduzir a tensão dependendo das conexões de seus enrolamentos. Atualmente, dois tipos de reguladores de tensão são frequentemente usados nas redes de distribuição: o regulador de tensão autobooster e o de 32 degraus. O autobooster é muito utilizado em redes de distribuição e sua principal característica é a regulagem da tensão somente em um sentido, ou seja, é regulado para elevar ou para reduzir. A característica de regulador de tensão de 32 degraus é manter em seus terminais de saída ou em um ponto qualquer do sistema, uma tensão constante (MAMEDE FILHO, 2005).

3.3.6 BARRAMENTOS

Os barramentos são condutores de eletricidade, feitos geralmente de materiais sólidos como as barras de cobre.

As subestações têm seu arranjo ou topologias usadas para denominar a forma com que as mesmas se unem entre si. Os arranjos mais comuns para as subestações elétricas são:

- Barramento simples;
- Duplo barramento simples;
- Barramento simples seccionado;
- Barramento principal e de transferência;
- Barramento duplo com um disjuntor;
- Barramento duplo com disjuntor duplo;
- Barramento duplo de disjuntor e meio;
- Barramento em anel.

BARRAMENTO SIMPLES

Este é o arranjo mais simples para um barramento de uma subestação como apresenta a figura 3.6. Neste arranjo, todos os circuitos se conectam a mesma barra e na ocorrência de alguma falta estes circuitos serão desligados.

É a configuração mais fácil de operar, com um disjuntor manobrando um único circuito. Pode ser também a configuração com menor confiabilidade, uma vez que uma falha no barramento provocará a paralisação completa da subestação(GEBRAN, 2014).

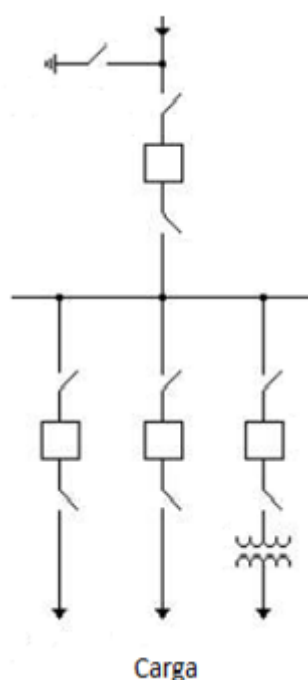


Figura 3.6 - Barramento Simples
Fonte : (PAREDES, 2002)

O Arranjo de barramento simples não é recomendado para a alimentação de cargas que possam ser interrompidas, pois há desligamento do circuito na ocorrência de manutenção do disjuntor.

A ampliação do barramento não pode ser realizada sem a completa desenergização da subestação. Este barramento é o mais simples, o mais econômico, porém o menos seguro dentre os barramentos sendo suas manobras simples se serem realizadas. Apresentam baixa confiabilidade e a manutenção do disjuntor dos alimentadores interrompe totalmente o fornecimento de energia para os consumidores correspondentes.

DUPLO BARRAMENTO SIMPLES

Neste esquema o que se apresenta é a presença de uma chave de by-pass que auxilia nas manobras para manutenção do disjuntor e também defeitos no disjuntor. A figura 3.7 apresenta este esquema.

É indicado para os consumidores que requerem estabilidade e confiabilidade para cargas essenciais além de aceitar desligamentos periódicos para algumas cargas. São encontradas nas subestações de hospitais, hotéis e muitos tipos de indústria.

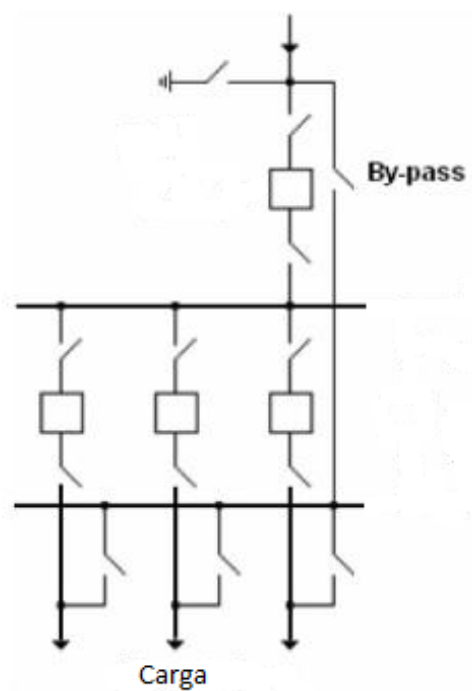


Figura 3.7 - Duplo Barramento Simples
Fonte : (PAREDES, 2002)

Esse tipo de esquema apresenta vantagens como: flexibilidade de conexão de circuitos para a outra barra, qualquer disjuntor pode ser retirado de serviço para manutenção e apresenta fácil recomposição.

O esquema também apresenta algumas desvantagens como: custo elevado em relação ao barramento simples e ocorrendo uma falha no disjuntor de linha ou no barramento ligado ao mesmo implica em perda das cargas não prioritárias devido à presença de disjuntor de intertravamento (GEBRAN, 2014)..

BARRAMENTO SIMPLES SECCIONADO

Neste arranjo o importante é seccionar o barramento para evitar que uma falha no mesmo venha a provocar sua completa desenergização, isolando somente o elemento que apresentou falha na subestação elétrica.

Quando é feita a manutenção em um disjuntor o circuito fica desligado. Existem várias características neste arranjo, por exemplo, a presença de um disjuntor de barra e a flexibilidade para manobras no ato da manutenção. Este arranjo é indicado para funcionar com duas ou mais fontes de energia (GEBRAN, 2014). A figura 3.8 apresenta este arranjo.

Com estas características será possível então dizer que o arranjo tem maior continuidade no fornecimento, possui maior facilidade de execução dos serviços de manutenção, para casos em que há falha na barra, somente são desligados os consumidores ligados à seção afetada. Já a manutenção de um disjuntor deixa fora de serviço a linha correspondente e o esquema de proteção é mais complexo de ser implementado.

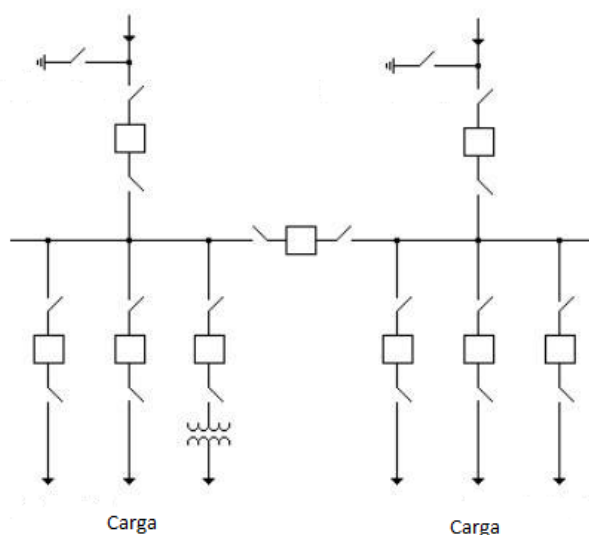


Figura 3.8 - Barramento simples seccionado
Fonte : (COUVRE, 2011)

BARRAMENTO PRINCIPAL E DE TRANSFERÊNCIA

Neste barramento há uma ligação através de um disjuntor de transferência. A finalidade do disjuntor de transferência é garantir a proteção de um vão (entrada de linha ou saída de linha) quando o disjuntor principal (disjuntor ou religador) associado a este vão é retirado de serviço para manutenção como apresenta a figura 3.9.

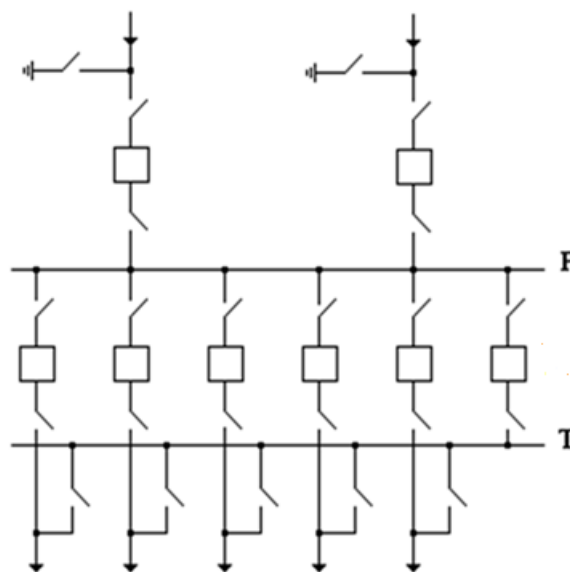


Figura 3.9 - Barramento principal e de transferência
Fonte : (PAREDES, 2002)

Normalmente o vão de entrada de linha garante a alimentação da barra principal através do disjuntor principal e das chaves seccionadoras associadas a este disjuntor, normalmente ficam fechadas.

Há uma chave associada ao disjuntor de entrada de linha que é a de by-pass que se encontra normalmente aberta. Caso haja uma emergência, sendo necessário que o disjuntor principal seja retirado de serviço para manutenção, será conectada a entrada de linha à barra auxiliar através do fechamento da chave seccionadora de by-pass e do disjuntor de transferência, após uma sequência de chaveamento pré-estabelecida pelo órgão de operação do sistema elétrico, assim nesta operação o disjuntor de transferência substitui o disjuntor principal (GEBRAN, 2014).

Vale ressaltar que qualquer disjuntor pode ser retirado de serviço para manutenção, mas este arranjo requer um disjuntor extra para conexão com a outra barra, se houver falha no barramento principal resulta no desligamento da subestação e as manobras são relativamente complicadas quando se deseja colocar um disjuntor em manutenção.

BARRAMENTO DUPLO COM UM DISJUNTOR

Este tipo de esquema é utilizado nas grandes instalações e leva-se em consideração também o nível de importância da instalação. O principal neste tipo de esquema é realizar as

manutenções seja em periodicidade normal ou em outra modalidade se desenergizar o circuito de saída.

Cada linha pode ser conectada a qualquer barra como apresenta a figura 3.10.

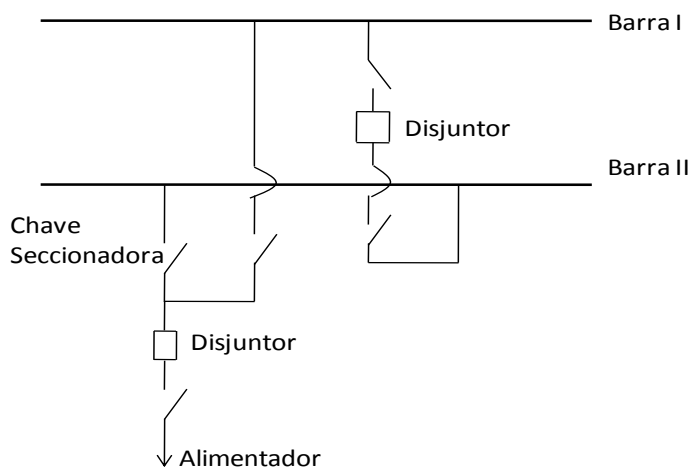


Figura 3.10 - Barramento duplo com disjuntor
Fonte : (COUVRE, 2011)

Este arranjo de barramento permite certa flexibilidade com ambas as barras em operação e qualquer uma das barras poderá ser isolada para manutenção a qualquer momento, tem a facilidade de transferência dos circuitos de uma barra para a outra com o uso de um único disjuntor de transferência e manobras com chaves (GEBRAN, 2014).

O custo apresenta algumas desvantagens, pois requer um disjuntor extra de transferência para conexão com a outra barra, e ainda são necessárias quatro chaves por circuito, pois se houver uma falha no disjuntor de transferência pode colocar a subestação fora de serviço.

BARRAMENTO DUPLO COM DISJUNTOR DUPLO

Esta configuração de barramento apresenta um arranjo em que cada circuito é protegido por dois disjuntores separados, e isso significa que a operação de qualquer disjuntor não afetará mais de um circuito, obtém-se então com este arranjo um alto nível de confiabilidade, porém sua instalação tem um valor de investimento bem superior.

A subestação elétrica é alimentada por linhas de subtransmissão que alimentam a subestação elétrica através de transformador com disjuntor de alta tensão. Há duas barras

nesse arranjo de subestação e o alimentador pode ser suprido por qualquer uma das barras, como apresenta a figura 3.11.

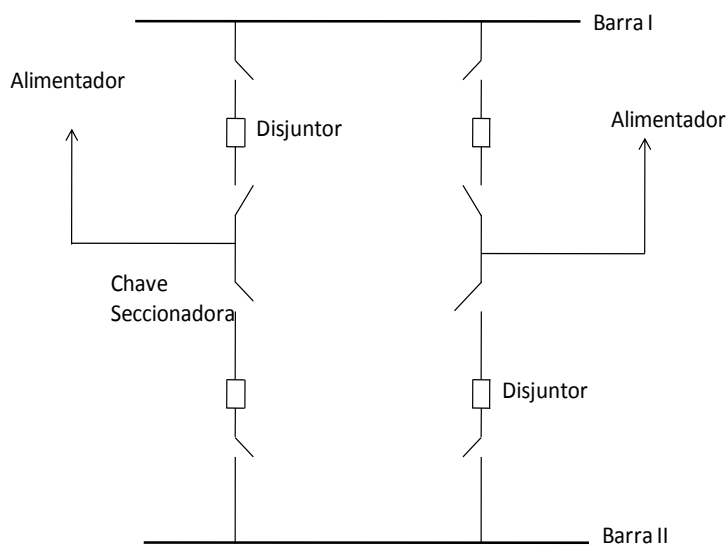


Figura 3.11 - Barramento duplo com disjuntor duplo
Fonte : (COVRE, 2011)

A barra principal é sempre energizada durante a operação normal e a barra de reserva é usada durante situações de manutenção e emergência. Se ocorrer uma falta na barra principal, o disjuntor do lado de baixa tensão do transformador operará desenergizando a barra.

O disjuntor normalmente fechado do alimentador primário ligado à barra principal é então manualmente aberto pela equipe de campo. Subsequentemente o suprimento é transferido para a barra reserva pelo fechamento do disjuntor alternativo do lado de baixa tensão do transformador e o correspondente disjuntor do alimentador primário.

O serviço é interrompido durante o tempo em que é realizada a manobra manual. arranjo usado em subestações de energia elétrica de grande potência e tem como objetivo atender a continuidade de fornecimento de energia elétrica para os clientes que utilizam extra alta tensão pois tem arranjo mais completo. São mais flexíveis e confiáveis e qualquer uma das barras pode ser retirada de serviço a qualquer tempo para manutenção sem retirada de circuitos de serviço, o que vem em contrapartida é o alto custo desta instalação.

BARRAMENTO DE DISJUNTOR E MEIO

Nas subestações de energia elétrica o arranjo do barramento de disjuntor e meio tornou-se uma solução tradicional utilizada na maioria dos países. O sistema disjuntor e meio

é um arranjo multiseccionado em que cada par de circuitos está em uma seção de barra separada e há três conjuntos de disjuntor e chaves seccionadoras para cada dois circuitos conforme apresenta a figura 3.12.

É possível operar com qualquer um dos pares, ou grupo de pares, separados do restante dos circuitos, no entanto, para dar cobertura a todas as contingências de chaveamento, o disjuntor e outros equipamentos têm que ser capazes de operar com a corrente de carga de dois circuitos (GEBRAN, 2014).

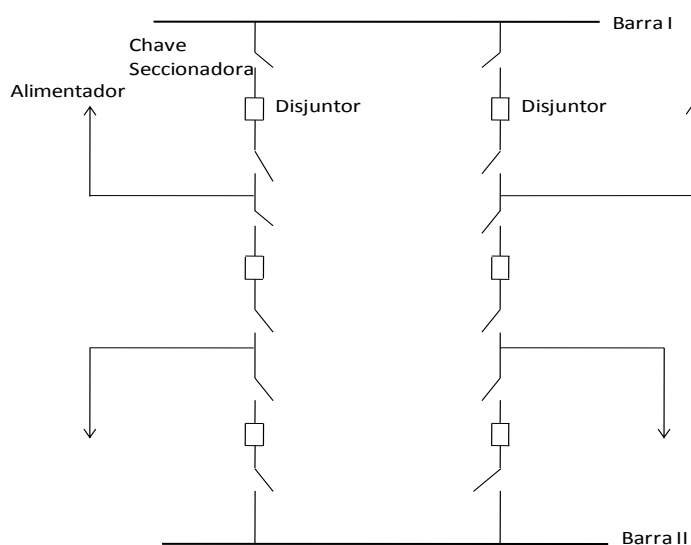


Figura 3.12 - Barramento de disjuntor e meio
Fonte : (PAREDES, 2002)

A alta segurança contra a perda de carga faz com que, o sistema disjuntor e meio seja mais adequado para subestações associadas com usinas geradoras, e para subestações onde grande quantidade de energia é manipulada em circuitos individuais. A vantagem deste esquema é que qualquer disjuntor ou qualquer uma das duas barras pode ser colocado fora de operação sem interrupção do fornecimento.

Este barramento tem semelhanças com o barramento duplo porém simplificado, se comparado ao arranjo de dois disjuntores por circuitos tem utilização de um disjuntor e meio para cada entrada e saída além de ser econômico tem praticamente a mesma confiabilidade do arranjo anterior e é geralmente usado nos sistemas 500kV e 765kV.

Possui maior flexibilidade de manobra, rápida recomposição e se houver alguma falha em algum barramento não retira os circuitos de serviço, ou seja desenergiza.

BARRAMENTO EM ANEL

Para finalizar esta seção temos o arranjo barramento em anel, conforme a figura 3.13. Para a implantação desta configuração o custo é aproximadamente o mesmo que a de barramento simples com a vantagem de ser um arranjo mais confiável, embora sua operação seja mais complicada.

Cada equipamento é alimentado por dois disjuntores separados. No caso de ocorrer falhas, somente o segmento em que a falha ocorre ficara isolado.

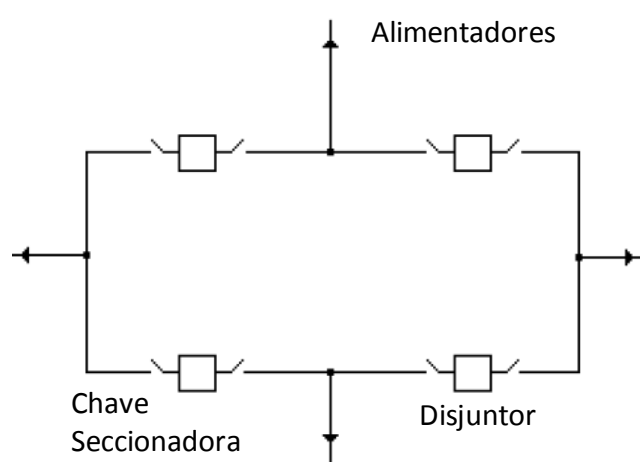


Figura 3.13 - Barramento em anel
Fonte : (PAREDES, 2002)

Quando ocorre a manutenção em um disjuntor, o anel fica aberto e o restante do barramento, assim como os disjuntores alternativos, deverão ser projetados para suportar toda a carga durante este período.

Existem dois caminhos de alimentação para cada circuito de saída e isso faz com que seja flexível. Necessita apenas um disjuntor por circuito e não utiliza conceito de barra principal gerando grande confiabilidade, porém o religamento automático e circuitos de proteção são relativamente complexos(GEBRAN, 2014).

Na modelagem das operações da subestação no capítulo 4 será utilizado este tipo de barramento de acordo com o MIT – 160808 da COPEL.

3.3.7 UNIFILAR DE UMA SUBESTAÇÃO

O diagrama unifilar de uma subestação é um desenho que utiliza simbologia específica e representa graficamente uma instalação elétrica.

A figura 3.14 apresenta o diagrama unifilar da subestação da COPEL (Companhia Paranaense de Eletricidade) que será utilizada na modelagem deste trabalho no capítulo 4.

A topologia aplicada a este barramento permite as manobras para as operações de inversão de fluxo da fonte A para a fonte B e também da fonte B para a fonte A com interrupção e sem interrupção do fornecimento de energia.

Neste unifilar é apresentado as tensões de 34.5kV/13.8kV que são distribuídas para os alimentadores da subestação.

O diagrama unifilar apresenta uma topologia em anel para o trecho onde a tensão é de 34.5kV onde a modelagem deste trabalho é baseada.

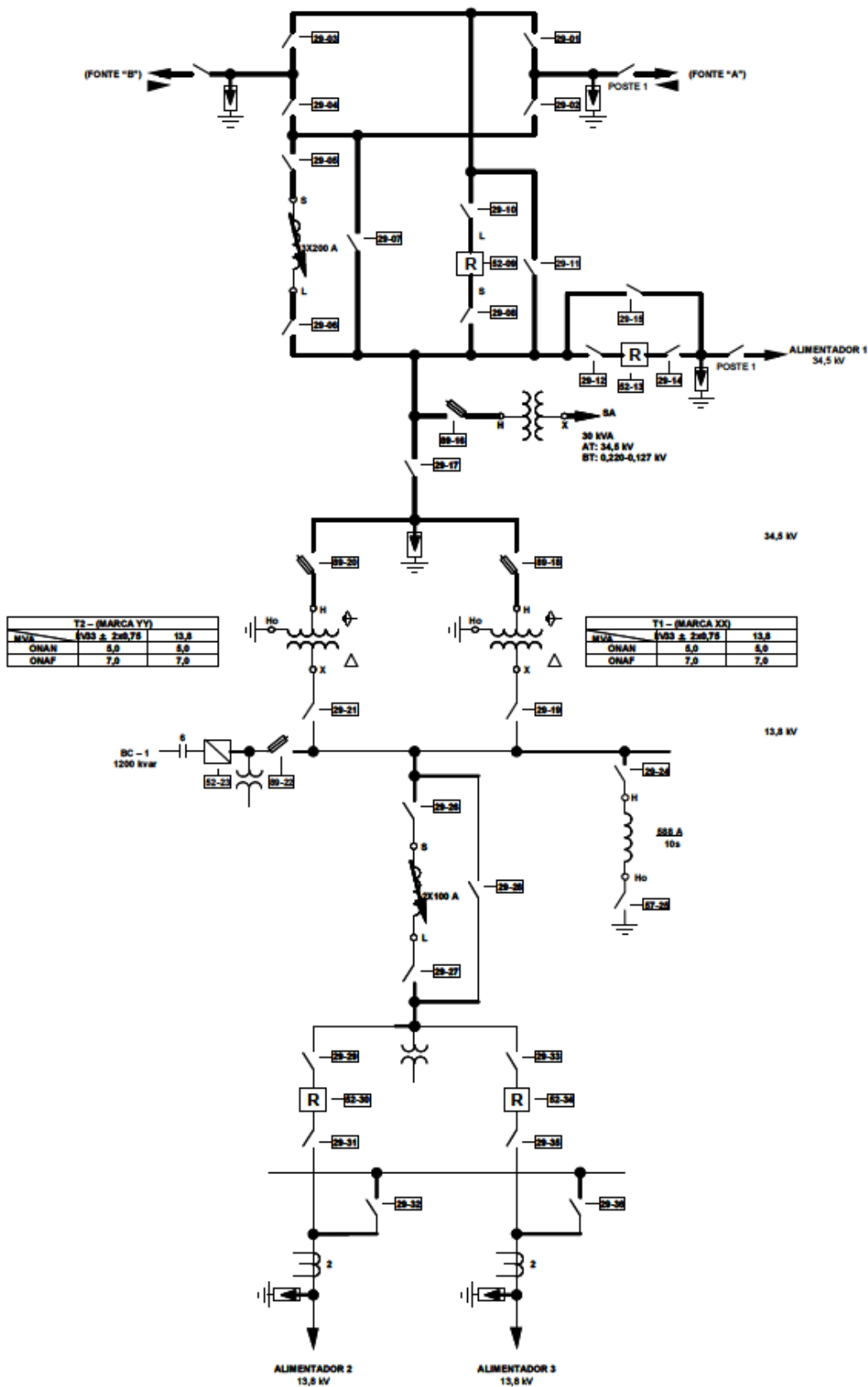


Figura 3.14 – Diagrama da subestação 34.5kV / 13.8kV
 Fonte: (MIT160808, 2010)

4 SUBESTAÇÃO MODELADA

Neste capítulo, será apresentada uma modelagem de subestação de energia através da TCS com a utilização de modelos de autômatos. Foi definida como modelo uma subestação de 34,5/13,8 kV, especificada no MIT (Manual de Instruções Técnicas) da COPEL - Companhia Paranaense de Energia (MIT160808, 2010), adotada neste trabalho sendo utilizada para a modelagem de algumas operações.

O MIT 160808 apresenta uma subestação com a configuração de barramento em anel no trecho onde a tensão é de 34,5kV, conforme apresenta a figura 4.1.

Os equipamentos/arranjo (funções) envolvidos na modelagem deste trabalho são:

- Religador automático;
- Regulador de tensão;
- Arranjo de barramento em anel.

Através destes equipamentos e do arranjo do barramento são realizadas a modelagem das seguintes operações:

- Retirar e colocar o regulador de tensão em operação;
- Retirar e colocar o religador automático RA 52-09 em operação;
- Inversão de fluxo de energia das fontes de A para B e de B para A (com e sem interrupção de energia).

A figura 4.1 apresenta o detalhe do diagrama unifilar com a parte de 34,5kV, onde o equipamento A se refere ao religador automático 52-09 e o equipamento B é o regulador de tensão 34,5kV, ambos modelados neste trabalho.

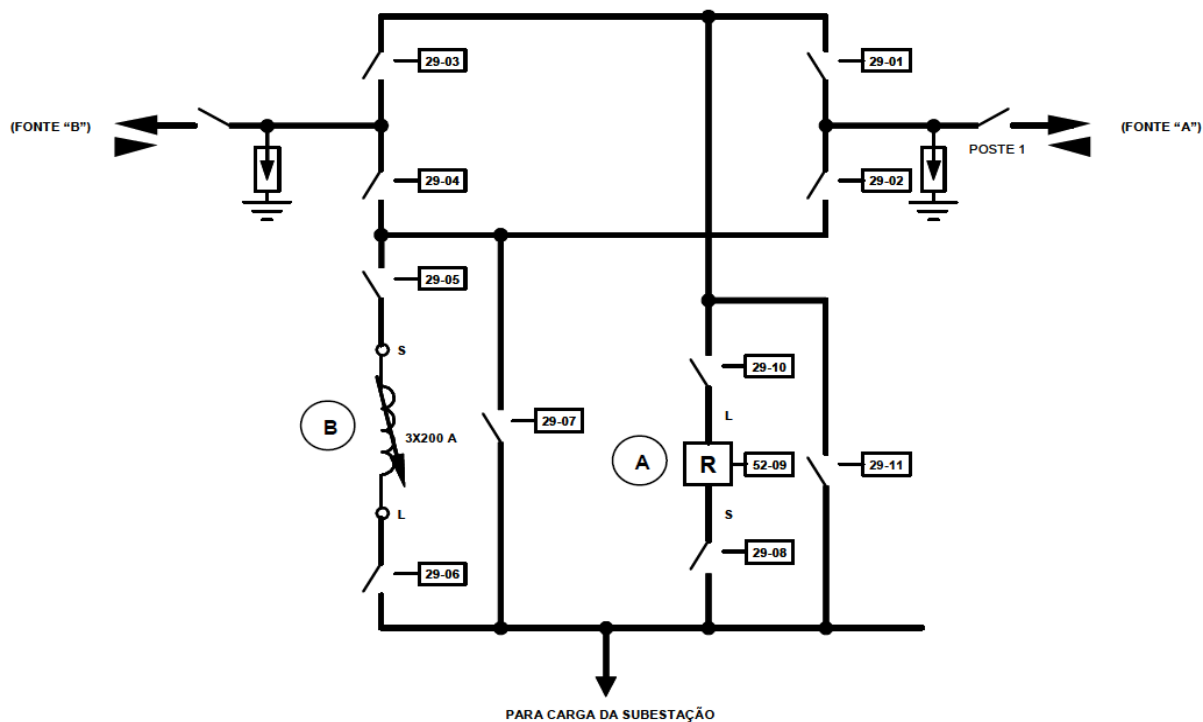


Figura 4.1- Diagrama unifilar do circuito de 34.5kV
Fonte: (MIT160808, 2010)

A figura 4.2 apresenta o detalhe do religador automático RA 52-09.

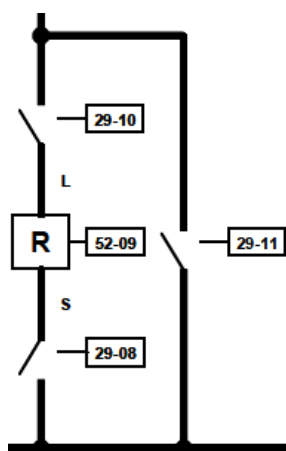


Figura 4.2 – Religador Automático RA 52-09

Para a modelagem com controle supervísório é necessário construir uma representação gráfica do sistema por meio da construção de autômatos. Primeiro, define-se o conjunto de eventos do sistema, formado por eventos controláveis e não-controláveis, em seguida, cria-se os autômatos de forma que as transições entre os estados correspondam as mudanças de estado na planta, e a linguagem gerada represente o funcionamento do sistema.

Como a maioria dos sistemas são compostos, isto é, formados por subsistemas concorrentes interagindo entre si (Ramadge & Wonham 1989, Queiroz 2004), a planta pode ser modelada por várias subplantas.

A especificação para a modelagem da função de retirar o religador automático RA 52-09 de operação sem interrupção de energia é detalhada nesta seção e apresenta no final da modelagem, um supervisor pela TCS.

O MIT da Copel (MIT160808, 2010) apresenta uma sequência de passos para esta função conforme a seguir.

- a) Fechar a chave de bypass (29-11);
- b) Abrir o religador (52-09) e confirmar sua ABERTURA;
- c) Abrir a chave de entrada (29-08);
- d) Abrir a chave de saída (29-10);

As tabelas a seguir representam as plantas locais, subsistemas, especificações, linguagens alvo, supervisores locais e supervisores reduzidos necessários a modelagem modular local.

A tabela 4.1 apresenta as plantas locais com 04 supervisores, 04 especificações, 06 subsistemas e 04 plantas locais. A planta GA é gerada pela composição síncrona dos subsistemas G1 e G2, a planta GB pela composição síncrona dos subsistemas G2, G3 e G4, a planta GC pela composição síncrona dos subsistemas G3 e G5, e por fim a planta GD pela composição síncrona dos subsistemas G3 e G6.

Tabela 4.1 - Plantas Locais

Especificações	Sub-Sistemas	Plantas Locais	Supervisor
E1	G1,G2	GA = G1 G2	Sup1
E2	G2,G3,G4	GB = G2 G3 G4	Sup2
E3	G3,G5	GC = G3 G5	Sup3
E4	G3,G6	GD = G3 G6	Sup4

A tabela 4.2 apresenta os subsistemas/ equipamentos que compõem as plantas locais. Os equipamentos são os subsistemas que apresentam modo e posição. O modo dos subsistemas é representado por estados como: bloqueado e desbloqueado; já a posição dos subsistemas é representada por estados como: aberto, fechado.

Tabela 4.2 - Subsistemas

Subsistemas	
G1	Modo RA Fonte = Bloqueado; Desbloqueado
G2	Posição ch 29-11 = Aberto; Fechado
G3	Posição RA 52-09 = Aberto; Fechado
G4	Modo RA 52-09 = Bloqueado; Desbloqueado
G5	Posição ch 29-11 = Aberto; Fechado
G6	Posição ch 29-11 = Aberto; Fechado

A tabela 4.3 apresenta as especificações do sistema que representam o comportamento da planta. As especificações são utilizadas para evitar estados indesejados ou proibidos, de forma a obedecer aos objetivos de controle de cada planta.

Tabela 4.3 - Especificações

Especificações	
E1	Especificação da planta local GA
E2	Especificação da planta local GB
E3	Especificação da planta local GC
E4	Especificação da planta local GD

A tabela 4.4 apresenta as linguagem alvo do sistema obtida pela composição síncrona entre a planta local G_i e a especificação local E_i , isto é, $K_i = (G_i||E_i)$.

Tabela 4.4 – Linguagens alvo

Linguagem Alvo	
K1	Linguagem Alvo K1
K2	Linguagem Alvo K2
K3	Linguagem Alvo K3
K4	Linguagem Alvo K4

A tabela 4.5 apresenta os supervisores locais que geram as ações de controle e controlam as plantas locais. Cada supervisor local controla os eventos ocorridos na planta local em que atua.

Tabela 4.5 - Supervisores Locais

Supervisores Locais	
Sup1	Supervisor local da planta GA
Sup2	Supervisor local da planta GB
Sup3	Supervisor local da planta GC
Sup4	Supervisor local da planta GD

A tabela 4.6 apresenta os supervisores reduzidos que são responsáveis por reduzir o numero de estados mantendo principalmente a linguagem marcada.

Tabela 4.6 – Supervisores reduzidos

Supervisores Locais	
SR1	Supervisor reduzido da planta GA
SR2	Supervisor reduzido l da planta GB
SR3	Supervisor reduzido da planta GC
SR4	Supervisor reduzido da planta GD

A figura 4.3 apresenta células de controle elaboradas para facilitar/viabilizar a implementação do controle supervisão através da abordagem modular local apresentado na seção 2.4.6, onde são calculados os supervisores locais para a modelagem desta função. Para este cálculo é necessário 04 etapas:

- Compor os elementos/equipamentos de cada uma das 04 células da figura 4.3 para gerar as plantas locais através da composição síncrona dos subsistemas *G1, G2, G3, G4, G5* e *G6*.
- Definir as especificações locais do sistema *E1, E2, E3* e *E4* que fazem a restrição de comportamento para cada planta local do sistema.

- Calcular a linguagem alvo K através da composição das plantas locais com as especificações locais para verificar se o autômato é acessível e co-acessível.
- Calcular os supervisores locais $Sup1$, $Sup2$, $Sup3$ e $Sup4$ responsáveis por executar o controle da planta desabilitando eventos que levem a comportamentos indesejáveis.

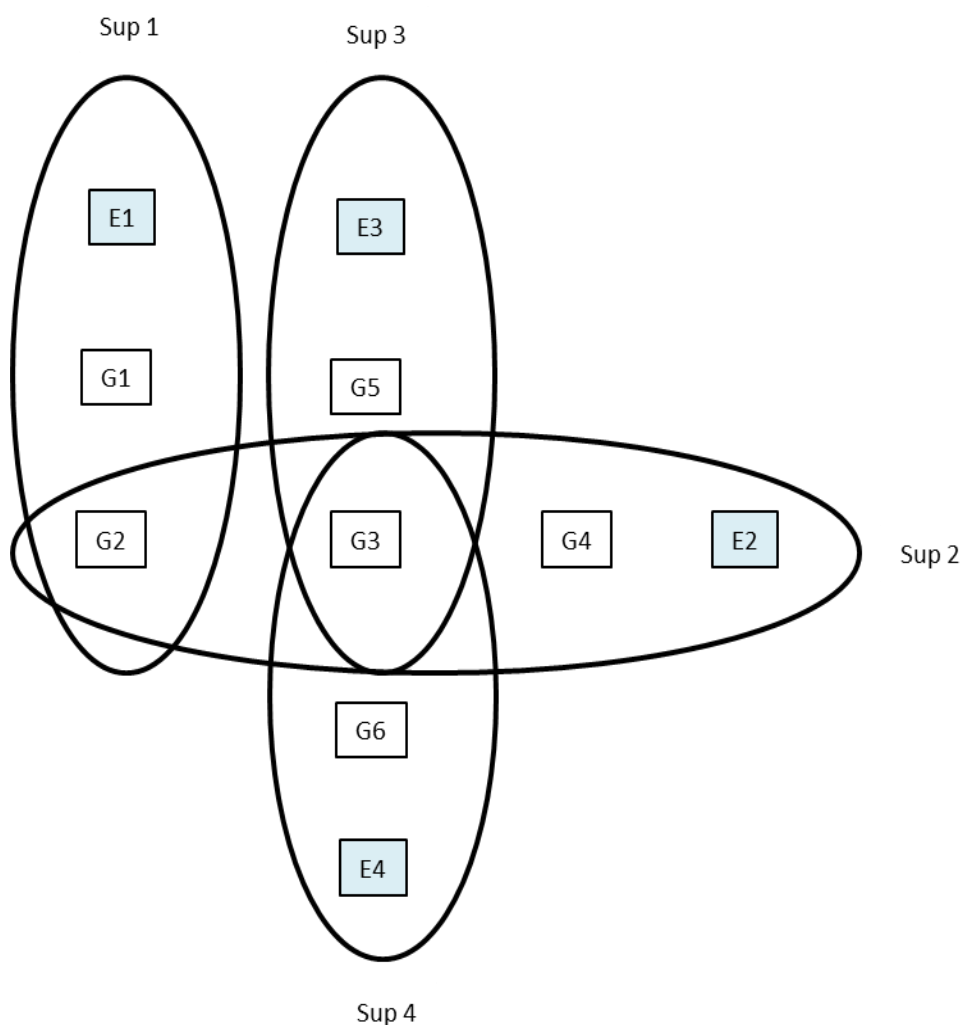


Figura 4.3 - Células de controle

Nas seções 4.2.1 a 4.2.5 que modelam a operação de inversão de fluxo sem interrupção de energia da fonte A para a fonte B será apresentado somente o supervisor da modelagem tendo como base para determiná-lo a modelagem desta seção.

4.1 MODELAGEM DA FUNÇÃO DE RETIRAR O RELIGADOR AUTOMÁTICO RA 52-09 DE OPERAÇÃO

Esta seção apresenta uma das modelagens propostas neste trabalho para a função de retirar de operação o religador automático 34,5kV sem interrupção de energia.

4.1.1 Modelagem da função de fechar a chave de by-pass ch 29-11

Nesta seção inicia-se as modelagens com a TCS dos subsistemas conforme apresentado pela figura 4.3. Para modelar esta atividade de fechamento da chave ch 29-11 é necessário verificar se os religadores automáticos da fonte A ou B estão bloqueados para não haver religamento indesejável. O religador automático será bloqueado da fonte que estiver fornecendo energia para o barramento da subestação de energia.

A figura 4.4 apresenta o autômato do modo de operação do religador automático RA Fonte e a figura 4.5 apresenta o autômato que representa a posição da chave de by-pass ch 29-11 do religador automático RA 52-09.

É necessário realizar a composição síncrona entre o autômato que representa o modo do religador automático fonte e o autômato que representa a chave de by-pass ch 29-11 para determinar a planta GA conforme figura 4.6.

Autômato do Religador Automático RA Fonte (modo) = G1

Eventos: Bloquear = bm, desbloquear = dm,

Estados: Desbloqueado = 0, Bloqueado=1

$G1 = \{X, \Sigma, f, X0, Xm \}$

$X = \{0, 1\}; \Sigma = \{bm, dm\}; f = \{((0, bm) 1); ((1, dm) 0)\}; X0 = \{0\}; Xm = \{0\}$

G1:

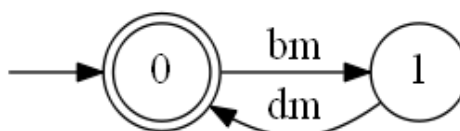


Figura 4.4 – Autômato G1

Autômato da Ch 29-11 (by-pass do religador RA52-09) = G2

Eventos: Abrir = a11, Fechar = f11,

Estados: Aberto = 0, Fechado = 1

$G2 = \{X, \Sigma, f, X0, X_m\}$

$X = \{0, 1\}$; $\Sigma = \{a11, f11\}$; $f = \{((0, f11) 1); ((1, a11) 0)\}$; $X0 = \{0\}$, $X_m = \{0\}$

G2:

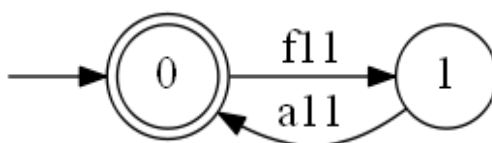


Figura 4.5 - Autômato G2

A figura 4.6 apresenta a planta local GA obtida através da composição síncrona entre os autômatos $G1 \parallel G2$. Geralmente se refere a um conjunto de subsistemas independentes a fim de cumprir um determinado objetivo ainda não especificado, ou seja, é o comportamento do sistema sem nenhuma ação de controle, onde todos os eventos ocorrem livremente. A planta modela todos os comportamentos possíveis, inclusive os indesejáveis.

GA:

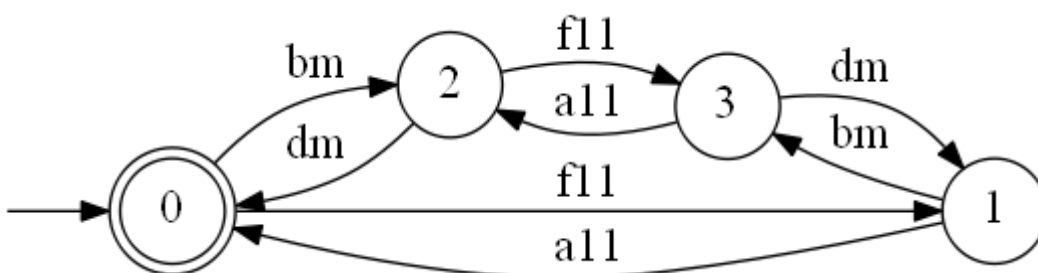


Figura 4.6 - Planta GA

A figura 4.7 representa a especificação de restrição para o comportamento desejado em que o supervisor tenha sobre a planta.

A especificação E1 representa o comportamento em que a chave de by-pass ch 29-11 somente pode ser fechada se o modo de operação do religador automático da fonte que estiver energizando o sistema estiver bloqueado contra religamento automático.

E1:

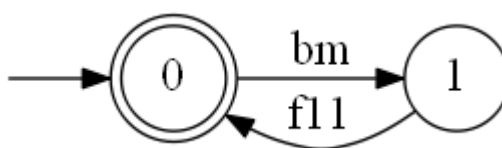


Figura 4.7 - Especificação de restrição E1

O autômato K da figura 4.8 representa a linguagem-alvo da modelagem.

Uma forma de se obter o autômato K1 para determinar linguagem-alvo é realizando a composição síncrona entre a planta GA e a especificação E1, isto é, $K1 = (GA||E1)$.

É necessário determinar o autômato *trim* de K1, ou seja, o autômato *trim* é o que verifica se os estados do autômato são acessíveis e co-acessíveis e se linguagem de K1 atende ao especificado pelas linguagem de E1.

K1:

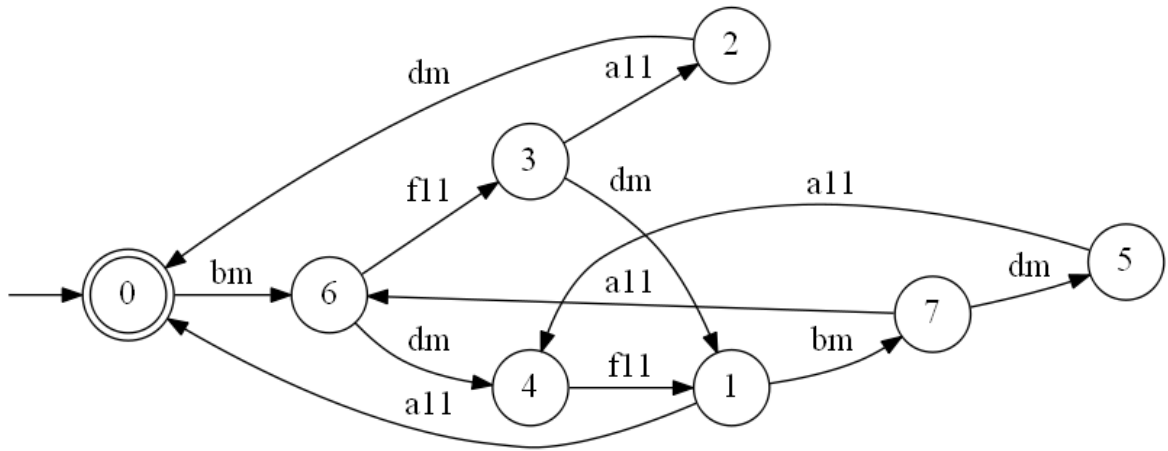


Figura 4.8 – Autômato $K1 = G1||E1$

Conjunto dos eventos controláveis e não controláveis

$$\Sigma_c = \{f11, bm, a11, dm\}$$

$$\Sigma_u = \{ \}$$

Após a determinação da planta local GA, restrição de comportamento E1 e linguagem alvo K1, é possível calcular o supervisor local Sup1 que atue na planta desabilitando eventos e reduzindo estados garantindo uma solução minimamente restritiva e não bloqueante e que atenda às especificações de controle como apresenta a figura 4.9.

Sup1:

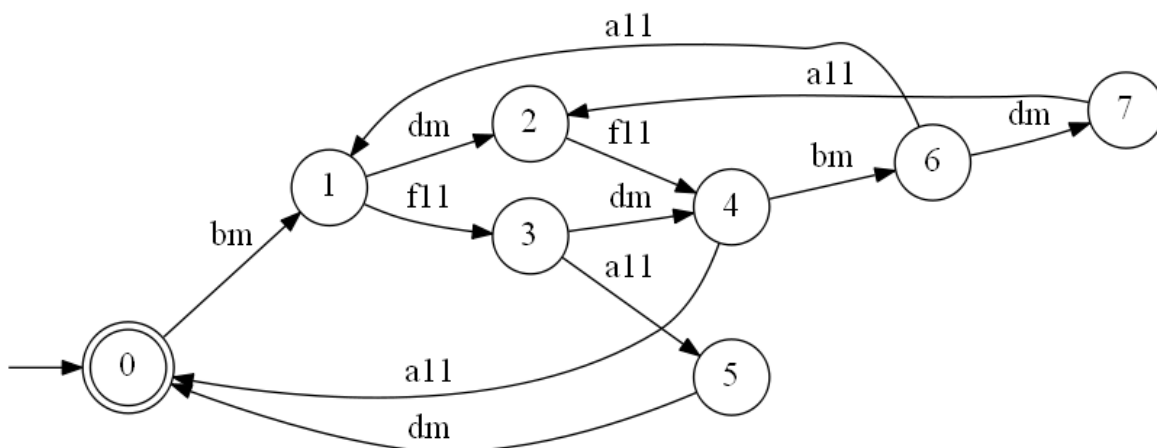


Figura 4.9 – Supervisor Sup1

A figura 4.10 apresenta o supervisor reduzido SR1 com o objetivo de diminuir a quantidade de estados do supervisor, mantendo sua ação de controle em relação a planta. Para que seja possível esta redução é necessário assegurar que o supervisor reduzido e o supervisor original garantam a mesma linguagem gerada e marcada.

SR1:

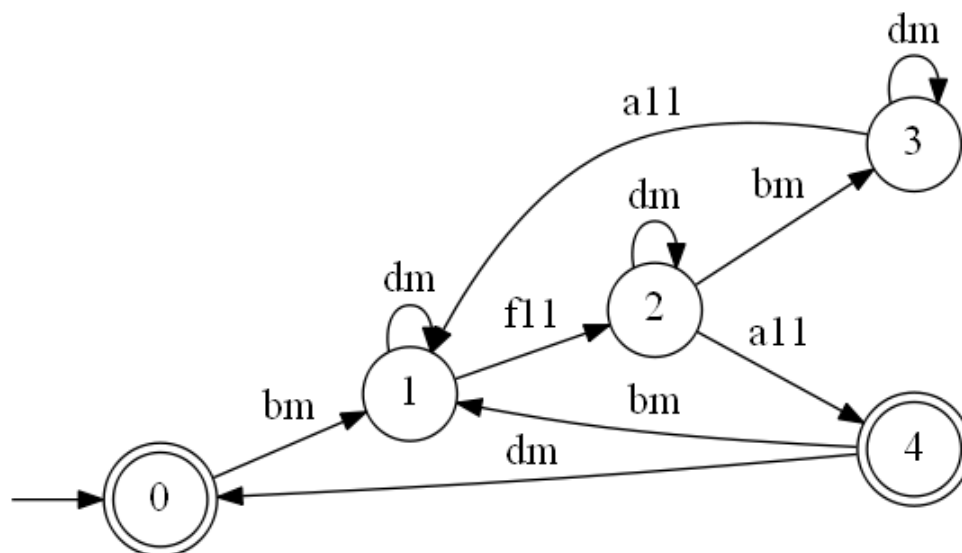


Figura 4.10 - Supervisor reduzido de Sup1

4.1.2 Modelagem da função de abrir o religador automático RA 52-09

Para modelar esta atividade de abertura do religador automático RA52-09 da operação de retirar o religador de operação é necessário considerar que a chave de by-pass ch 29-11 já foi fechada para não haver interrupção no fornecimento de energia já que a chave ch 29-11 fechada garante que o desligamento do RA 52-09 não interrompendo o fornecimento de energia.

A figura 4.11 apresenta o autômato que representa posição da chave de by-pass ch 29-11 do religador automático RA 52-09, a figura 4.12 apresenta o autômato que representa a posição do religador automático RA 52-09 e a figura 4.13 apresenta o autômato que representa o modo de operação do religador automático RA 52-09. É necessário realizar a composição síncrona entre o autômato da posição da chave ch 29-11, da posição do religador automático RA 52-09 e do modo de operação do religado automático RA 52-09 para determinar a planta G conforme figura 4.14.

Autômato da Ch 29-11 (by-pass do religador RA52-09) = G2

Eventos: Abrir = a11, Fechar = f11,

Estados: Aberto = 0, Fechado = 1

$G2 = \{X, \Sigma, f, X0, Xm\}$

$X = \{0,1\}$; $\Sigma = \{a11, f11\}$; $f = \{((0, f11) 1); ((1, a11) 0)\}$; $X0 = \{0\}$, $Xm = \{0\}$

G2:

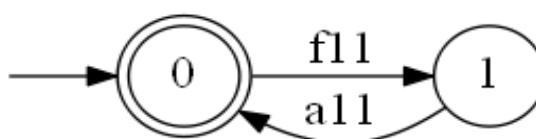


Figura 4.11 - Autômato G2

Autômato do Religador Automático RA 52-09 (posição) = G3

Eventos: Abrir = ap, Fechar = fp

Estados: Aberto = 0, Fechado = 1

$G3 = \{X, \Sigma, f, X0, Xm\}$

$X = \{0,1\}$; $\Sigma = \{ap,fp\}$; $f = \{((0, ap) 1); ((1, fp) 0)\}$; $X0 = \{0\}$; $Xm = \{0\}$

G3:

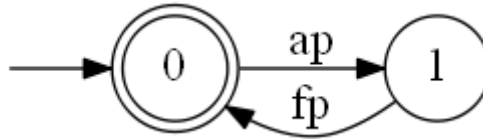


Figura 4.12 - Autômato G3

Autômato do Religador Automático RA 52-09 (modo) = G4

Eventos: Bloquear = bm, desbloquear = dm

Estados: Desbloqueado = 0, Bloqueado=1

 $G4 = \{X, \Sigma, f, X0, Xm\}$ $X = \{0, 1\}; \Sigma = \{bm, dm, \}; f = \{((0, bm) 1); ((1, dm) 0)\}; X0 = \{0\}; Xm = \{0\}$

G4:

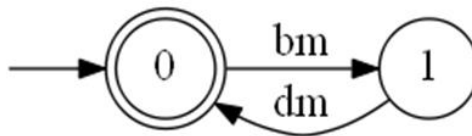


Figura 4.13 - Autômato G4

A planta local GB foi obtida através da composição síncrona entre os três autômatos $G2 \parallel G3 \parallel G4$ é apresentada na figura 4.14. Geralmente se refere a um conjunto de subsistemas independentes a fim de cumprir um determinado objetivo ainda não especificado, ou seja, é o comportamento do sistema sem nenhuma ação de controle, onde todos os eventos ocorrem livremente. A planta modela todos os comportamentos possíveis, inclusive os indesejáveis.

GB:

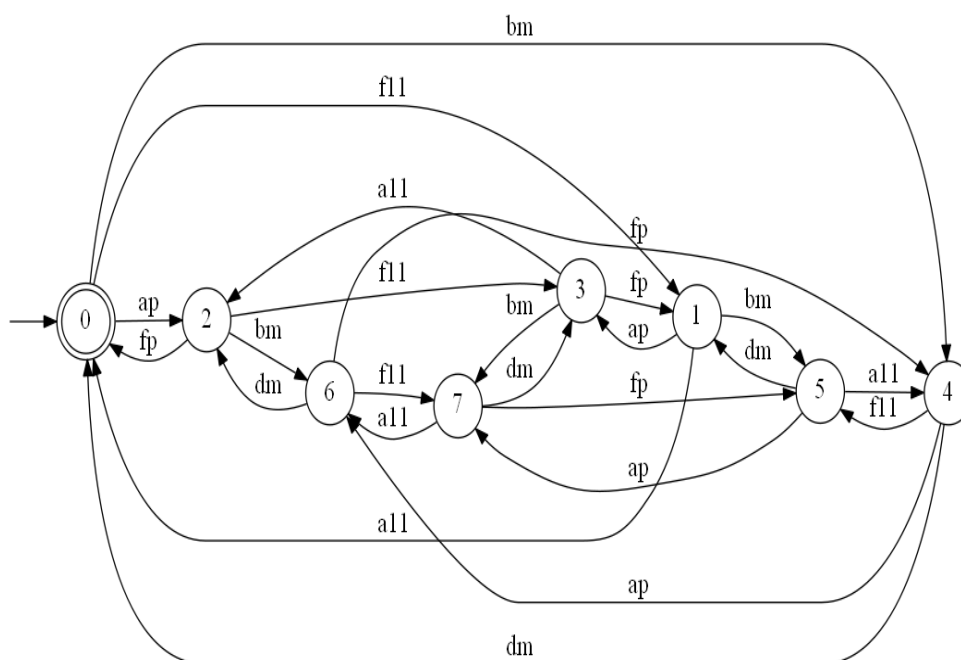


Figura 4.14 – Autômato planta GB

A Figura 4.15 representa a especificação de restrição para o comportamento desejado em que o supervisor tenha sobre a planta. A especificação E2 representa o comportamento em que para abrir o religador automático RA 52-09 a chave de by-pass ch 29-11 deve estar fechada assim como o modo de operação do religador automático 52-09 deve estar bloqueado contra religamento automático.

E2:

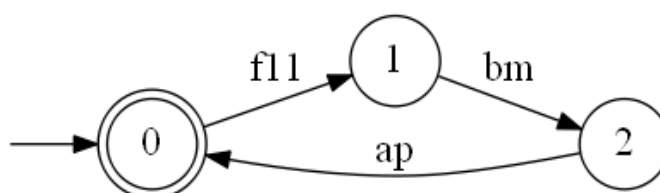


Figura 4.15 - Especificação de restrição E2

O autômato K2 representa a linguagem-alvo da modelagem.

Uma forma de se obter o autômato K2 para determinar linguagem-alvo é realizando a composição síncrona entre a planta GB e a especificação E2, isto é, $K2 = (GB \parallel E2)$.

É necessário determinar o autômato *trim* de K2, ou seja, o autômato *trim* é o que verifica se os estados do autômato são acessíveis e co-acessíveis e se linguagem de K2 atende ao especificado pelas linguagem de E2.

Conjunto dos eventos controláveis e não controláveis

$$\Sigma_c = \{fp, ap, bm, dm, fl1, a11\}$$

$$\Sigma_u = \{ \}$$

Após a determinação da planta local GB, restrição de comportamento E2 e linguagem-alvo K2, é possível calcular o supervisor local Sup2 que atue na planta desabilitando eventos e reduzindo estados garantindo uma solução minimamente restritiva e não bloqueante e que atenda às especificações de controle como apresenta a figura 4.16.

Sup2:

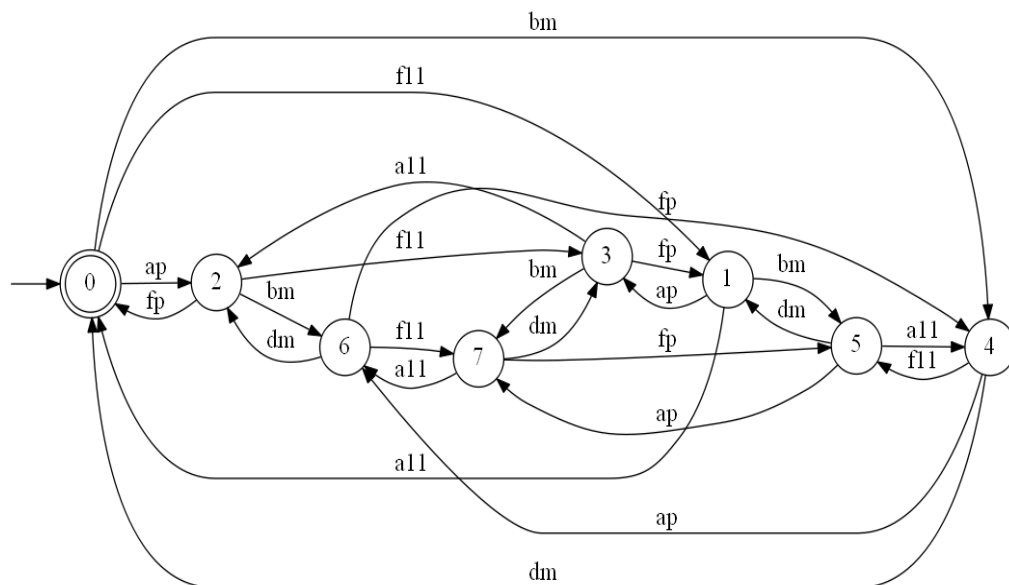


Figura 4.16 – Supervisor Sup2

A figura 4.17 apresenta o supervisor reduzido SR2 com o objetivo de diminuir a quantidade de estados do supervisor, mantendo sua ação de controle em relação a planta. Para que seja possível esta redução é necessário assegurar que o supervisor reduzido e o supervisor original garantam a mesma linguagem gerada e marcada.

SR2:

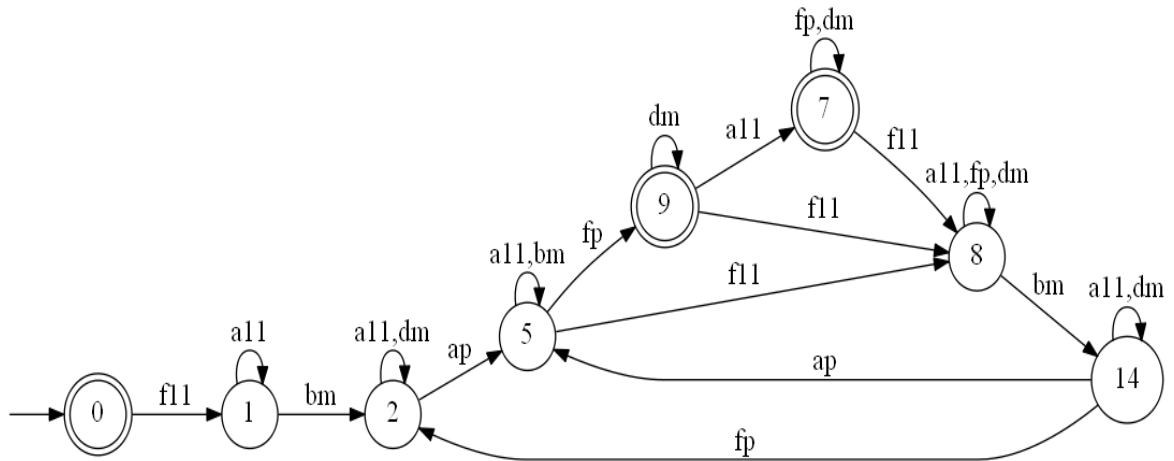


Figura 4.17 - Supervisor reduzido de Sup2

4.1.3 Modelagem da função de abrir a chave de saída ch 29-10

Para modelar a operação de abertura da chave ch 29-10 que é a chave seccionadora da saída do religador automático RA 52-09, é necessário considerar o religador RA 52-09 esteja aberto.

A figura 4.18 apresenta o autômato que representa a operação de abertura e fechamento do religador automático RA 52-09, ou seja, a posição do religador e a figura 4.19 apresenta o autômato da chave ch 29-10 que representa a posição da chave. A composição síncrona dos dois autômatos é necessária para determinar a planta G para cálculo do supervisor apresentado na figura 4.20.

Autômato do Religador Automático RA 52-09 (posição) = G3

Eventos: Abrir = ap, Fechar = fp

Estados: Aberto = 0, Fechado = 1

$G3 = \{X, \Sigma, f, X0, Xm\}$

$X = \{0, 1\}; \Sigma = \{ap, fp\}; f = \{((0, ap) 1); ((1, fp) 0)\}; X0 = \{0\}; Xm = \{0\}$

G3:

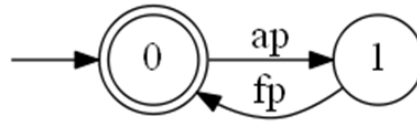


Figura 4.18 - Autômato G3

Autômato da Ch 29-08 (chave de saída do religador RA52-09) = G5

Eventos: Abrir = a10, Fechar = f10

Estados: Aberto = 0, Fechado = 1

 $G5 = \{X, \Sigma, f, X0, Xm\}$ $X = \{0, 1\}; \Sigma = \{a10, f10\}; f = \{(0, a10) 1\}; \{(1, f10) 0\}; X0 = \{0\}, Xm = \{0\}$

G5:

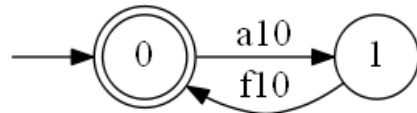


Figura 4.19 - Autômato G5

A figura 4.20 apresenta a planta local GC obtida através da composição síncrona entre os autômatos G3||G5. Geralmente se refere a um conjunto de subsistemas independentes a fim de cumprir um determinado objetivo ainda não especificado, ou seja, é o comportamento do sistema sem nenhuma ação de controle, onde todos os eventos ocorrem livremente. A planta modela todos os comportamentos possíveis, inclusive os indesejáveis.

GC:

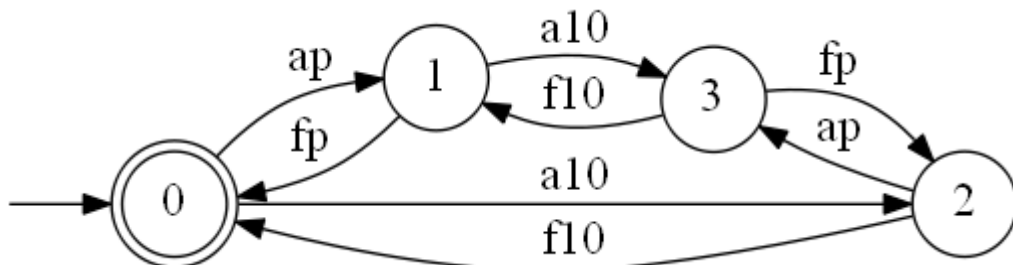


Figura 4.20 - Planta GC

A figura 4.21 representa a especificação de restrição para o comportamento desejado em que o supervisor tenha sobre a planta. A especificação E3 representa o comportamento em

que para abrir a chave ch 29-11 de saída do religador automático RA 52-09, o religador deve estar aberto, ou seja, fora de operação. É necessário construir um autômato que represente esta especificação de restrição para o comportamento desejado.

E3:

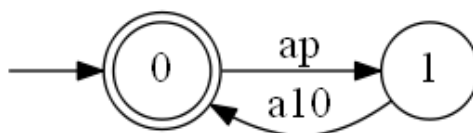


Figura 4.21 - Especificação de restrição E3

O autômato K3 da figura 4.22 representa a linguagem-alvo da modelagem.

Uma forma de se obter o autômato K3 para determinar linguagem-alvo é realizando a composição síncrona entre a planta GC e a especificação E3, isto é, $K3 = (GC||E3)$.

É necessário determinar o autômato *trim* de K3, ou seja, o autômato *trim* é o que verifica se os estados do autômato são acessíveis e co-acessíveis e se linguagem de K3 atende ao especificado pelas linguagem de E3.

K3:

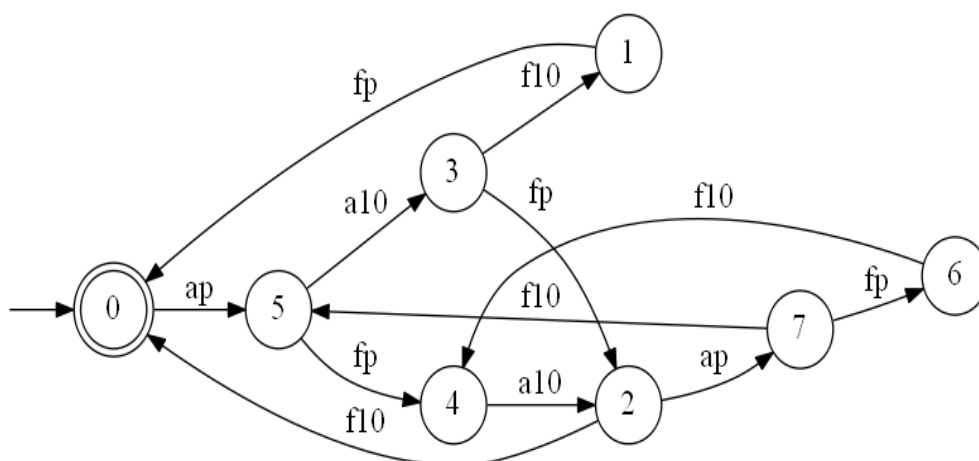


Figura 4.22 – Autômato K3 = GC||E3

Conjunto dos eventos controláveis e não controláveis

$$\Sigma_c = \{fp, ap, a10, f10\}$$

$$\Sigma_u = \{ \}$$

Após a determinação da planta local GC, restrição de comportamento E3 e linguagem-alvo K3, é possível calcular o supervisor local Sup3 que atue na planta desabilitando eventos e reduzindo estados garantindo uma solução minimamente restritiva e não bloqueante e que atenda às especificações de controle como apresenta a figura 4.23.

Sup3:

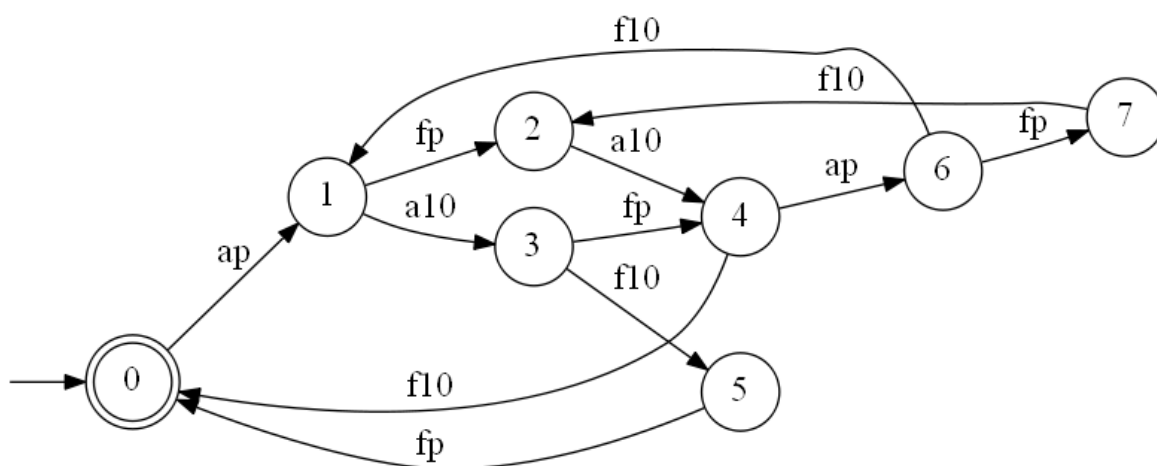


Figura 4.23 – Supervisor Sup3

A figura 4.24 apresenta o supervisor reduzido com o objetivo de diminuir a quantidade de estados do supervisor, mantendo sua ação de controle em relação a planta. Para que seja possível esta redução é necessário assegurar que o supervisor reduzido e o supervisor original garantam a mesma linguagem gerada e marcada.

SR3:

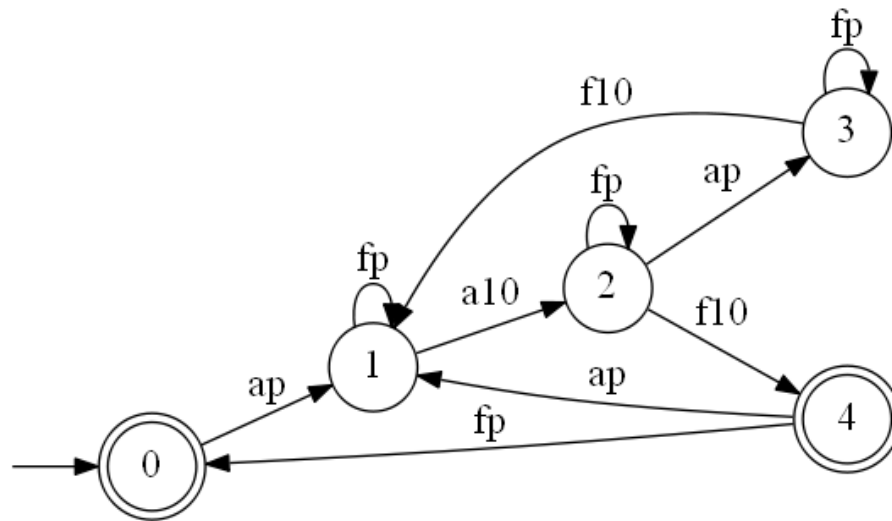


Figura 4.24 - Supervisor reduzido SR3

4.1.4 Modelagem da função de abrir a chave de entrada ch 29-08

Para modelar a operação de abertura da chave ch 29-08 que é a chave seccionadora da entrada do religador automático RA 52-09, é necessário considerar o religador RA 52-09 esteja aberto.

A figura 4.25 apresenta o autômato que representa a operação de abertura e fechamento do religador automático RA 52-09, ou seja, a posição do religador e a figura 4.26 apresenta o autômato da chave ch 29-08 que representa a posição da chave. A composição síncrona dos dois autômatos é necessária para determinar a planta G para cálculo do supervisor

Autômato do Religador Automático RA 52-09 (posição) = G3

Eventos: Abrir = ap, Fechar = fp

Estados: Aberto = 0, Fechado = 1

$G3 = \{X, \Sigma, f, X0, Xm\}$

$X = \{0, 1\}; \Sigma = \{ap, fp\}; f = \{((0, ap) 1); ((1, fp) 0)\}; X0 = \{0\}; Xm = \{0\}$

G3:

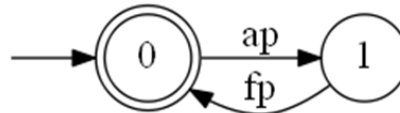


Figura 4.25 – Autômato G3

Autômato da Ch 29-08 (chave de entrada religador RA52-09) = G6

Eventos: Abrir = a08, Fechar = f08

Estados: Aberto = 0, Fechado = 1

$G6 = \{X, \Sigma, f, X0, Xm \}$

$X = \{0,1\}; \Sigma = \{a08,f08\}; f = \{((0, a08) 1); ((1, f08)0)\}; X0 = \{0\}, Xm = \{0\}$

G6:

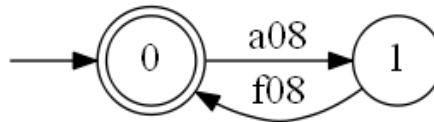


Figura 4.26 - Autômato G6

A figura 4.27 apresenta a planta local GD obtida através da composição síncrona entre os autômatos G3||G6. Geralmente se refere a um conjunto de subsistemas independentes a fim de cumprir um determinado objetivo ainda não especificado, ou seja, é o comportamento do sistema sem nenhuma ação de controle, onde todos os eventos ocorrem livremente. A planta modela todos os comportamentos possíveis, inclusive os indesejáveis.

GD:

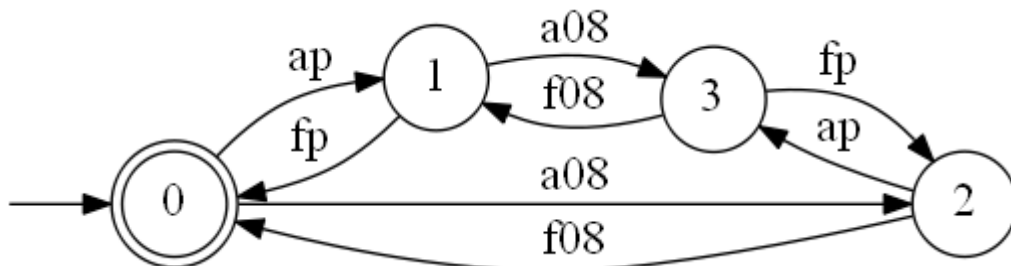


Figura 4.27- Autômato da Planta GD

A figura 4.28 representa a especificação de restrição para o comportamento desejado em que o supervisor tenha sobre a planta. A especificação E4 representa o comportamento em que para abrir a chave ch 29-08 de entrada do religador automático RA 52-09, o religador

deve estar aberto, ou seja, fora de operação e para isso é necessário que construir um autômato que represente esta especificação de restrição para o comportamento desejado.

E4:



Figura 4.28 - Especificação de restrição E4

O autômato K4 da figura 4.29 representa a linguagem-alvo da modelagem.

Uma forma de se obter o autômato K4 para determinar linguagem-alvo é realizando a composição síncrona entre a planta GD e a especificação E4, isto é, $K4 = (GD||E4)$.

É necessário determinar o autômato trim de K4, ou seja, o autômato trim é o que verifica se os estados do autômato são acessíveis e co-acessíveis e se linguagem de K4 atende ao especificado pelas linguagem de ED.

K4:

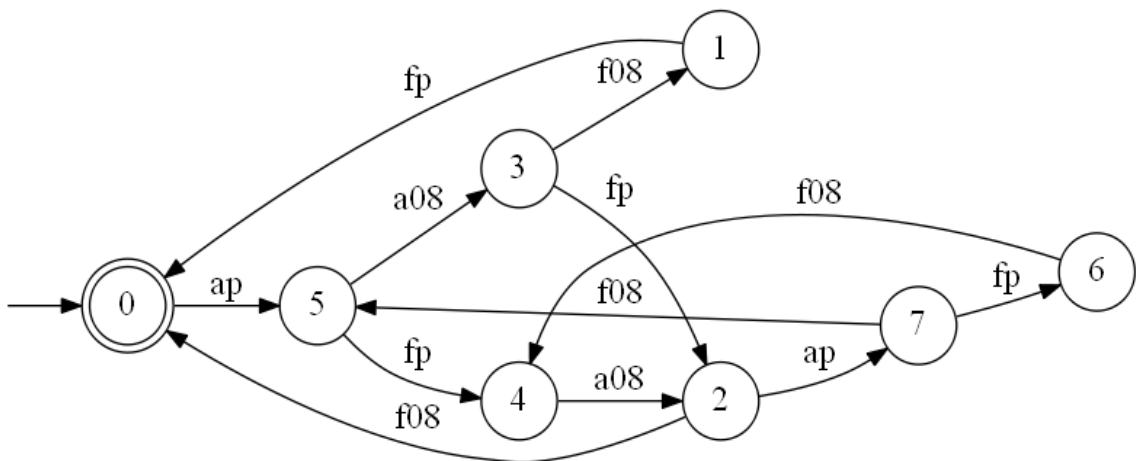


Figura 4.29 - Autômato $K=GD||E4$

Conjunto dos eventos controláveis e não controláveis

$$\Sigma_c = \{fp, ap, a08, f08\}$$

$$\Sigma_u = \{ \}$$

Após a determinação da planta local GD, restrição de comportamento E4 e linguagem-alvo K4, é possível calcular o supervisor local Sup4 que atue na planta desabilitando eventos e reduzindo estados garantindo uma solução minimamente restritiva e não bloqueante e que atenda às especificações de controle como apresenta a figura 4.30.

Sup4:

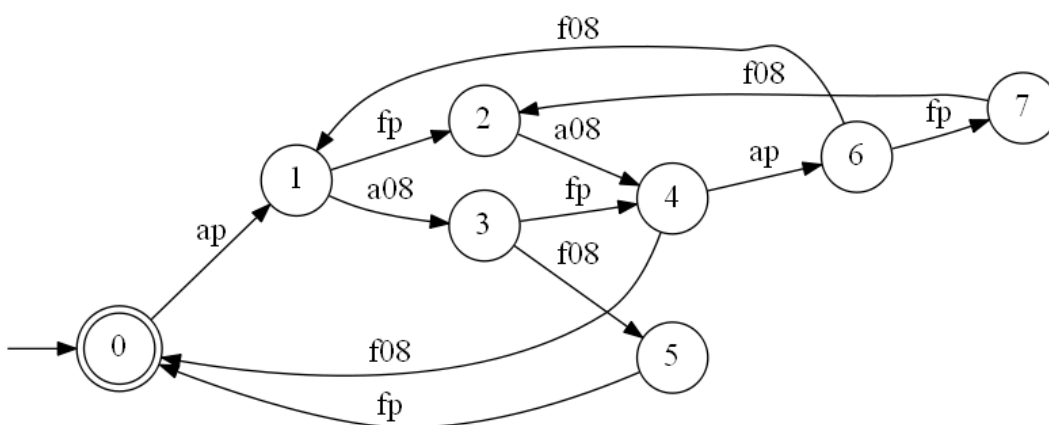


Figura 4.30 - Supervisor Sup4

A figura 4.31 apresenta o supervisor reduzido SR4 com o objetivo de diminuir a quantidade de estados do supervisor, mantendo sua ação de controle em relação a planta. Para que seja possível esta redução é necessário assegurar que o supervisor reduzido e o supervisor original garantam a mesma linguagem gerada e marcada.

SR4:

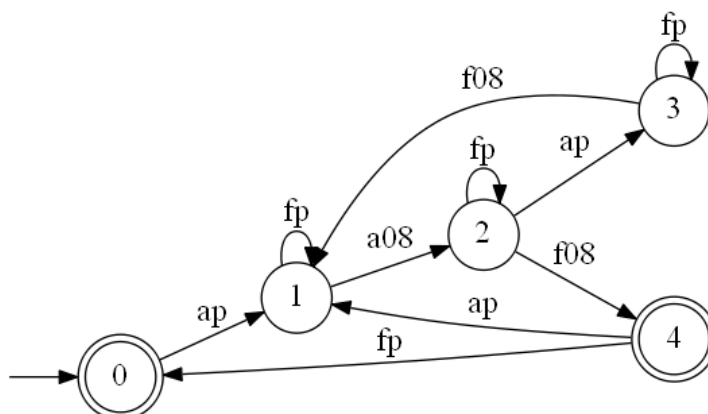


Figura 4.31 – Supervisor Reduzido de SR4

Na seção seguinte será modelado a operação de inversão de fluxo sem interrupção no fornecimento de energia, através da TCS.

4.2 MODELAGEM DA OPERAÇÃO INVERSÃO DE FLUXO SEM INTERRUPÇÃO NO FORNECIMENTO DE ENERGIA, DA FONTE A PARA A FONTE B.

A operação de inversão de fluxo de energia da fonte A para a fonte B é uma sequência de operações que deve ser seguida, para que a modelagem seja eficaz. Esta operação foi modelada utilizando como base a abordagem monolítica da teoria de controle supervisorio apresentada na subseção 2.4.5.

A operação de inversão de fluxo de energia da fonte A para a fonte B é utilizada quando o barramento da subestação esta sendo alimentado por uma fonte A e é necessário inverter a fonte alimentadora por uma fonte B. Esta operação é realizada em uma sequência de passos com ocorrência de eventos para mudança de estados envolvidos nesta modelagem.

A figura 4.32 apresenta o barramento sendo alimentado com o fluxo de energia da fonte A para a fonte B

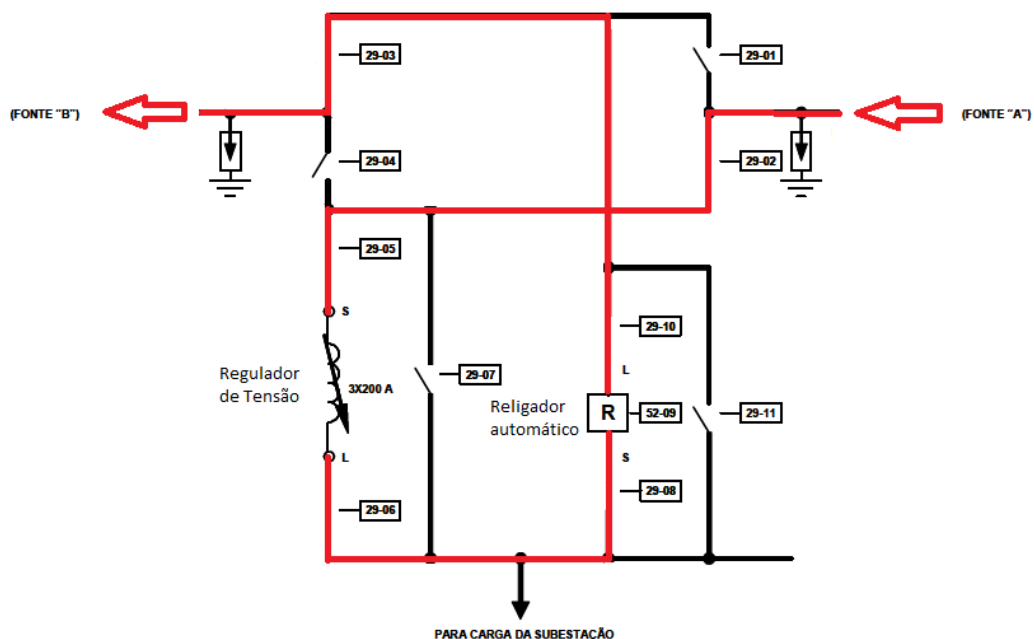


Figura 4.32 – Barramento da subestação sendo alimentado com o fluxo de energia da fonte A para a fonte B

Fonte: (MIT160808, 2010)

As operações a seguir das seções 4.2.1 a 4.2.5 apresentam os autômatos dos supervisores modelados pela TCS com funções que fazem parte da operação de inversão de fluxo sem interrupção de energia da fonte A para a fonte B e de B para A com e sem interrupção de energia. Estas modelagens estarão inseridas em forma de bloco na figura 4.50 da seção 4.2.7 onde será apresentado o modelo para esta operação.

A sequência de operação da inversão de fluxo sem interrupção de energia da fonte A para a fonte B é apresentada a seguir:

- Fonte A alimentando o barramento da subestação (estado inicial);
- Bloquear religador automático da fonte que esta alimentando o barramento;
- Retirar o regulador de tensão de operação;
- Abrir as seccionadoras ch 29-05 e ch 29-06 de entrada e saída do regulador de tensão;
- Bloquear o religador automático RA 52-09;
- Fechar o religador da fonte B em paralelo;
- Abrir o religador da fonte A;
- Retirar de operação o religador automático RA 52-09;

- Abrir as seccionadoras ch 29-08 e ch 29-10 de entrada e saída do religador automático RA 52-09;
- Manobrar as chaves do barramento da fonte A para a fonte B;
- Colocar em operação o religador automático RA 52-09;
- Fechar as seccionadoras ch 29-05 e ch 29-06 de entrada e saída do regulador de tensão;
- Colocarem operação o regulador de tensão;
- Bloquear religador automático da fonte que esta alimentando o barramento;
- Fonte B alimentando o barramento da subestação (estado final).

4.2.1 Modelagem da função de retirar de operação o regulador de tensão de 34,5 kV sem interrupção de energia.

Seguindo os passos da modelagem da seção 4.1 porém com a abordagem monolítica da TCS, ou seja, abordagem onde a composição síncrona de todos os subsistemas forma uma planta e tendo uma restrição de comportamento definida, o supervisor age na planta para que desabilite eventos controláveis, reduzindo estados e garantindo uma solução minimamente restritiva e não bloqueante, o autômato da figura 4.33 representa a operação de retirar de operação o regulador de tensão 34.5kV, apresentado na forma de supervisor reduzido.

A sequência da função de retirar de operação o regulador de tensão de 34,5kV sem interrupção de energia é apresentada a seguir:

- Executar o zeramento do banco regulador de tensão;
- Desligar os painéis de comando do banco regulador de tensão;
- Fechar a chave de by-pass ch 29-11.

representa a função de retirar de operação o religador automático RA 52-09 e este autômato é um supervisor reduzido.

Esta função é detalhada da seguinte forma:

- Fechar a chave de by-pass ch 29-11;
- Abrir o religador automático RA 52-09.

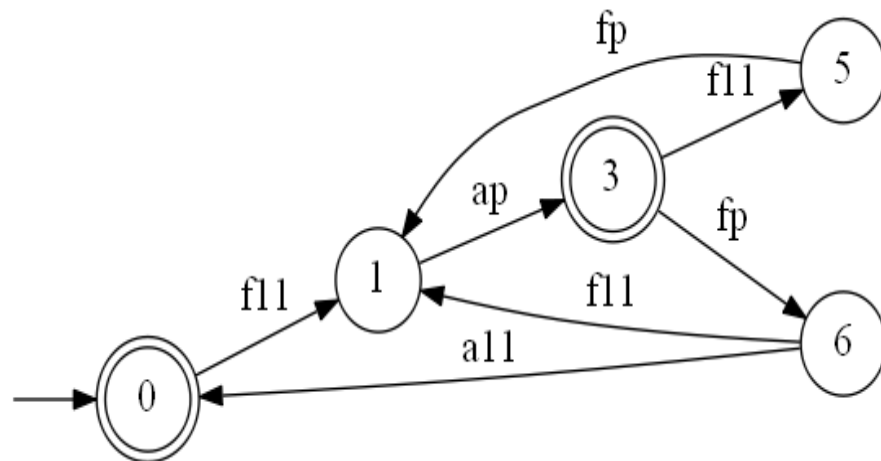


Figura 4.34 – Supervisor da modelagem de retirar de operação religador automático RA 52-09

4.2.3 Modelagem da função de manobrar chaves do barramento em anel da fonte A para a fonte B.

Seguindo os passos da modelagem da seção 4.1 e com a abordagem monolítica da teoria de controle supervisorio, ou seja, abordagem onde a composição síncrona de todos os subsistemas forma uma planta e tendo uma restrição de comportamento definida, o supervisor age na planta para que desabilite eventos controláveis, reduzindo estados e garantindo uma solução minimamente restritiva e não bloqueante, o autômato da figura 4.35 representa a

função de manobrar chaves do barramento em anel da fonte A para a fonte B e este autômato é um supervisor reduzido.

Esta operação é detalhada da seguinte forma:

- Fechar a chave ch 29-01;
- Abrir a chave ch 29-02;
- Fechar a chave ch 29-04;
- Abrir a chave ch 29-03.

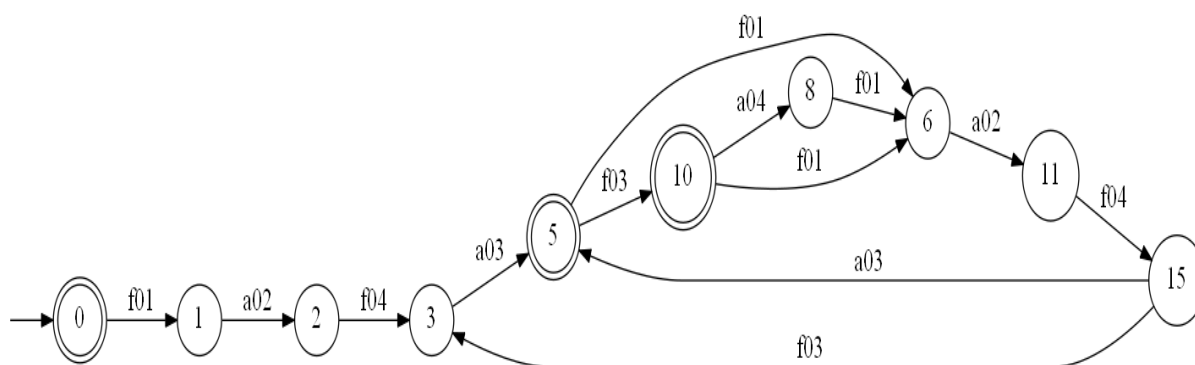


Figura 4.35 – Supervisor da modelagem de manobrar chaves do barramento em anel da fonte A para a fonte B

4.2.4 Modelagem da função de colocar em operação o religador automático RA 52-09 sem interrupção de energia

Seguindo os passos da modelagem da seção 4.1 e com a abordagem monolítica da teoria de controle supervisorío, ou seja, abordagem onde a composição síncrona de todos os subsistemas forma uma planta e tendo uma restrição de comportamento definida, o supervisor age na planta para que desabilite eventos controláveis, reduzindo estados e garantindo uma solução minimamente restritiva e não bloqueante, o autômato da figura 4.36 representa a operação de colocar em operação o religador automático RA 52-09 sem interrupção de energia e este autômato é um supervisor reduzido.

Esta operação é detalhada da seguinte forma:

- Fechar a chave de saída do religador automático ch 29-08;
- Fechar a chave de entrada do religador automático ch 29-10;
- Fechar o religador automático RA 52-09;
- Abrir a chave de by-pass do religador automático ch 29-11.

Posteriormente na figura 4.39 esta operação estará incluída na modelagem na forma de blocos da operação de inversão de fluxo de energia do lado A para o lado B que alimenta o barramento em anel de 34,5 kV.

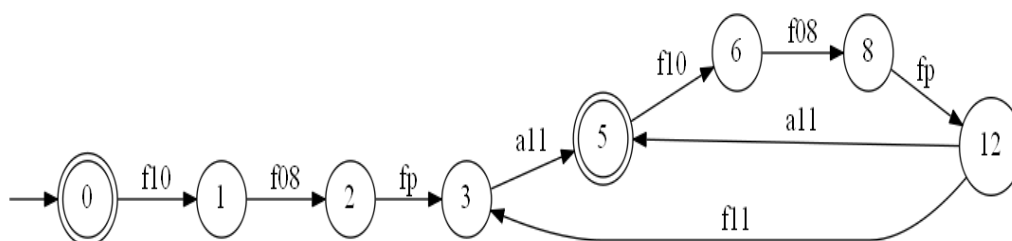


Figura 4.36 – Supervisor da modelagem de colocar em operação o religador automático RA 52-09

4.2.5 Modelagem da função de colocar em operação o regulador de tensão de 34,5 kV sem interrupção de energia.

Seguindo os passos da modelagem da seção 4.1 e com a abordagem monolítica da teoria de controle supervisorio, ou seja, abordagem onde a composição síncrona de todos os subsistemas forma uma planta e tendo uma restrição de comportamento definida, o supervisor age na planta para que desabilite eventos controláveis, reduzindo estados e garantindo uma solução minimamente restritiva e não bloqueante, o autômato da figura 4.38 representa a operação de colocar em operação o regulador de tensão de 34,5 kV sem interrupção de energia e este autômato é um supervisor reduzido.

Esta operação tem a sequência da seguinte forma:

- Ligar painéis de comando do regulador de tensão;
- Energizar o banco do regulador de tensão;
- Abrir a chave de by-pass do regulador de tensão ch 29-07.

Posteriormente na figura 4.39 esta operação estará incluída na modelagem na forma de blocos da operação de inversão de fluxo de energia do lado A para o lado B que alimenta o barramento em anel de 34,5 kV.

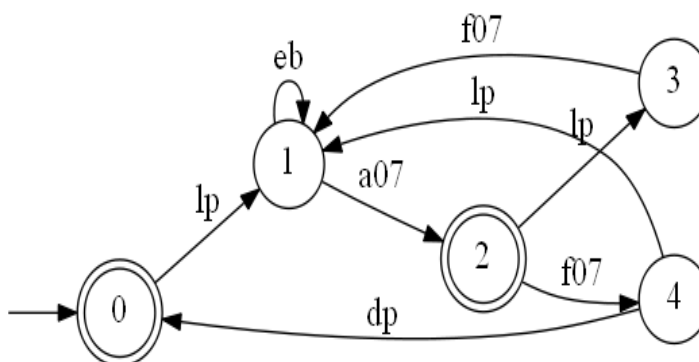


Figura 4.37 - Supervisor da modelagem de colocar em operação o regulador de tensão 34.5kV

4.2.6 Sequência de operação para modelagem de inversão de fluxo sem interrupção de energia da fonte A para a fonte B.

Para realizar esta operação, inicialmente tem-se o sistema sendo energizado com o fluxo de energia da fonte A para a fonte B. A partir desta condição uma sequência de operações é executada para que o fluxo de energia ocorra da fonte A para a fonte B. Esta sequência é apresentada em 13 passos como a seguir.

O primeiro passo da operação é bloquear o religador automático da fonte de alimentação do barramento de 34.5 kV, este bloqueio garante que durante esta operação não haverá religamento indesejado como apresenta a figura 4.38.

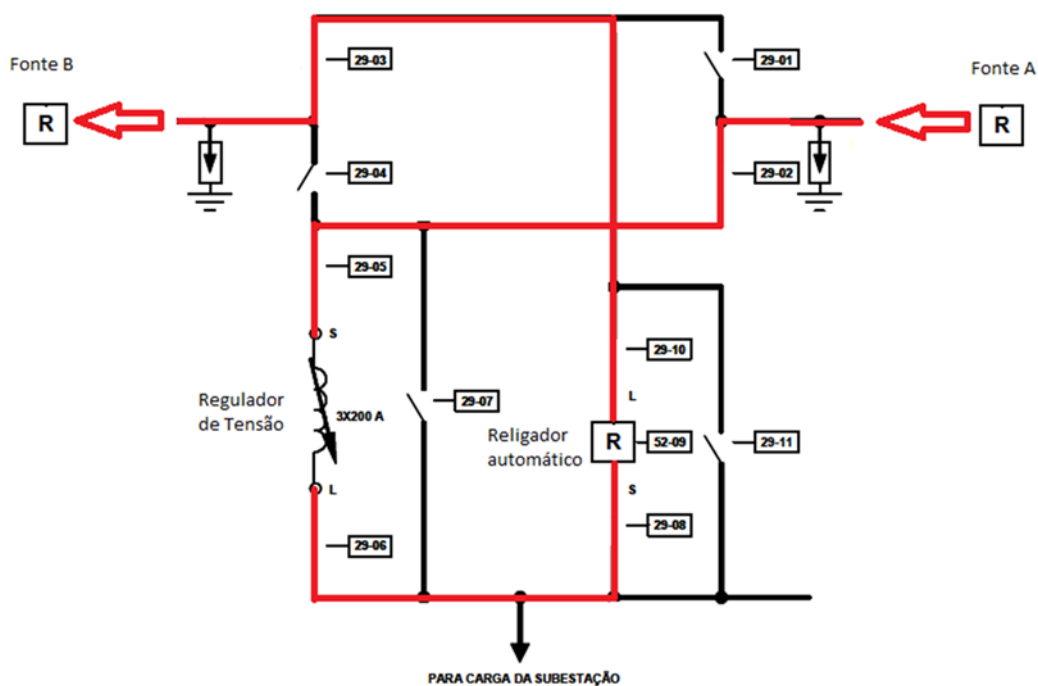


Figura 4.38 – Religador fonte bloqueado

O segundo passo da operação é retirar de operação o regulador de tensão de 34,5kV como apresenta a figura 4.39 fechando a chave de by-pass ch 29-07 e desligando o regulador de tensão. Esta operação foi modelada pela seção 4.2.1 onde um supervisor foi gerado pela teoria da TCS conforme a figura 4.33 apresentou.

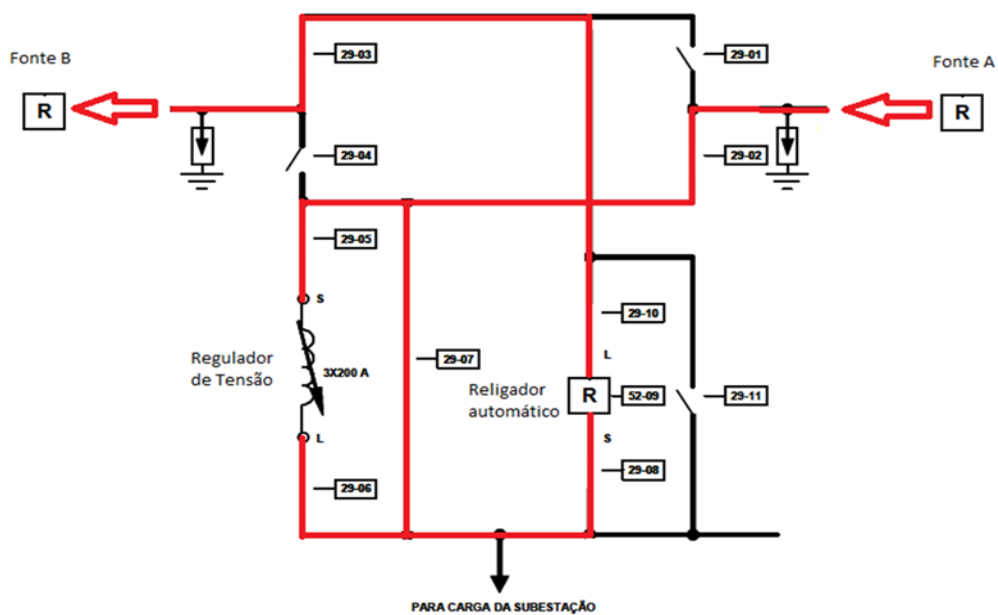


Figura 4.39 – Regulador de tensão bloqueado

O terceiro passo da operação é abrir as chaves seccionadoras de entrada e saída do regulador de tensão ch 29-05 e ch 29-06 uma vez que o regulador de tensão está desligado e o fluxo de energia está pelo by-pass. A figura 4.40 apresenta esta operação.

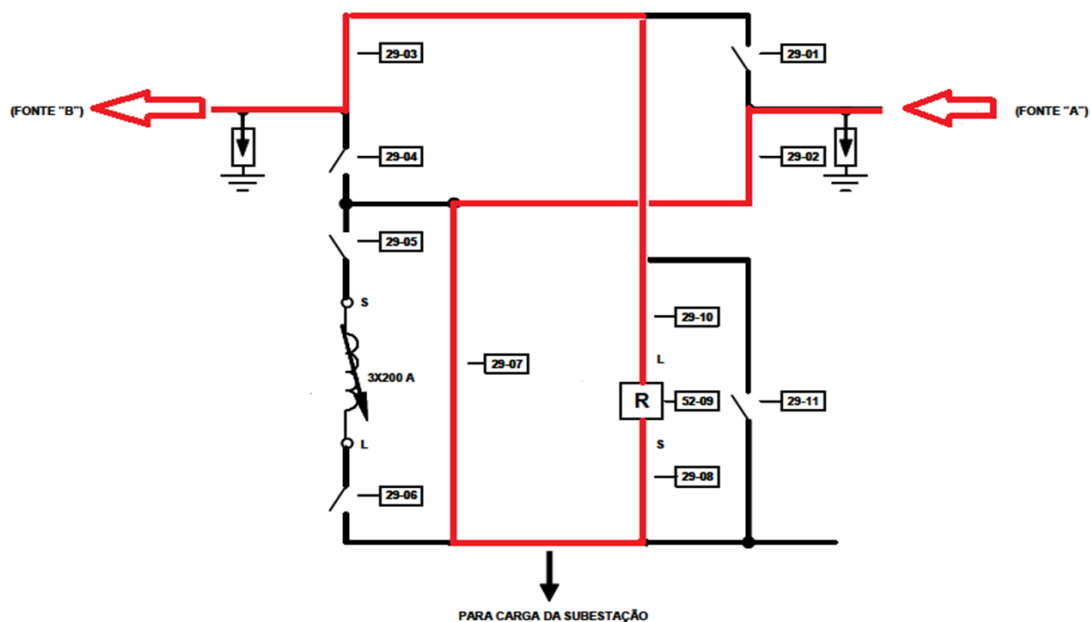


Figura 4.40 – Seccionadoras do regulador de tensão abertas

O quarto passo da operação é bloquear o religador automático RA 52-09 contra religamento automático como apresenta a figura 4.41, este bloqueio garante que durante esta operação não haverá religamento indesejado. Esta operação foi modelada pela seção 4.2.2 onde um supervisor foi gerado pela teoria da TCS conforme apresentado pela figura 4.34.

O quinto passo da operação é fechar em paralelo o religador automático fonte para que por um período de tempo o barramento seja alimentado tanto pela fonte A como pela fonte B. A figura 4.41 também apresenta esta etapa da operação.

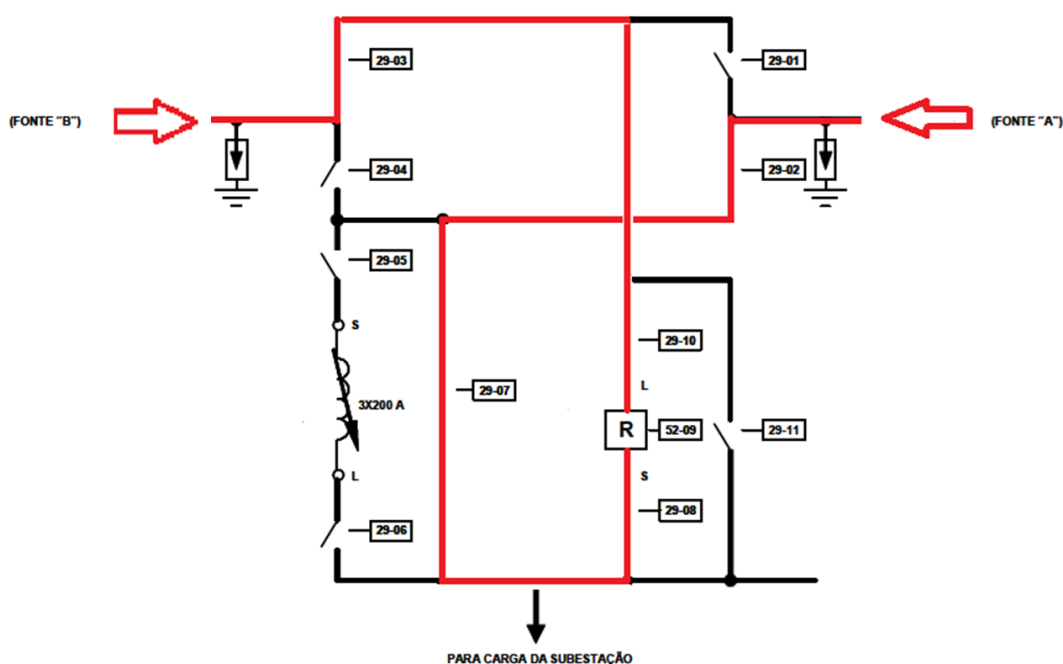


Figura 4.41 – RA 52-09 bloqueado e Religador fonte B alimentando o barramento

O sexto passo da operação é abrir o religador automático da fonte A para que o barramento seja alimentado somente pela fonte B como pela fonte B. A figura 4.42 apresenta esta etapa da operação.

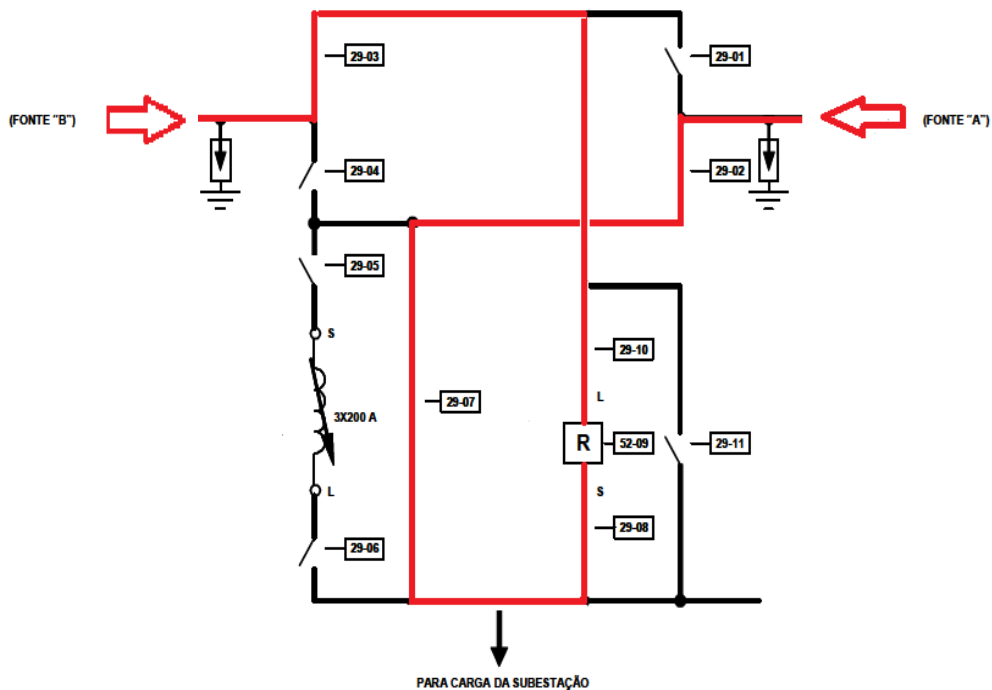


Figura 4.42 – Religador fonte A aberto

O sétimo passo da operação é retirar de operação o religador automático RA 52-09 como apresenta a figura 4.43. Esta operação foi modelada pela seção 4.2.3 onde um supervisor foi gerado pela teoria da TCS conforme apresentado pela figura 4.35.

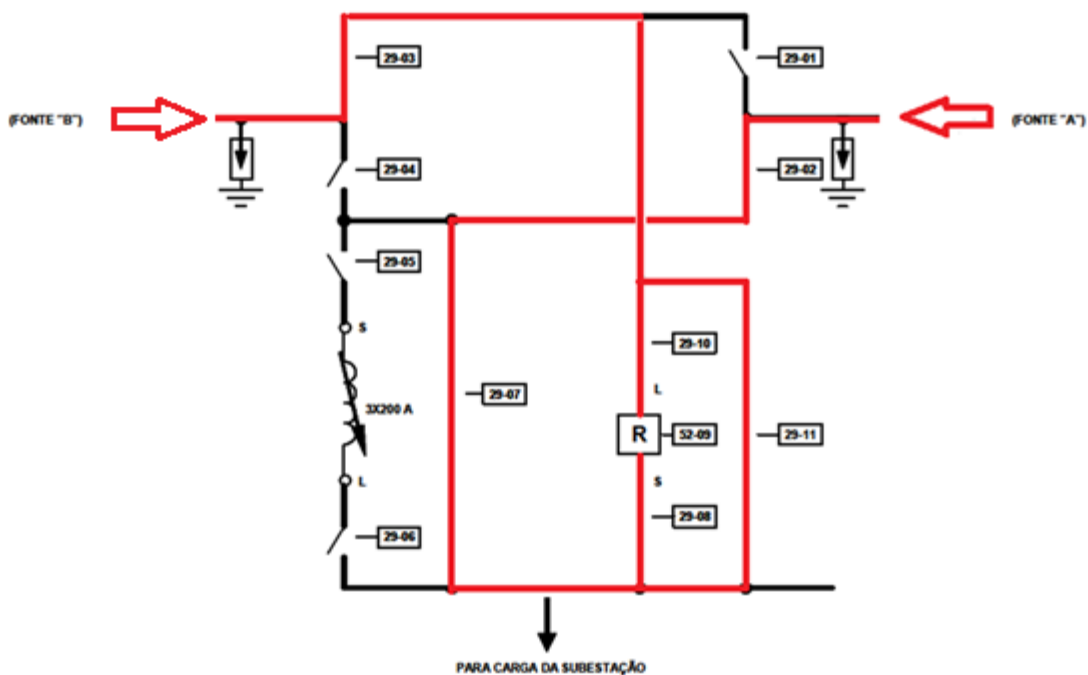


Figura 4.43 – Religador RA 52-09 fora de operação

O oitavo passo da operação é abrir as chaves seccionadoras de entrada ch 29-08 e saída ch 29-10 do religador automático RA 52-09, uma vez que o religador esta desligado e o fluxo de energia esta pelo by-pass. A figura 4.44 apresenta esta operação.

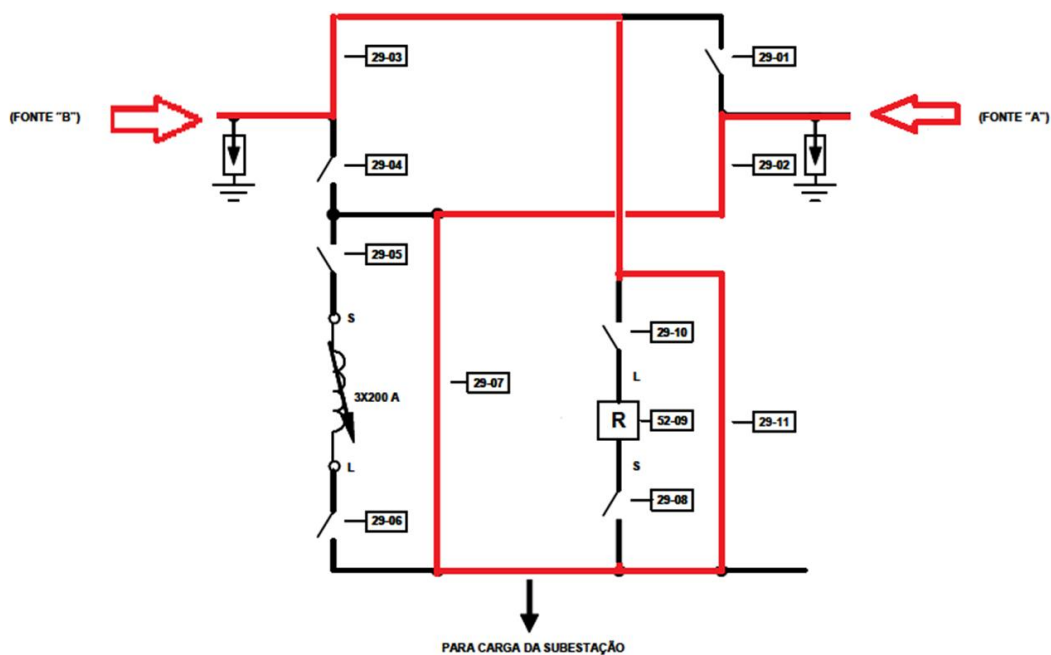


Figura 4.44 – Seccionadoras do RA 52-09 abertas

O nono passo da operação é manobrar as chaves seccionadoras do barramento em anel da subestação, realizando o fechamento das chaves ch 29-01 e ch 29-04 como apresenta a figura 4.45 o que resulta em todas as chaves do barramento fechadas por um determinado período de tempo até que as chaves ch 29-02 e ch 29-03 que estavam fechadas desde o início da operação sejam abertas como apresenta a figura 4.46 apresenta esta operação.

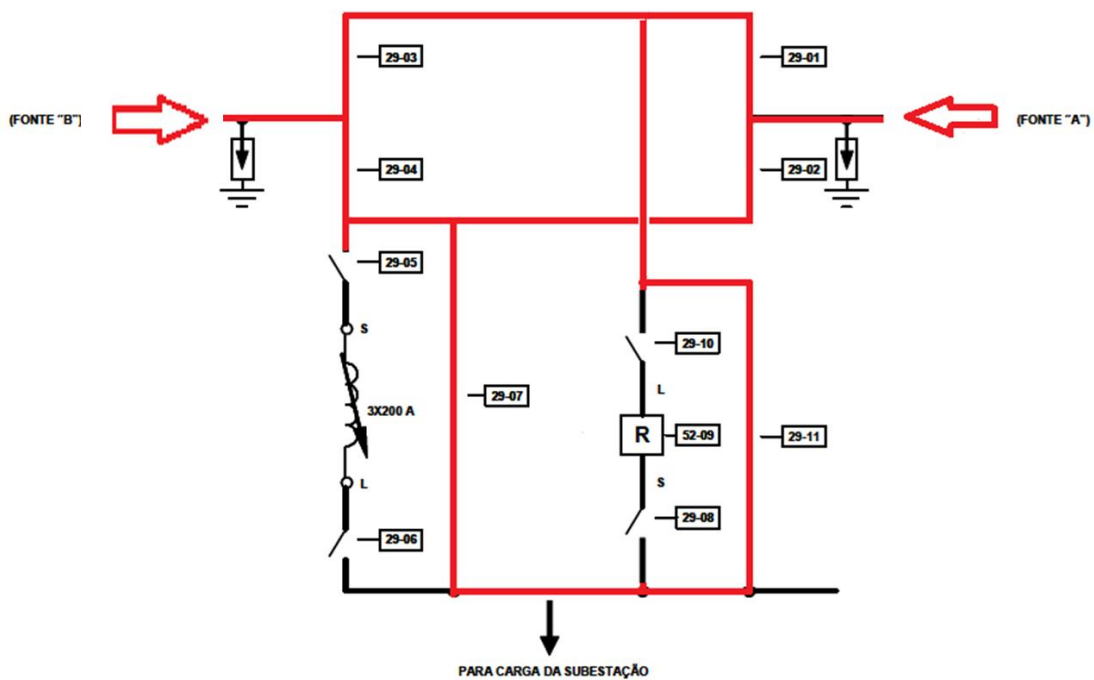


Figura 4.45 – Chaves ch 29-01, ch 29-02, ch 29-03 e ch29-04 fechadas em paralelo

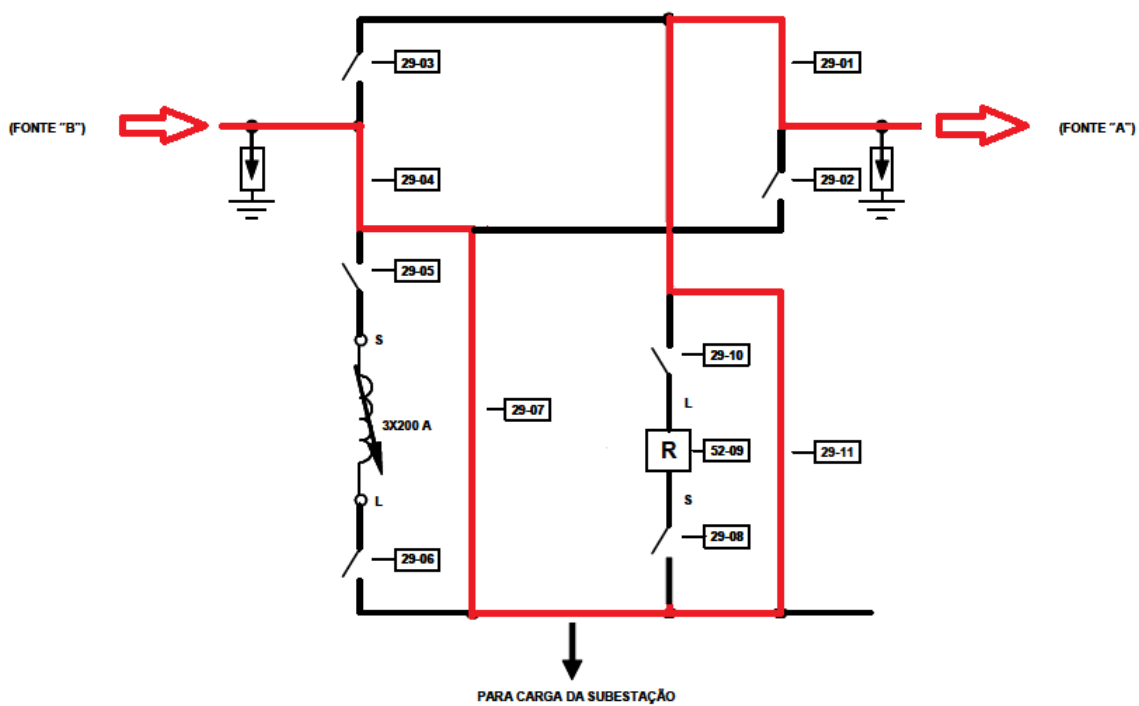


Figura 4.46 – chaves ch 29-02 e ch 29-03 abertas

Após esta sequência de operação o sistema estará com o fluxo de energia invertido do lado B para o lado A, porém os equipamentos continuam operando pelo by-pass de forma que é necessário que reestabeleça sua função normal de operação. Os passos seguintes apresentam este reestabelecimento.

O décimo passo da operação é colocar em operação o religador automático RA 52-09 como apresenta a figura 4.47. Esta operação foi modelada pela subseção 4.2.4 onde um supervisor foi gerado pela teoria da TCS conforme apresentado pela figura 4.36.

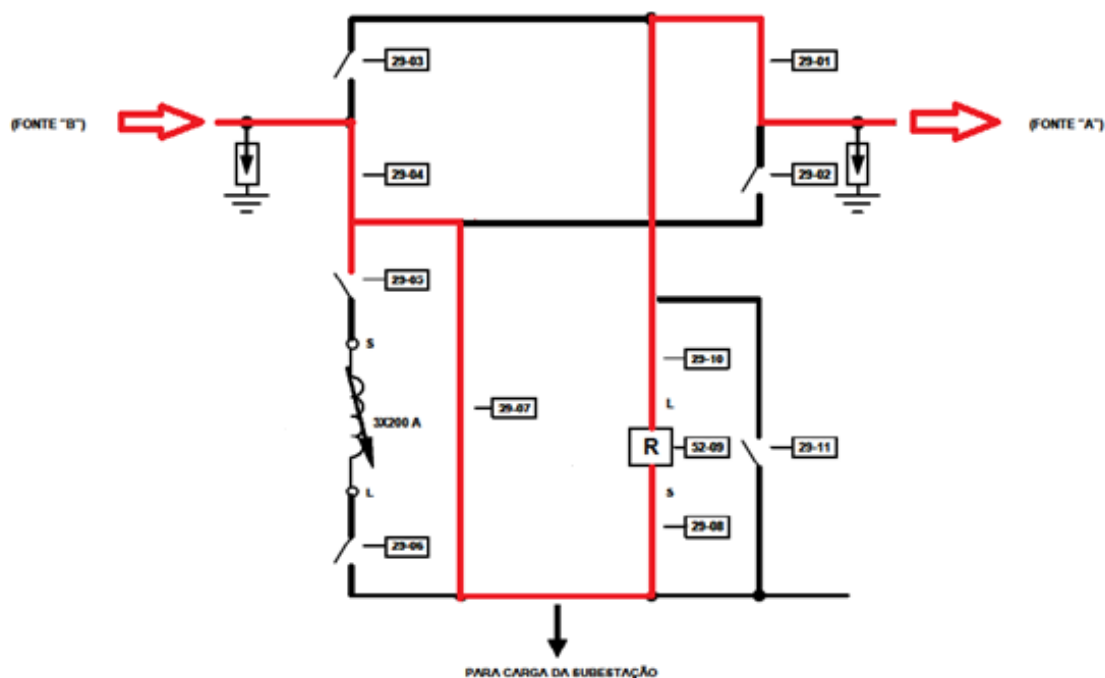


Figura 4.47 – Religador RA 52-09 em operação

O décimo primeiro passo da operação é fechar as chaves seccionadoras de entrada e saída do regulador de tensão ch 29-05 e ch 29-06 para que o mesmo seja colocado em operação como o próximo passo apresenta. A figura 4.48 apresenta esta operação.

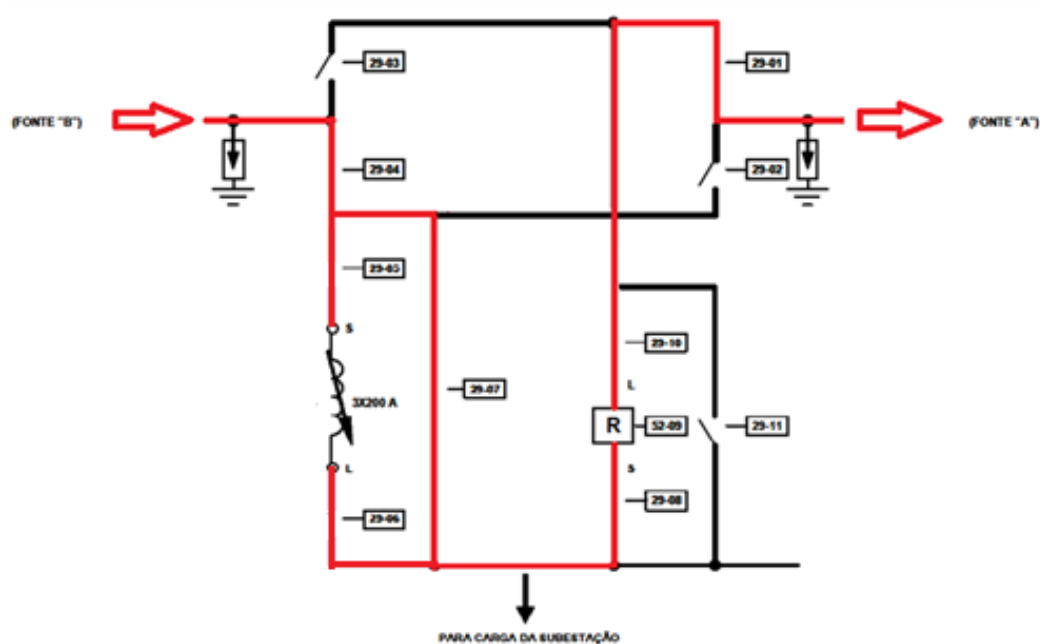


Figura 4.48 – Seccionadoras do regulador de tensão fechadas

O décimo segundo passo da operação é colocar em operação o regulador de tensão de 34,5kV como apresenta a figura 4.49 ligando o regulador de tensão e abrindo a chave de by-pass ch 29-07 . Esta operação foi modelada pela subseção 4.2.5 onde um supervisor foi gerado pela teoria da TCS conforme apresentado pela figura 4.37.

O décimo terceiro e último passo da operação é desbloquear o religador automático fonte, este desbloqueio garante que a normalidade da operação em caso de qualquer evento indesejado como apresentado também pela figura 4.49.

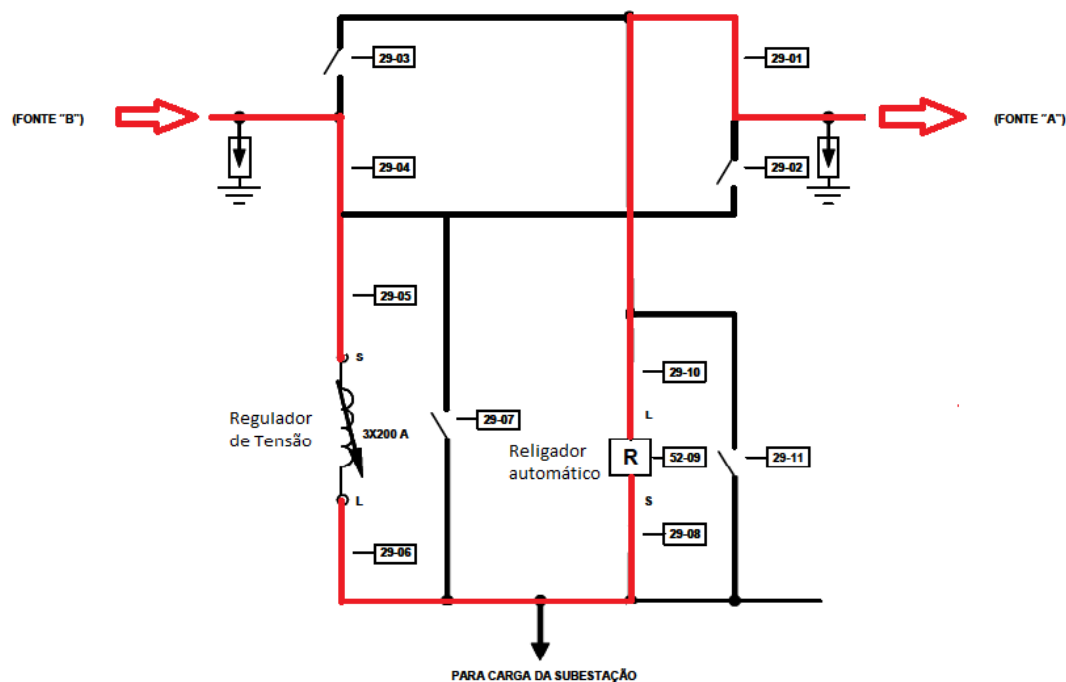


Figura 4.49 – Regulador de Tensão em operação

4.2.7 Autômato da modelagem de inverter o fluxo sem interrupção de energia da fonte A para fonte B .

A modelagem desta seção será finalizada com a apresentação do autômato que modela esta operação. Neste autômato estão incluídos todos os passos descritos anteriormente assim como as modelagens em bloco apresentadas nas subseções 2.4.1 a 2.4.5.

Os eventos apresentados pela tabela 4.7 são eventos contidos nas figuras 4.50 e 4.51 dos autômatos das modelagens da operação de inverter o fluxo sem interrupção de energia da fonte A para fonte B e da fonte B para A.

Tabela 4.7 – Eventos da operação de inverter o fluxo sem interrupção de energia

Eventos	
BRF	Bloquear religador automatico RA fonte
RRT	Retirar de operação regulador de tensão 34,5 kV
AC05	Abrir chave ch 29-05 entrada do regulador de tensão
AC06	Abrir chave ch 29-06 saída do regulador de tensão
BRL	Bloquear religador automatico RA 52-09
FRBP	Fechar religador fonte B em paralelo
ARA	Abrir religador fonte A
FRAP	Fechar religador fonte A em paralelo
ARB	Abrir religador fonte B
RRL	Retirar de operação religador automático RA 52-09
AC10	Abrir chave ch 29-08 saída do religador RA 52-09
AC08	Abrir chave ch 29-10 entrada do religador RA 52-09
MCB	Manobrar chaves do barramento em anel
CRL	Colocar em operação religador automatico RA 52-09
FC05	Fechar chave ch 29-05 entrada do regulador de tensão
FC06	Fechar chave ch 29-06 saída do regulador de tensão
CRT	Colocar em operação regulador de tensão 34,5 kV
DRF	Desbloquear religador automatico RA fonte

Os estados apresentados pela tabela 4.8 são estados contidos na figura 4.50 do autômato da modelagem da operação de inverter o fluxo sem interrupção de energia da fonte A para fonte B .

Tabela 4.8 – Estados da operação de inverter o fluxo sem interrupção de energia

Estados	
FA	Fonte A alimentando o barramento
RFB	Religador fonte bloqueado
RLB	Religador automático RA 52-09 bloqueado
RFBP	Religador fonte B fechado em paralelo
RAA	Religador fonte A aberto
RFAP	Religador fonte A fechado em paralelo
RBA	Religador fonte B aberto
C08A	Chave ch 29-08 saída do religador RA 52-09 aberta
C10A	Chave ch 29-10 entrada do religador RA 52-09 aberta
C05F	Chave ch 29-05 entrada do regulador de tensão fechada
C06F	Chave ch 29-06 saída do regulador de tensão fechada
FB	Fonte B alimentando o barramento

O autômato que modela esta operação de inversão do fluxo de energia sem interrupção de energia da fonte A para a fonte B e apresentado pela figura 4.50 a seguir.

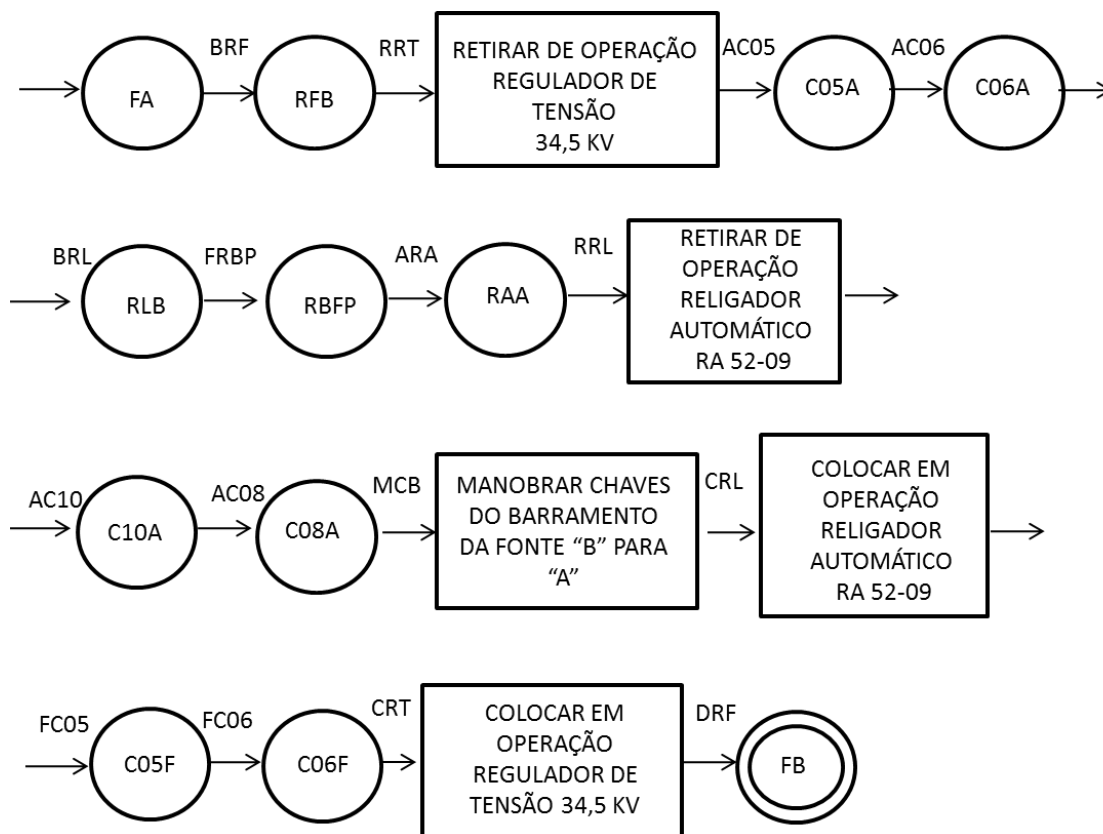


Figura 4.50 – Operação de inversão de fluxo de A para B sem interrupção de energia

4.3 INVERSÃO DE FLUXO SEM INTERRUPÇÃO NO FORNECIMENTO DE ENERGIA, DA FONTE B PARA A FONTE A .

A operação de inversão de fluxo de energia da fonte B para a fonte A é uma sequência de operação como foi a modelagem da inversão de fluxo da fonte A para fonte B na seção anterior, logo será utilizada como exemplo para esta seção.

O autômato que modela a operação de inversão do fluxo de energia sem interrupção de energia da fonte A para a fonte B é apresentado pela figura 4.51.

A sequência de operação de inversão de fluxo sem interrupção de energia da fonte B para a fonte A é apresentada a seguir:

- Fonte B alimentando o barramento da subestação (estado inicial);
- Bloquear religador automático da fonte que esta alimentando o barramento;
- Retirar o regulador de tensão de operação;
- Abrir as seccionadoras ch 29-05 e ch 29-06 de entrada e saída do regulador de tensão;
- Bloquear o religador automático RA 52-09;
- Fechar o religador da fonte A em paralelo;
- Abrir o religador da fonte B;
- Retirar de operação o religador automático RA 52-09;
- Abrir as seccionadoras ch 29-08 e ch 29-10 de entrada e saída do religador automático RA 52-09;
- Manobrar as chaves do barramento da fonte B para a fonte A;
- Colocar em operação o religador automático RA 52-09;
- Fechar as seccionadoras ch 29-05 e ch 29-06 de entrada e saída do regulador de tensão;
- Colocar em operação o regulador de tensão 34,5 kV;
- Bloquear religador automático da fonte que esta alimentando o barramento;
- Fonte A alimentando o barramento da subestação (estado final).

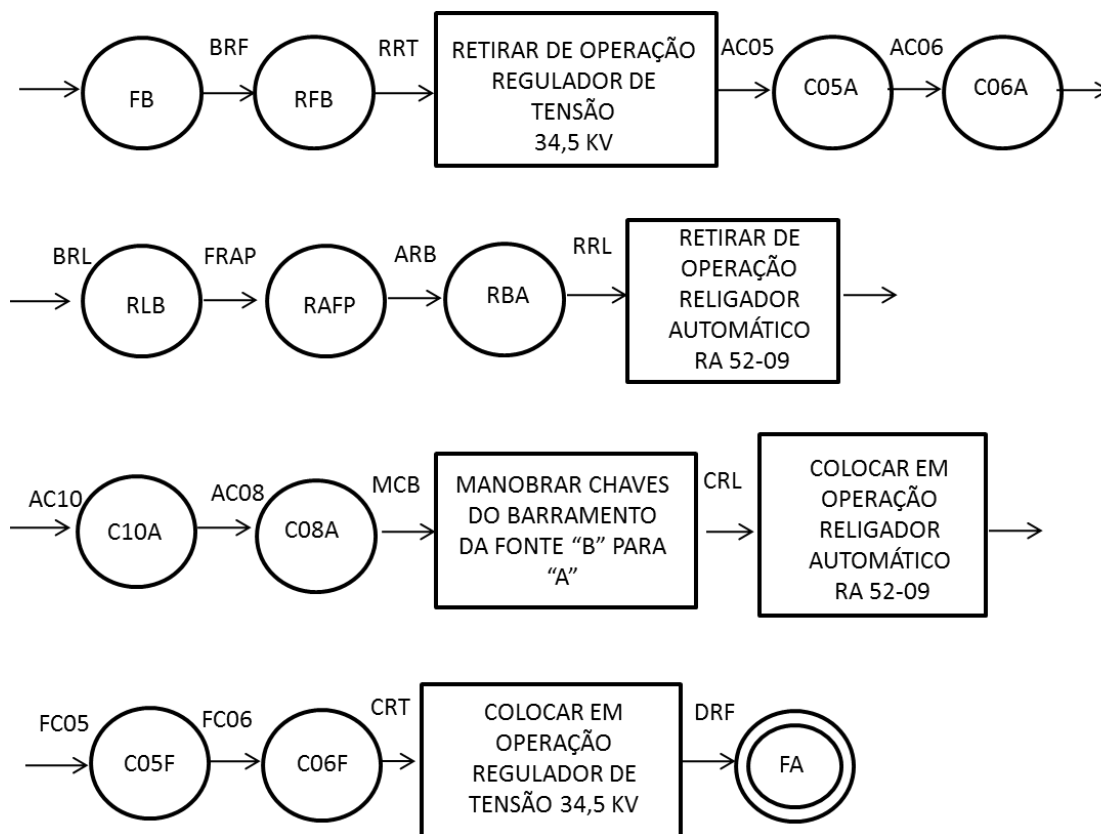


Figura 4.51 - Operação de inversão de fluxo de B para A sem interrupção de energia

4.4 INVERSÃO DE FLUXO COM INTERRUPTÃO NO FORNECIMENTO DE ENERGIA, DA FONTE A PARA A FONTE B .

A operação de inversão de fluxo de energia da fonte A para a fonte B é uma sequência de operação como foi a modelagem da inversão de fluxo da fonte A para fonte B na seção 4.2, porém nesta modelagem há interrupção de energia.

Esta modelagem foi baseada nas seções 4.1 e 4.2.

A sequência de operação da inversão de fluxo com interrupção de energia da fonte a para a fonte b é apresentada a seguir:

- Fonte B alimentando o barramento da subestação (estado inicial);
- Bloquear religador automático da fonte que esta alimentando o barramento;
- Retirar o regulador de tensão de operação;
- Abrir as seccionadoras ch 29-05 e ch 29-06 de entrada e saída do regulador de tensão;
- Bloquear o religador automático RA 52-09;
- Abrir o religador da fonte A (*nesta operação ocorre a interrupção de energia*);
- Fechar o religador da fonte B;
- Retirar de operação o religador automático RA 52-09;
- Abrir as seccionadoras ch 29-08 e ch 29-10 de entrada e saída do religador automático RA 52-09;
- Manobrar as chaves do barramento da fonte B para a fonte A;
- Colocar em operação o religador automático RA 52-09;
- Fechar as seccionadoras ch 29-05 e ch 29-06 de entrada e saída do regulador de tensão;
- Colocarem operação o regulador de tensão;
- Bloquear religador automático da fonte que esta alimentando o barramento;
- Fonte A alimentando o barramento da subestação (estado final).

Os eventos apresentados pela tabela 4.9 fazem parte das figuras 4.52 e 4.53 dos autômatos das modelagens da operação de inverter o fluxo com interrupção de energia da fonte A para fonte B e da fonte B para fonte A.

Tabela 4.9 - Eventos da operação de inverter o fluxo com interrupção de energia

Eventos	
BRF	Bloquear religador automatico RA fonte
RRT	Retirar de operação regulador de tensão 34,5 kV
AC05	Abrir chave ch 29-05 entrada do regulador de tensão
AC06	Abrir chave ch 29-06 saída do regulador de tensão
BRL	Bloquear religador automatico RA 52-09
ARFA	Abrir religador fonte A
FRFB	Fechar religador fonte B
ARFB	Abrir religador fonte B
FRFA	Fechar religador fonte A
RRL	Retirar de operação religador automático RA 52-09
AC10	Abrir chave ch 29-08 saída do religador RA 52-09

AC08	Abrir chave ch 29-10 entrada do religador RA 52-09
MCB	Manobrar chaves do barramento em anel
CRL	Colocar em operação religador automatico RA 52-09
FC05	Fechar chave ch 29-05 entrada do regulador de tensão
FC06	Fechar chave ch 29-06 saída do regulador de tensão
CRT	Colocar em operação regulador de tensão 34,5 kV
DRF	Desbloquear religador automatico RA fonte

Os estados apresentados pela tabela 4.8 são estados contidos nas figuras 4.52 e 4.53 dos autômatos das modelagens da operação de inverter o fluxo com interrupção de energia da fonte A para fonte B e da fonte B para fonte A.

Tabela 4.10 – Estados da operação de inverter o fluxo com interrupção de energia

Estados	
FA	Fonte A alimentando o barramento
RFB	Religador fonte bloqueado
RLB	Religador automático RA 52-09 bloqueado
RFAA	Religador fonte A aberto
RFBF	Religador fonte B fechado
RFBA	Religador fonte B aberto
RFAF	Religador fonte A fechado
C08A	Chave ch 29-08 saída do religador RA 52-09 aberta
C10A	Chave ch 29-10 entrada do religador RA 52-09 aberta
C05F	Chave ch 29-05 entrada do regulador de tensão fechada
C06F	Chave ch 29-06 saída do regulador de tensão fechada
FB	Fonte B alimentando o barramento

O autômato que modela esta operação da inversão de fluxo com interrupção de energia da fonte A para a fonte B é apresentado pela figura 4.52.

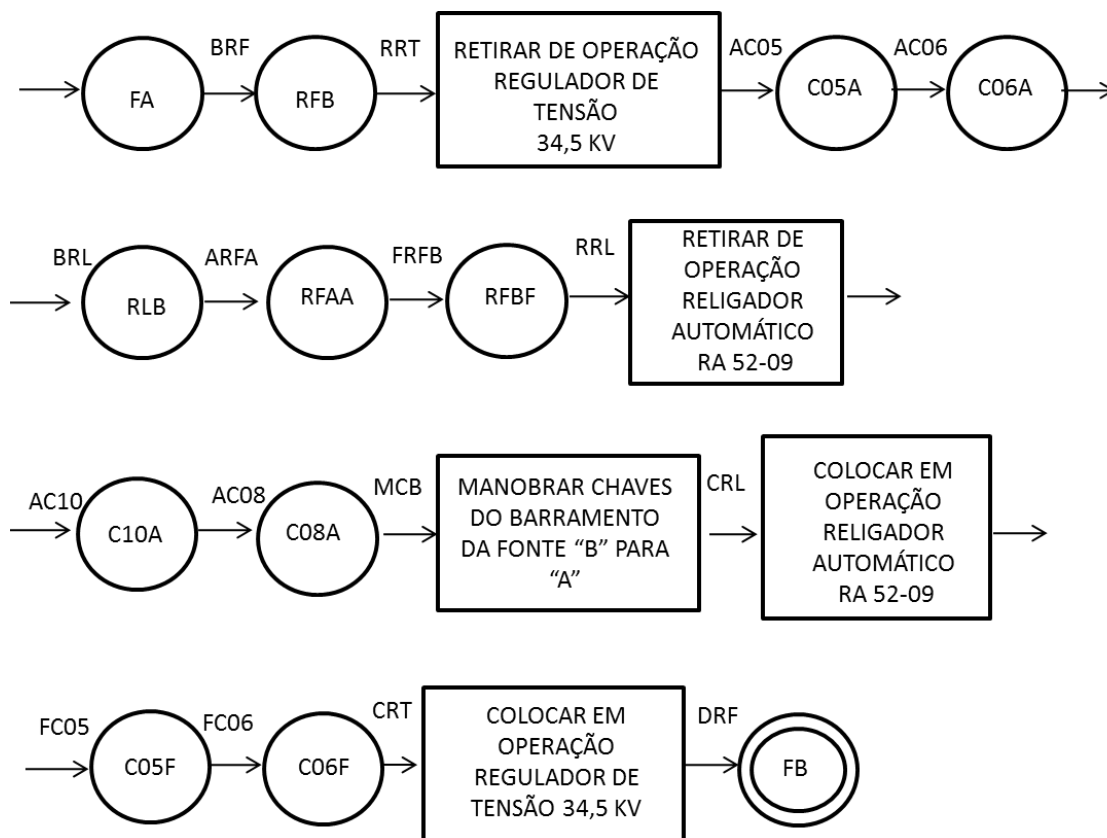


Figura 4.52 - Operação de inversão de fluxo de A para B com interrupção de energia

4.5 INVERSÃO DE FLUXO COM INTERRUÇÃO NO FORNECIMENTO DE ENERGIA, DA FONTE B PARA A FONTE A .

A operação de inversão de fluxo de energia da fonte B para a fonte A com interrupção de energia é uma sequência de operação como foi a modelagem da inversão de fluxo da fonte A para fonte B na seção 4.3, porém nesta modelagem há interrupção de energia.

Esta modelagem foi baseada nas seções 4.1 e 4.2.

A sequência de operação da inversão de fluxo com interrupção de energia da fonte B para a fonte A é apresentada a seguir:

- Fonte B alimentando o barramento da subestação (estado inicial);
- Bloquear religador automático da fonte que esta alimentando o barramento;
- Retirar o regulador de tensão de operação;
- Abrir as seccionadoras ch 29-05 e ch 29-06 de entrada e saída do regulador de tensão;
- Bloquear o religador automático RA 52-09;
- Abrir o religador da fonte B (*nesta operação ocorre a interrupção de energia*);
- Fechar o religador da fonte A;
- Retirar de operação o religador automático RA 52-09;
- Abrir as seccionadoras ch 29-08 e ch 29-10 de entrada e saída do religador automático RA 52-09;
- Manobrar as chaves do barramento da fonte B para a fonte A;
- Colocar em operação o religador automático RA 52-09;
- Fechar as seccionadoras ch 29-05 e ch 29-06 de entrada e saída do regulador de tensão;
- Colocarem operação o regulador de tensão;
- Bloquear religador automático da fonte que esta alimentando o barramento;
- Fonte A alimentando o barramento da subestação (estado final).

O autômato que modela esta operação da inversão de fluxo com interrupção de energia da fonte B para a fonte A é apresentado pela figura 4.53.

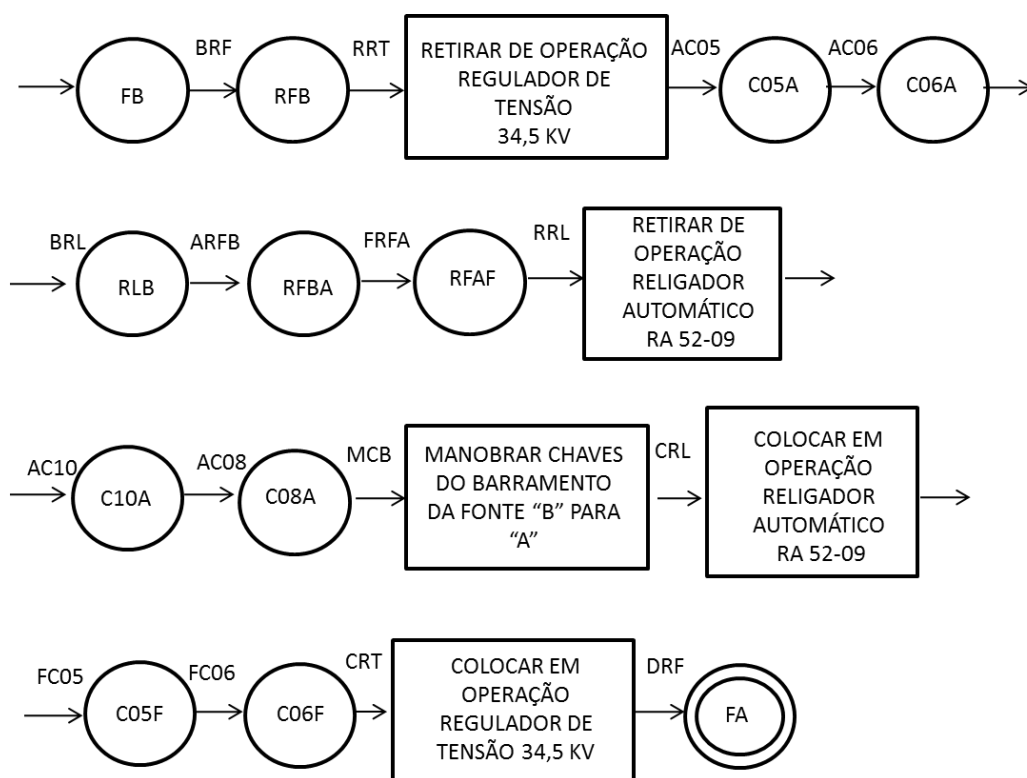


Figura 4.53 - Operação de inversão de fluxo de B para A com interrupção de energia

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentado uma proposta para encontrar um sequenciamento ótimo para a modelagem de operações de uma subestação de 34,5 kV utilizando a TCS.

Foi utilizado o Manual de Instruções Técnicas 160808 da COPEL (MIT160808, 2010) para modelar quatro operações como: operação de inversão de fluxo da fonte A para a fonte B, e da fonte B para a fonte A, com e sem interrupção de energia.

O método descrito nesta dissertação apresenta a teoria para a obtenção de supervisores para sistemas a eventos discretos. Os supervisores calculados tiveram a função de desabilitar eventos na planta de acordo com a especificação de restrição definida.

Para a síntese do supervisor foi utilizada a abordagem monolítica, onde um único supervisor coordenou o comportamento do sistema. Também foi apresentada a modelagem do religador automático RA 52-09 utilizando a abordagem modular local, onde foram calculados supervisores locais para as plantas locais respeitando as restrições locais.

Utilizando esta modelagem pela TCS os objetivos iniciais foram satisfeitos, dado que o autômato sequencial apresentado para a modelagem das operações citadas representa uma sequência que contém subsistemas como as chaves seccionadoras fora da composição da planta; com isso o número de estados foi minimizado na composição síncrona não afetando a restrição definida para o comportamento do sistema.

As modelagens realizadas das funções de retirar e colocar em operação o religador automático e o regulador de tensão, bem como, manobrar as chaves do barramento em anel foram modeladas uma única vez e utilizadas nos autômatos sequencias das quatro operações sem que fossem modeladas novamente, pois representam um bloco fechado com uma função modelada comum às operações.

Por fim, conclui-se que a modelagem com controle supervísório apresentada, possui uma aplicação muito ampla, sendo possível ser utilizada em diversos sistemas a eventos discretos, além disso é uma ferramenta gráfica de auxílio à engenharia de controle e automação na concepção de projetos.

Adicionalmente, podem ser citadas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Avaliação da implementação da solução utilizando outros barramentos diferentes do barramento em anel. Com a implementação em outros barramentos seria possível verificar se a planta teria um maior número de estados.
- Implementação em outras linguagens de programação como o controlador lógico programável (CLP), a partir do autômato sequencial apresentado para as operações modeladas.
- Modelagem de todas as funções de uma subestação, sendo assim possível utilizar os supervisores das funções modeladas para todas as operações.
- Geração automática de códigos para controlador lógico programável, aumentando desta forma a utilização da TCS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASSANDRAS, C.G., LAFORTUNE S. Introduction to Discrete Event Systems. Kluwer Academic Publishers. USA, 1999.

CAVALHEIRO, F. C.; Emprego de mapas auto-organizáveis para localização de faltas em redes de distribuição. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pampa. 2012.

COLUSSI, A.; Sistema especialista para avaliação de alternativas de topologia para subestações de transmissão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

CRUZ, D. L. L. da; Metodologia para Implementação de Controle Supervisório Modular Local em Controladores Lógicos Programáveis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2011.

CURY, J. E. R; Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos. V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Canela-RS, 2001.

CURZEL, J. L.; Síntese e implementação de controle supervisório em uma célula flexível de manufatura didática. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2008.

DA CUNHA, A. E. C. Contribuições ao Controle hierárquico de Sistemas a Eventos Discretos e Sistemas Híbridos. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Março 2003.

HOPCROFT, J. E. & ULLMAN, J. D. (1979), Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

MIT160808, Operação de equipamentos em subestações 34,5/13,8 kV. Manual de instruções técnicas – Copel - Companhia Paranaense de Eletricidade. 2010.

PAREDES, A. E. R. O. Integração de Sistemas de Supervisão, Proteção e Automação de Subestações de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina. Itajubá. 2002.

BITTENCOURT, A.A. Proteção adaptativa de alimentadores de distribuição de energia elétrica considerando geração distribuída. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Itajubá. Florianópolis. 2011.

QUEIROZ, M. H. & Cury, J. E. R. (2002), 'Controle supervisório modular de sistemas de manufatura', Revista Controle & Automação 13(2), 123– 133.

ALMEIDA, S. R. de; Implementação de Controle Supervisório em CLPs Usando Linguagem de Alto Nível. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina. – Joinville, 2012.

KAWAMURA, C. M. Contribuições à análise de desempenho de células de manufatura baseada na teoria de controle supervísório. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. – Curitiba, 2012.

QUEIROZ, M. H. (2004), ‘Controle supervísório modular e multitarefa de sistemas compostos’. Tese de doutorado em engenharia elétrica, UFSC.

RAMADGE, P. J. G. e WONHAM, W. M. The control of discrete-event systems. volume 77, págs. 81–98, Janeiro 1989.

SANTOS, M.C.; Modelagem e projeto de um sistema de controle supervísório para um processo de lavagem de microplacas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.

COVRE, H.P.; Integração de dados dos sistemas de proteção de subestações distribuidoras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São Paulo. 2011.

SOUZA, D.C.P. Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás. 2008.

TEIXEIRA, C. A.; Aplicação da Teoria de Controle Supervísório no Projeto de Controle para Eletrodomésticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2008.

VIEIRA, A. D.; Método de Implementação do Controle de Sistemas a Eventos Discretos com Aplicação da Teoria de Controle Supervísório. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

WONHAM, W. M. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Systems Control Group, Department of Electrical & Computer Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 2004.

ZILLER, R. M. A Abordagem Ramadge-Wonham no Controle de Sistemas a Eventos Discretos: Contribuições à Teoria. Dissertação mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Outubro 1993.

MAMEDE FILHO, J.; 2005. Manual de Equipamentos Elétricos. 2 ed. Vol. I. Rio de Janeiro: LTC.

GEBRAN, A.P.; 2014. Manutenção e operação de equipamentos de subestação. 1 ed. Vol. I. Porto Alegre: Bookman.

COPEL; 1991. Critérios Básicos para a interligação de Produtores Independentes ao Sistema Elétrico da Copel. Outubro 1991.

QUEIROZ, M. H. de. Controle supervísório modular de sistemas de grande porte. Dissertação Mestrado — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

TORRICO, C. R. C. Contribuições ao Controle Supervisório Hierárquico de Sistemas a Eventos Discretos: Uma Abordagem Baseada na Agregação de Estados. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Março 2003.

Reiser, C. O Ambiente GRAIL para Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos. Dissertação Mestrado — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.

APÊNDICE I

O Grail é um conjunto de bibliotecas de funções e programas em C++, utilizado para o cálculo de algoritmos relacionados a autômatos e a implementação do algoritmo de supervisores proposto neste trabalho (DA CUNHA, 2003).

Para a modelagem baseado no exemplo da abordagem monolítica onde há somente um supervisor, conforme seção 2.4.7, os seguintes passos devem ser seguidos, utilizando o Grail.

Arquivo G5: DEFINIR O QUE

Código	Comentário
(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 a 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento a.
1 b 0	% Define transição entre os estados 1 e 0 pelo evento b.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo G6:

Código	Comentário
(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 c 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento c.
1 d 0	% Define transição entre os estados 1 e 0 pelo evento d.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo G7:

Código	Comentário
(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 e 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento e.
1 f 0	% Define transição entre os estados 1 e 0 pelo evento f.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo E1:

Código	Comentário
(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 d 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento d.
0 e 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento e.
1 f 0	% Define transição entre os estados 1 e 0 pelo evento f.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo Enc (Conjunto dos eventos não-controláveis):

Código	Comentário
(START) - 0	% Padrão do arquivo.
0 b 0	% Insere no conjunto de eventos não-controláveis.
0 d 0	% Insere no conjunto de eventos não-controláveis.
0 f 0	% Insere no conjunto de eventos não-controláveis.
0 h 0	% Insere no conjunto de eventos não-controláveis.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Executar as seguintes linhas de comando:

Comando	Resultado
fmsync G5 G6 fmsync G7 > G	$G = G5 G6 G7$ - Calcula a planta.
fmsync E1 G fmtrim > K	$K = \text{Trim}(E1 G)$ - Calcula a linguagem-alvo.
fmsupc G K Enc > S	$S = \text{SupC}(\text{Lm}(K))$ - Calcula o supervisor.
fmsupred G S > Sr	$Sr = \text{Supred}(S;G)$ - Reduz o supervisor.

Para a modelagem baseado no exemplo da abordagem modular local onde há vários supervisores um para cada planta , conforme seção 2.4.3, os seguintes passos devem ser seguidos, utilizando o Grail.

Arquivo G9:

Código	Comentário
--------	------------

(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 a 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento a.
1 b 0	% Define transição entre os estados 1 e 0 pelo evento b.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo G10:
Código

Comentário

(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 c 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento c.
1 d 0	% Define transição entre os estados 1 e 0 pelo evento d.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo G11:
Código

Comentário

(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 e 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento e.
1 f 0	% Define transição entre os estados 1 e 0 pelo evento f.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo G12:
Código

Comentário

(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 g 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento g.
1 h 0	% Define transição entre os estados 1 e 0 pelo evento h.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo E1:

Código

Comentário

(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 b 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento b.
1 c 2	% Define transição entre os estados 1 e 2 pelo evento c.
2 d 0	% Define transição entre os estados 2 e 0 pelo evento d.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo E2:

Código	Comentário
(START) - 0	% Define o estado 0 como o estado inicial.
0 e 1	% Define transição entre os estados 0 e 1 pelo evento e.
1 f 2	% Define transição entre os estados 1 e 2 pelo evento f.
2 g 0	% Define transição entre os estados 2 e 0 pelo evento g.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo Enc1 (Conjunto dos eventos não-controláveis):

Código	Comentário
(START) - 0	% Padrão do arquivo.
0 b 0	% Insere no conjunto de eventos não-controláveis.
0 d 0	% Insere no conjunto de eventos não-controláveis.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Arquivo Enc2 (Conjunto dos eventos não-controláveis):

Código	Comentário
(START) - 0	% Padrão do arquivo.
0 f 0	% Insere no conjunto de eventos não-controláveis.
0 h 0	% Insere no conjunto de eventos não-controláveis.
0 - (FINAL)	% Define o estado 0 como estado final.

Executar as seguintes linhas de comando para calculo do Sup1

Comando	Resultado
---------	-----------

fmsync G9 G10 > G

$G = G9||G10$ - Calcula a planta.

fmsync E1 G | fmtrim > K

$K = \text{Trim}(E1||G)$ - Calcula a linguagem-alvo.

fmsupc G K Enc1 > S

$S = \text{SupC}(\text{Lm}(K))$ - Calcula o supervisor Sup1.

fmsupred G S > Sr

$Sr = \text{Supred}(S;G)$ - Reduz o supervisor.

Executar as seguintes linhas de comando para calculo do Sup2

Comando

Resultado

fmsync G11 G12 > G

$G = G11||G12$ - Calcula a planta.

fmsync E2 G | fmtrim > K

$K = \text{Trim}(E2||G)$ - Calcula a linguagem-alvo.

fmsupc G K Enc2 > S

$S = \text{SupC}(\text{Lm}(K))$ - Calcula o supervisor Sup2.

fmsupred G S > Sr

$Sr = \text{Supred}(S;G)$ - Reduz o supervisor.