

ELABORAÇÃO DE UM CONJUNTO DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA
PARA UMA UNIDADE DE CONVERSÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

Felipe da Cruz Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso
e Melo
José Antônio Carlos Canedo
Medeiros

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2014

ELABORAÇÃO DE UM CONJUNTO DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA
PARA UMA UNIDADE DE CONVERSÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

Felipe da Cruz Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Paulo Fernando Frutuoso Ferreira e Melo, D.Sc.

Prof. José Antônio Carlos Canedo Medeiros, D.Sc.

Prof. José de Jesus Rivero Oliva, D.Sc.

Dr. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2014

Santos, Felipe da Cruz

Elaboração de um Conjunto de Funções Críticas de Segurança para uma Unidade de Conversão de Hexafluoreto de Urânio / Felipe da Cruz Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XIII, 70 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

José Antônio Carlos Canedo Medeiros

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 67-70.

1. Funções Críticas de Segurança. 2. Hexafluoreto de urânio. 3. Ciclo do combustível nuclear. I. Melo, Paulo Fernando Ferreira Frutuoso. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

“Eu aprendi que coragem não é a ausência de medo,
mas o triunfo sobre ele.”

(Nelson Mandela)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de estar aqui.

Aos meus pais, Mario e Jurandina, por todo apoio e incentivo ao estudo durante toda a minha vida.

À tia Rita que é uma segunda mãe para mim.

Ao meu orientador Paulo Fernando por ter me preparado e acompanhado durante o mestrado, pela paciência com minhas dificuldades e pelos momentos de descontração que permitiram criar laços de amizade.

Ao meu orientador José Canedo, pelo apoio, dedicação e pela precisão nos conceitos que foi fundamental para a realização desse trabalho.

Ao engenheiro, e também amigo, João Gonçalves pelo incentivo, as ideias e por abrir as portas da INB para a realização do trabalho. A toda equipe da conversão da INB, Alexandre, Gullit, Hoult, Luan, Leiliane e Natália.

Aos meus companheiros de turma mestrado Eddie, Patrícia, Hidmer e Laís.

Ao Lemi amigo e trabalhador da INB, que facilitou minha ida à empresa me convidando a ficar em sua casa.

Aos meus tios, Idiléia e Arlindo, que para facilitar a minha vida sempre me convidaram para eu ficar em sua casa desde a época da graduação.

A todos os meu amigos e familiares que me aturaram durante esse período e especialmente ao meu irmão, Carlos Eduardo, que acompanhou todos os meus dramas de perto.

A toda a equipe do PEN Lili, Jô, Washington e Reginaldo, pelo apoio durante todo o mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ELABORAÇÃO DE UM CONJUNTO DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA
PARA UMA UNIDADE DE CONVERSÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

Felipe da Cruz Santos

Fevereiro/2014

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

José Antônio Carlos Canedo Medeiros

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho propõe, pela primeira vez, um conjunto de funções críticas de segurança (FCS) para a monitoração de uma unidade de conversão de hexafluoreto de urânio. Foi elaborado um conjunto de oito FCS por meio da adaptação e aplicação do conceito de FCS, introduzido como resultado da experiência obtida com o acidente de Three Mile Island para o gerenciamento de risco e consciência operacional na operação de reatores nucleares.

Para a realização deste trabalho, foram identificados os perigos da unidade, definidas as barreiras de proteção, identificados os sistemas críticos, as variáveis que caracterizam ameaças às barreiras e foram construídas lógicas de detecção dos estados de ameaça às FCS.

O presente trabalho foi desenvolvido e aplicado tomando como referência o projeto da usina de conversão de hexafluoreto de urânio da Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB).

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEVELOPMENT OF A SET OF CRITICAL SAFETY FUNCTIONS TO A
URANIUM HEXAFLUORIDE CONVERSION UNIT

Felipe da Cruz Santos

February/2014

Advisors: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo
José Antônio Carlos Canedo Medeiros

Department: Nuclear Engineering

This work proposes for the first time, a set of critical safety functions (CSF) for monitoring of a uranium hexafluoride conversion unit. A set of eight CSF was made by adapting and applying the concept of CSF introduced as a result of experience with the Three Mile Island accident, for risk management and operational awareness in the operation of nuclear reactors.

For this work the hazards of the unit were identified, defined the protection barriers, identified critical systems, identified the variables that characterize the threats to the barriers and the logical of detection of states of threat to FCS were built.

This work was developed and applied by reference to the design of Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB) uranium hexafluoride conversion plant.

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO.....	1
1.2 MOTIVAÇÃO.....	1
1.3 METODOLOGIA.....	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2 FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA.....	5
2.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA USINA PWR.....	5
2.2 O ACIDENTE EM THREE MILE ISLAND.....	6
2.2.1 Sequência de eventos.....	6
2.2.2 Experiência obtida com o acidente.....	8
2.3 SISTEMA DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA.....	9
2.3.1 Introdução.....	9
2.3.2 Funções críticas de segurança.....	10
2.3.3 Árvores de estados.....	11
3 O COMBUSTÍVEL NUCLEAR.....	15
3.1 O URÂNIO.....	15
3.2 CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR.....	16
3.2.1 Etapas do Ciclo do Combustível Nuclear.....	17
3.3 CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL.....	20
4 ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA DE CONVERSÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO.....	24
4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	24
4.2 ETAPAS DA CONVERSÃO.....	26
4.2.1 Purificação do concentrado de urânio.....	26
4.2.2 Conversão do nitrato de uranila em UO ₃	26
4.2.3 Redução.....	26
4.2.4 Hidrofluoração.....	27
4.2.6 Cristalização.....	27
4.3 DELIMITAÇÃO DOS PROCESSOS ESTUDADOS.....	27
4.4 DESCRIÇÃO DA UNIDADE.....	28
4.4.1 Introdução.....	28

4.4.2	Abastecimento de HF.....	31
4.4.3	Redução.....	31
4.4.4	Hidrofluoração.....	32
4.4.5	Produção de flúor.....	33
4.4.6	Fluoração.....	33
4.4.7	Cristalização.....	34
4.4.6	Destilação.....	34
5	FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA PARA A USINA DE	
	CONVERSÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO.....	36
5.1	SOBRE AS BARREIRAS DE PROTEÇÃO.....	36
5.2	DIFERENÇAS ENTRE O REATOR E OUTRAS ETAPAS DO CICLO	
	DO COMBUSTÍVEL.....	37
5.3	IDENTIFICAÇÃO DOS PERIGOS NA PLANTA.....	39
5.3.1	Compostos químicos presentes na planta.....	39
5.3.2	Eventos postulados para a unidade.....	41
5.4	IDENTIFICAÇÃO DOS SISTEMAS CRÍTICOS.....	44
5.4.1	Fornos rotativos.....	44
5.4.2	Reator de chamas e reator de pratos.....	44
5.4.3	Cristalizadores.....	45
5.4.4	Células eletrolíticas.....	45
5.4.5	Linhas de HF, H ₂ , F ₂ e UF ₆	45
5.4.6	Abastecimento de HF.....	45
5.4.7	Sistema de ventilação.....	45
5.4.8	Destilação.....	45
5.6	ATUAÇÃO DO SISTEMA DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE	
	SEGURANÇA.....	46
6	PROPOSTA DE UM CONJUNTO DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE	
	SEGRANÇA.....	51
6.1	INTRODUÇÃO.....	51
6.2	CONJUNTO DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE	
	SEGURANÇA.....	51
6.2.1	Estanqueidade durante o abastecimento de HF.....	53
6.2.2	Disponibilidade da ventilação.....	55

6.2.3 Estanqueidade dos cristalizadores.....	56
6.2.4 Estanqueidade das células de flúor.....	58
6.2.5 Estanqueidade do reator de chamas/pratos.....	59
6.2.6 Estanqueidade dos fornos rotativos.....	60
6.2.7 Estanqueidade da coluna de destilação.....	61
6.2.8 Estanqueidade das linhas de abastecimento de insumos.....	63
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 2.1 Representação da central nuclear de TMI-2.....	5
Fig. 2.2 Sala de controle TMI-2.....	8
Fig. 2.3 Interação SPDS-FCS-Operador.....	12
Fig. 2.4 Árvore de estados genérica.....	13
Fig. 3.1 Ciclo do combustível nuclear sem reprocessamento.....	16
Fig. 3.2 Ciclo do combustível nuclear com reprocessamento.....	17
Fig. 3.3 Cascata de enriquecimento de urânio.....	18
Fig. 3.4 Vareta de combustível e elemento combustível.....	19
Fig. 3.5 Ciclo do combustível nuclear no Brasil.....	21
Fig. 3.6 Reservas de urânio no mundos por custo de produção.....	22
Fig. 4.1 Fluxograma geral da conversão.....	25
Fig. 4.2 Localização dos processos nos prédios.....	30
Fig. 4.3 Forno rotativo.....	32
Fig. 5.1 Barreiras de proteção.....	36
Fig. 5.2 Atuação do sistema de FCS na conversão.....	46
Fig. 5.3 Atuação do sistema de FCS no reator.....	47

Fig. 5.4	Representação dos níveis de controle.....	48
Fig. 5.5	Gráfico representativo da pressão em forno rotativo.....	49
Fig. 5.6	Gráfico representativo da temperatura em forno rotativo.....	50
Fig. 6.1	Conjunto de funções críticas de segurança.....	52
Fig. 6.2	Árvore de estados da FCS estanqueidade durante o abastecimento de HF.....	54
Fig. 6.3	Árvore de estados da FCS disponibilidade da ventilação.....	55
Fig. 6.4	Árvore de estados Estanqueidade dos cristalizadores.....	57
Fig. 6.5	Árvore de estados estanqueidade das células de flúor.....	58
Fig. 6.6	Árvore de estados da FCS estanqueidade dos Reatores de Chamas/Pratos.....	59
Fig. 6.7	Árvore de estados da FCS estanqueidade dos fornos rotativos.....	60
Fig. 6.8	Árvore de estados estanqueidade da coluna de destilação.....	62
Fig. 6.9	Árvore de estados da FCS estanqueidade das linhas de abastecimento de insumos.....	63

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3.1 Concentração isotópica do urânio natural.....	16
Tabela 3.2 Reservas de urânio brasileiras.....	22
Tabela 4.1 Produção de UF ₆ mundial.....	24

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é elaborar um conjunto de funções críticas de segurança (FCS) para uma unidade de conversão de hexafluoreto de urânio. O conceito de FCS foi introduzido como resultado da experiência obtida com o acidente em Three Mile Island para o gerenciamento de risco e consciência operacional em reatores nucleares. O presente trabalho desenvolve, uma adaptação e aplicação do conceito de FCS com o objetivo de elaborar, pela primeira vez, um conjunto de FCS para uma unidade do ciclo do combustível nuclear (CCN) diferente do reator nuclear.

1.2 MOTIVAÇÃO

Sistemas críticos quanto à segurança são aqueles em que uma falha pode resultar em morte ou ferimentos em seres humanos, provocar danos e poluir o meio ambiente ou provocar danos à propriedade pública ou privada. Esses sistemas são encontrados na indústria nuclear, química e aeronáutica, por exemplo.

Os sistemas de monitoramento de processos são projetados para monitorar equipamentos e processos complexos em tempo real, identificando quedas de desempenho, prevendo possíveis cenários de falha, detectando e diagnosticando falhas, recomendando fazer manutenções corretivas e gerando ações de controle. Esses sistemas tornam-se cada vez mais necessários, em virtude do custo elevado das falhas para as indústrias. Existe uma série de desafios práticos durante a elaboração destes sistemas, como a dificuldade de modelagem do processo ou equipamento, o sensoriamento inadequado, a integridade dos dados disponíveis, etc.

Na central nuclear de Three Mile Island (TMI), onde ocorreu um acidente severo com fusão parcial do núcleo, em 1979, os sistemas de monitoração e controle de processo da unidade não foram suficientes para ajudar os operadores a evitar o acidente. Na ocasião, os operadores eram sobrecarregados com muitos alarmes, as informações necessárias não eram apresentadas de maneira conveniente e inteligível, o que foi crucial para o desenvolvimento do acidente. O acidente na central nuclear de TMI demonstrou a necessidade de um sistema de apoio à operação que auxilie a tomada de decisão do operador em condições normais, anormais e de emergência. O sistema se

baseia em um conjunto de funções críticas de segurança (FCS) que monitoram o grau de ameaça às barreiras de proteção da usina. Enquanto as FCS estiverem satisfeitas, reduz-se a frequência de ocorrência de acidentes.

O sistema prioriza as ações a serem tomadas pelo operador no caso de degradação das barreiras de proteção da unidade independente do acidente que esteja ocorrendo. Atualmente, sistemas com funções críticas de segurança para reatores nucleares são tão importantes que são exigência para o licenciamento e operação das centrais (U.S.NRC, 2002).

Em 2030, no Brasil, a geração de energia elétrica em usinas nucleares deve contribuir entre 3% e 5% da matriz energética nacional. [Plano Nacional de Energia, 2030] No Plano Nuclear Nacional são previstas, além de Angra 1, 2 e 3, pelo menos mais 4 usinas até 2030. As Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB) é a empresa pública responsável pela produção do combustível nuclear utilizado nas usinas brasileiras.

O serviço de conversão do urânio em escala industrial é a única etapa do ciclo do combustível nuclear que atualmente é feito completamente fora do país. O Plano Plurianual 2012-2015 (INB, 2013), que é um plano de diretrizes objetivos e metas para o governo federal, através da 13CR (INB, 2013) determina a implantação de uma usina de conversão de hexafluoreto de urânio para autossuficiência na produção do combustível nuclear nacional.

O ciclo do combustível nuclear (CCN) consiste no conjunto de etapas do processo industrial que transforma o mineral urânio, desde a sua mineração no estado natural, passando pela geração de energia no reator até a sua disposição final. As plantas do (CCN) processam urânio e outros compostos químicos que, se liberados, podem causar danos a trabalhadores, público, meio ambiente ou danos materiais. A usina de conversão de hexafluoreto de urânio é a etapa subsequente a mineração e anterior ao enriquecimento isotópico do urânio, e por processar urânio com enriquecimento natural, os perigos se assemelham a de plantas químicas.

A causa principal (KHAN, 1999) de problemas de liberação de substâncias químicas e de 35% do número total de explosões é a falha no controle das reações químicas. Os principais fatores contribuintes são rupturas de equipamentos (27%),

falhas humanas (18%) e procedimentos indevidos (18%). No caso de incêndios, as causas principais são vazões excessivas ou liberações de fluidos inflamáveis (18%), superaquecimento ou superfícies superaquecidas (16%), falhas em tubulações ou ajustes (11%) e pane elétrica (11%). Em suma, nos acidentes em indústrias químicas, 25% são explosões ou incêndios e em 71% ocorrem liberações de gases tóxicos na atmosfera. As causas gerais mais frequentes são falhas em equipamentos (29%), falhas operacionais (21%), cálculos inadequados de material (16%), problemas no processo (11%) e problemas na mecânica dos materiais (9%).

Embora a usina de conversão de hexafluoreto de urânio se caracterize como um conjunto de sistemas críticos quanto à segurança, não existe uma proposta de um conjunto de FCS para unidade. Este trabalho propõe um conjunto de FCS para monitoração uma unidade de conversão de hexafluoreto de urânio tomando como referência o projeto da INB.

1.3 METODOLOGIA

O trabalho foi realizado tomando como referência o projeto da unidade de conversão de hexafluoreto de urânio da INB (USICON), onde foram:

- 1) identificados os perigos presentes na instalação;
- 2) identificados os sistemas críticos quanto à segurança;
- 3) foram definidas as barreiras de proteção para a unidade;
- 4) identificado as variáveis cuja perda do controle ameaça as barreiras de proteção;
- 5) identificados os procedimentos operacionais para a manutenção da integridade das barreiras e mitigação de acidentes;
- 6) elaboradas as árvores de estados para cada FCS;
- 7) definido um conjunto de FCS para a monitoração da unidade.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos.

O Capítulo 2 apresenta os principais componentes de uma usina PWR com o objetivo de facilitar o entendimento do acidente em Three Mile Island e o conceito de

funções críticas de segurança, apresenta a sequência de eventos do acidente em TMI e a experiência obtida com os estudos pós-acidente e o conceito de monitoração por FCS.

O Capítulo 3 apresenta as etapas do ciclo do combustível nuclear e as características do ciclo no Brasil.

O Capítulo 4 apresenta os processos gerais de uma usina de conversão e uma descrição do projeto da unidade de conversão de hexaflureto de urânio da INB.

O Capítulo 5 apresenta as barreiras de proteção para a unidade, as diferenças entre o reator nuclear e outras plantas do ciclo do combustível nuclear, a identificação dos perigos e dos sistemas críticos e a atuação do sistema de funções críticas de segurança (FCS) para a instalação estudada.

O Capítulo 6 apresenta o conjunto de funções críticas de segurança proposto para a planta estudada.

O capítulo 7 finaliza com as conclusões e recomendações.

2 FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o conceito de funções críticas de segurança (FCS). Para isso, inicialmente, apresentam-se os principais componentes de uma usina PWR a fim de facilitar o entendimento dos eventos principais do acidente em Three Mile Island (TMI); as contribuições dos estudos pós-acidente para o avanço na segurança em usinas nucleares e, finalmente, o conceito de gerenciamento de acidentes por função crítica de segurança.

2.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA USINA PWR

Com o objetivo de facilitar o entendimento do acidente na central nuclear de TMI-2 nesta seção são apresentados os principais componentes de uma usina com reator a água pressurizada (PWR - *Pressurized Water Reactor*). A Figura 2.1 apresenta a representação da central de TMI-2 com seus principais componentes.

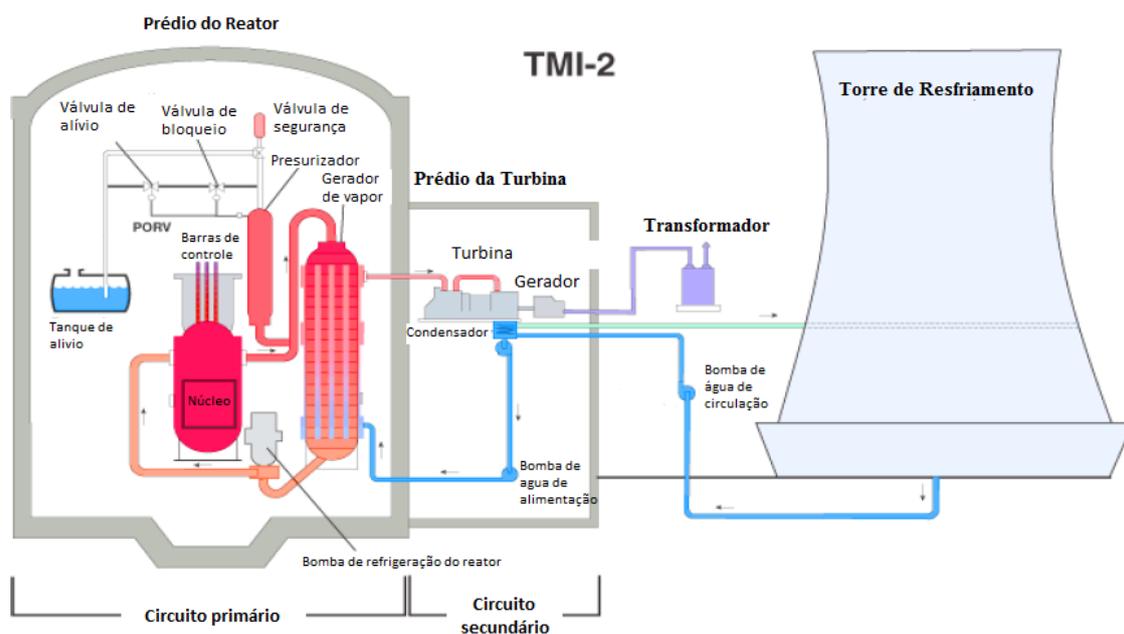


Figura 2.1 – Representação da central nuclear de TMI-2 Adaptado (U.S.NRC,2013)

O circuito primário é formado pelo vaso do reator, bomba de refrigeração do reator, pressurizador, gerador de vapor e seus sistemas auxiliares.

O circuito secundário é formado pela turbina, condensador, bomba de alimentação e seus sistemas auxiliares.

O gerador de vapor é o equipamento responsável por transferir o calor do circuito primário para o secundário. O gerador de vapor é a interface entre o circuito primário e o secundário. Não há mistura entre a água do circuito primário e a do secundário.

O núcleo do reator, onde ocorre a reação de fissão nuclear e a geração de calor, fica localizado no interior do vaso do reator.

As barras de controle são barras responsáveis por controlar a reação nuclear, quando inseridas totalmente no núcleo interrompem a reação nuclear.

As bombas de refrigeração do reator são responsáveis por fazer circular a água que transfere o calor do núcleo para o gerador de vapor no circuito primário.

O pressurizador é o equipamento responsável por controlar a pressão no circuito primário.

As bombas de água de alimentação são responsáveis por fazer a água circular no circuito secundário.

A válvula de alívio do pressurizador é uma válvula de acionamento automático que se abre quando a pressão no pressurizador atinge o *setpoint*.

2.2 O ACIDENTE EM THREE MILE ISLAND

2.2.1 Sequência de eventos

Em 28 de março de 1979, numa quarta-feira, perto de *Harrisburg, Pennsylvania*, por volta das 4 horas da manhã na Unidade II da Central Nuclear de Three Mile Island, se iniciou uma sequência de eventos que, mesmo sem mortes, culminou no maior acidente nuclear nos Estados Unidos. (USNRC, 2013)

O primeiro evento (KEMENY, 1979) foi a falha do sistema de bombas que alimentam o gerador de vapor, conseqüentemente o fluxo de água no gerador de vapor parou, interrompendo a produção de vapor, produção essa que é a principal responsável pela remoção do calor do circuito primário. Por isso, automaticamente o sistema de proteção da usina desligou a turbina e a geração de energia.

Cerca de 8 segundos após o evento inicial, o reator também foi desligado através da queda das barras de controle (trip ou SCRAM), procedimento esperado pelo sistema de proteção da usina. Quase que instantaneamente não há mais calor gerado pelo processo de fissão, entretanto os produtos de fissão produzem o chamado calor residual que, se não for removido, é suficiente para fundir as varetas de combustível.

Como a remoção de calor do circuito primário foi comprometida, devido ao problema no circuito secundário, houve o aumento do volume de água no pressurizador, comprimindo o vapor e aumentando a pressão até o limite em que a válvula de alívio no topo do pressurizador foi aberta por segurança.

Com a válvula do pressurizador aberta, o desarme do reator e o reestabelecimento do sistema de bombas do circuito secundário, a pressão no circuito primário começou a cair, em seguida o painel de controle indicava para os operadores o fechamento automático da válvula de alívio do pressurizador e o estabelecimento da pressão a um nível seguro.

As ações de segurança realizadas até este momento deveriam garantir a segurança da unidade, porém houve uma falha no fechamento da válvula de alívio do pressurizador e essa ficou entreaberta. Os operadores não tomaram conhecimento desse fato, pois no painel de controle da usina havia apenas a indicação de que o motor responsável pelo fechamento da válvula de alívio do pressurizador foi acionado.

Com a válvula de alívio do pressurizador permitindo a liberação de água para fora do circuito primário caracterizou-se um acidente de perda de refrigerante (LOCA – *Loss Of Coolant Accident*).

Os operadores realizaram um conjunto de ações para mitigar o acidente imaginando que a válvula estava fechada, isto é, não tomaram conhecimento do LOCA.

O vazamento da água pela válvula do pressurizador reduziu o nível de refrigerante no circuito primário e o sistema de resfriamento de emergência automaticamente iniciou a injeção de água, para evitar o superaquecimento do núcleo do reator. Os operadores cancelaram essa operação imaginando que se perderia o controle da pressão do circuito primário, pois inundariam o pressurizador com água. Esse pensamento estaria correto se não houvesse perda de refrigerante.

A usina operou por cerca de 140 minutos com a válvula aberta, o nível de refrigerante do núcleo caiu, as varetas combustíveis ficaram sem refrigeração, atingiram temperaturas muito elevadas ocasionando a fusão parcial do núcleo.

2.2.2 Experiência obtida com o acidente

O estudo do acidente em TMI possibilitou uma reavaliação (NUREG-0585, 1979) da segurança em toda a indústria nuclear na parte reguladora, em projeto de plantas, acidentes de base de projeto, treinamento de pessoal, procedimentos de emergência e principalmente na interface homem-sistema. Nessa última, destacam-se a revisão das salas de controles que continham muita informação dificultando a tomada de decisão para o operador. A Figura 2.2 mostra uma foto da sala de controle de TMI-2 e sua grande quantidade de displays e comandos.

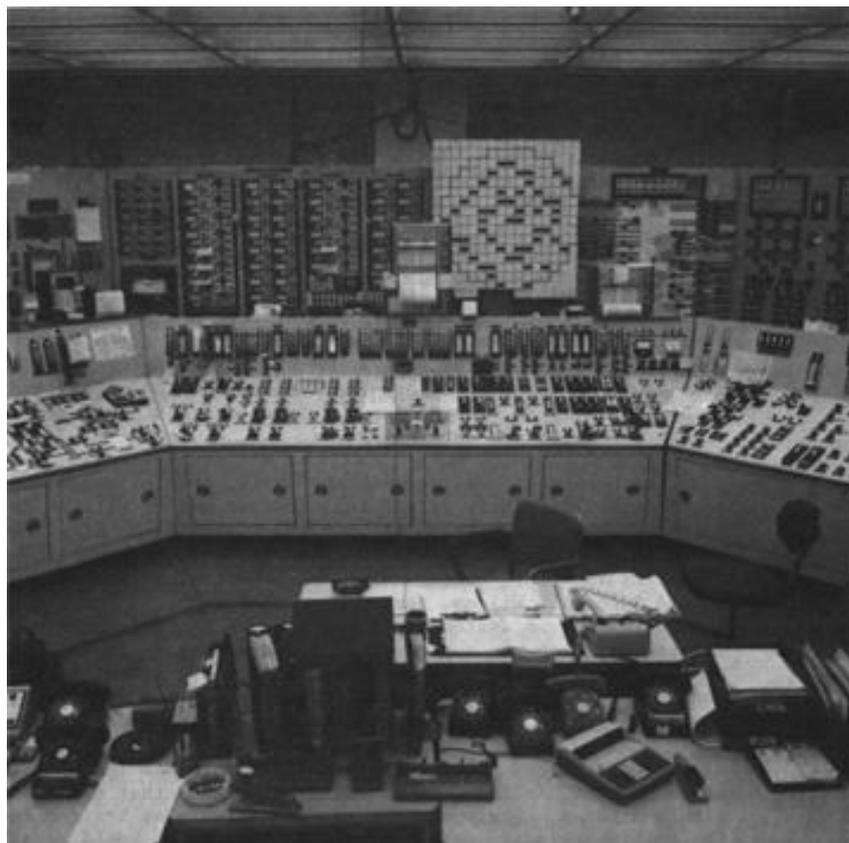


Figura 2.2 – Sala de controle TMI-2 (KEMENY, 1979)

Foram feitas algumas revisões (US.NRC, 2007) , em todas as usinas dos EUA em aspectos de interface homem-sistema de como as informações eram apresentadas

para os operadores, a apresentação das informações adequadas em displays para demonstrar o estado de segurança da planta e a monitoração de segurança também foi revista, procurando sua otimização em condição de operação normal, anormal e de emergência.

Chegou-se à conclusão (KEMENY, 1979) que as salas de controle das usinas da geração de TMI-2 não eram projetadas para as necessidades da cognição do operador. Os operadores eram sobrecarregados com muitos alarmes, as informações necessárias não eram apresentadas de maneira conveniente e inteligível.

Outros aspectos que também foram avaliados são a comunicação entre a sala de controle, a operação da usina com múltiplas falhas e a adequação dos procedimentos operacionais a condições de limitações de instrumentação e displays

Buscando atender as observações feitas pelos estudos (KEMENY, 1979) (NUREG-0585, 1979) (U.S.NRC, 1979), as plantas da geração seguinte passaram a incorporar sistemas para detectar e mitigar o resfriamento inadequado do núcleo e monitorações de condições pós-acidentes. Além disso, as salas de controle foram projetadas levando em consideração fatores da cognição humana e com tecnologia de computadores priorizando a informação para os operadores em serviço.

2.3 SISTEMA DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA

2.3.1 Introdução

A interface homem-sistema deve ser projetado (IAEA, 2012) (U.S.NRC, 2007) (U.S.NRC, 2012) para suprir o operador com informações objetivas e abrangentes, compatíveis com o tempo necessário para a resposta do operador.

Como gerente de sistemas, o operador deverá receber informações que permitam a completa avaliação do estado geral da unidade nas condições normais de operação, em ocorrências operacionais previstas ou em condições de acidente e confirmação de que as ações automáticas de segurança estão em andamento e a determinação do início das ações de segurança a serem adotadas pelo operador.

Como operador de equipamentos, o operador deverá receber informações sobre os parâmetros associados aos sistemas da unidade e equipamentos para confirmar que as ações de segurança necessárias podem ser iniciadas.

O gerenciamento de acidentes pode ser classificado de duas maneiras, o gerenciamento orientado por eventos e o orientado por funções críticas de segurança.

O gerenciamento orientado por eventos considera um tratamento específico para o evento que causou o acidente. A conexão direta entre a causa e o acidente permite que os guias do gerenciamento do acidente sejam escritos na forma de procedimentos específicos. Sob este conceito, o diagnóstico do acidente é suficiente para encontrar um procedimento específico, e também para levar a unidade a uma condição segura.

Entretanto, durante um acidente ocorrem interações físicas entre os sistemas e a possibilidade de combinações entre acidentes e a observação dos seus sintomas nem sempre permite uma identificação não ambígua das suas causas. A identificação efetiva de um acidente baseada em sintomas só é possível quando são descartados todos os outros eventos que são causados pelos mesmos sintomas; quando isso não ocorre, todos os possíveis acidentes que possuem como resultado os mesmos sintomas devem ser considerados como potenciais.

Ocorrem situações onde um diagnóstico não pode ser feito ou pode estar incorreto, como em TMI-2. A experiência operacional observou que o gerenciamento orientado por evento, por si só, é insuficiente, sendo necessária a sua complementação.

A gestão por funções de segurança é baseada em um número de FCS que devem ser satisfeitas independentemente do evento em ocorrência. As FCS formam um conjunto de funções especificadas em guias de respostas de emergência definidas pelo projetista da unidade.

2.3.2 Funções Críticas de Segurança

Em uma usina nuclear existem quatro barreiras de proteção, a primeira é a pastilha combustível, que é projetada para conter o material nuclear retendo os elementos sólidos, entretanto, os gases podem escapar da pastilha.

A segunda barreira de proteção são as varetas combustível que envolvem um conjunto de pastilhas e são constituídas com materiais que resistem altas temperaturas com o objetivo de confinar o material que possa ser liberado pelas pastilhas combustível.

A terceira barreira de proteção é o circuito primário, composto pelo vaso do reator, bombas de refrigeração e tubulações associadas, tem como objetivo bloquear o transporte de material radioativo para o sistema secundário da usina e para o prédio do reator.

A quarta barreira de proteção é o prédio da contenção que é composto por uma chapa de aço e por uma camada de concreto de espessura projetada de modo a suportar choques estruturais na contenção; o prédio bloqueia a passagem de produtos de fissão, que tenham passado pelas outras barreiras, para o meio ambiente.

O conceito de FCS tem base no princípio de que as liberações acidentais de radioatividade para o meio ambiente podem ser minimizadas se as barreiras de proteção estiverem protegidas. Em consequência, o retorno da usina a uma condição segura pressupõe a restauração das FCS, onde as funções estarão plenamente satisfeitas.

As funções de segurança para os reatores nucleares são definidas (IAEA-GSR, 2009) como as funções necessárias para a instalação prevenir ou mitigar consequências radiológicas em operação normal, antecipação de ocorrências e condições de acidentes. As principais funções de segurança (IAEA, 2012) são as funções que atuam no controle da criticalidade, na remoção de calor do reator e das piscinas da piscina de combustível, confinamento de material radioativo, blindagem contra radiação, controle planejado de liberação de radioatividade e limitação das liberações de acidentais de radioatividade.

Dentre as funções de segurança existem as que são estrategicamente mais importantes, as chamadas de Funções Críticas de Segurança, que para o reator nuclear estão definidas (IAEA, 2009) como as funções que previnem um dano ao núcleo, tais como a obtenção e manutenção da subcriticalidade do núcleo, o resfriamento do núcleo, inventário e integridade do circuito primário.

O inventário do circuito primário diz respeito ao nível de refrigerante do circuito primário. Se os operadores de TMI tivessem essa informação de maneira clara haveria grandes chances de o acidente ter sido evitado.

A experiência obtida com o acidente de TMI introduziu o conceito de Funções Críticas de Segurança (FCS) para o gerenciamento de risco e otimização de consciência operacional, possibilitando uma melhor tomada de decisão e priorização de ações em condições normais, anormais e de emergência.

Para o funcionamento do sistema de FCS esse deve processar as variáveis informações importantes do processo através do sistema de monitoração de parâmetros de segurança (SPDS – *Safety Parameter Display System*). (NUREG,1981) A interação do sistema de SPDS, FCS e operador é apresentada na Figura 2.3.

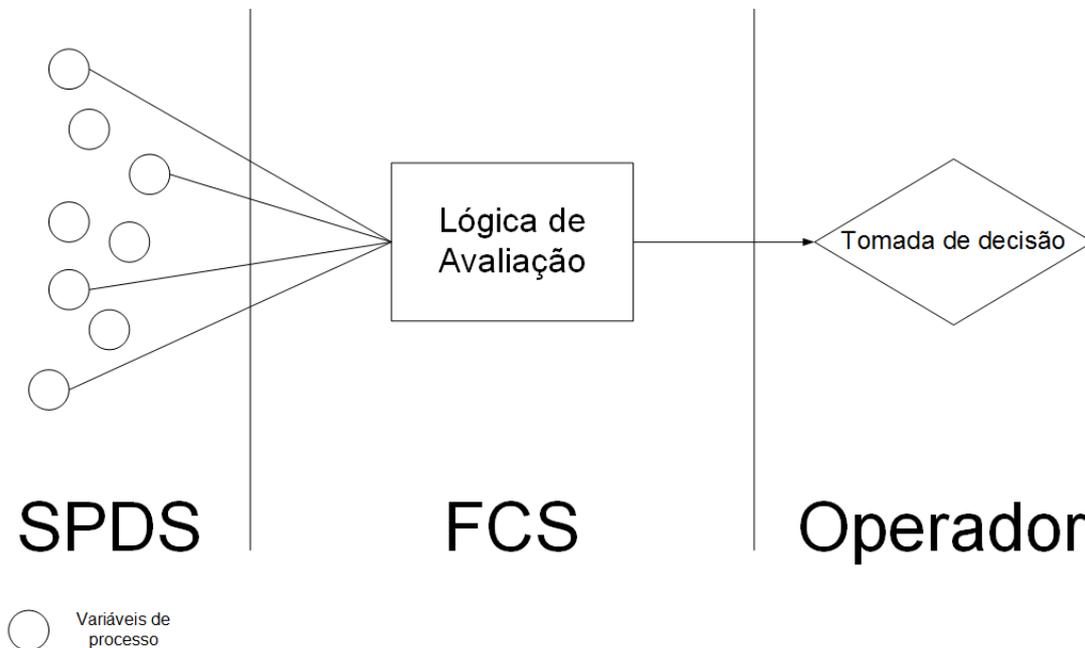


Figura 2.3 – Interação SPDS-FCS-Operador

A função primária do sistema de monitoração de processos (NUREG,1981) é servir como uma ajuda ao operador na rápida detecção de condições anormais, proporcionando uma visualização de parâmetros de planta a partir da qual o estado de segurança de operação pode ser avaliada na sala de controle.

A monitoração das FCS torna possível detectar rapidamente as condições críticas da unidade e tomar as medidas necessárias e efetivas.

O sistema de FCS avalia continuamente o estado de segurança da usina tanto em condição de operação normal, como anormal ou de emergência, através da monitoração em tempo real de um conjunto árvores de estado que compõem as chamadas funções críticas de segurança.

2.3.3 Árvores de estados

As árvores de estado são compostas por um conjunto de estados que são caracterizados através da monitoração e avaliação contínua das variáveis críticas da

planta, de forma a detectar situações anormais e que, se confirmadas, direcionarão o operador a um ou mais procedimentos de respostas ao evento desta situação. O direcionamento para a determinação do estado de segurança da usina, independentemente da sequência de acidente ocorrida, está contido nas árvores de estado das FCS. A Figura 2.4 apresenta uma árvore de estado para uma FCS.

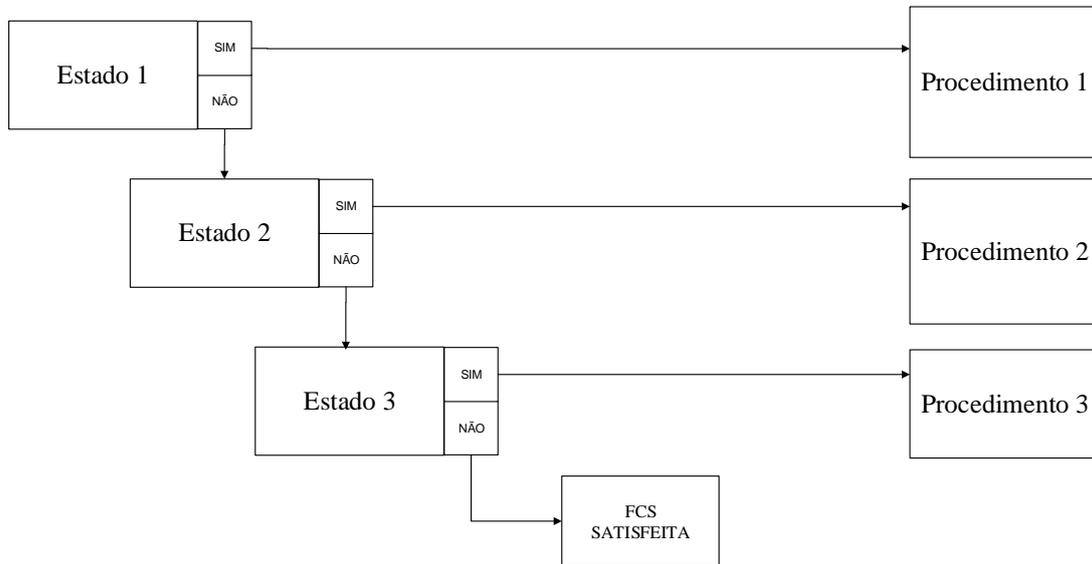


Figura 2.4 - Árvore de estados genérica

Um conjunto parâmetros é avaliado em cada estado de maneira sistemática para se determinar o grau de ameaça a cada FCS. Cada avaliação do estado de uma árvore de estado produz um único ponto de saída, que indica o grau de ameaça da FCS correspondente.

Cada estado caracteriza o grau de ameaça à FCS:

Estado 1 – Ameaça extrema;

Estado 2 – Ameaça severa;

Estado 3 – Condição anormal;

Estado 4 – Condição normal, FCS satisfeita.

O estado 1 indica o maior grau de ameaça à FCS; o estado 2 indica uma ameaça intermediária entre o estado 1 e o 3; o estado 3 é a primeira indicação de que a FCS está sendo violada; o estado 4 indica a condição de normalidade e não violação da FCS.

Existe uma árvore de estado para cada uma das FCS, sendo que o conjunto dessas árvores determina o estado de segurança da usina.

O sistema de FCS avalia continuamente as árvores de estado e fornece em tempo real ao operador, através de meios gráficos, o estado atualizado de todas as funções críticas de segurança.

O sistema de FCS indica a prioridade das ações que devem ser tomadas pelo operador, para isto existe uma hierarquização das FCS e das ameaças, em cada FCS é indicado um ou mais procedimentos para mitigação da violação da FCS. A equipe de operação verifica o cumprimento das FCS da planta fazendo a leitura de parâmetros representativos e, em caso de ameaça às FCS, executa os procedimentos necessários.

3 O COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Este capítulo apresenta as características principais do urânio, que é o combustível nuclear mais utilizado; em seguida as principais etapas que compõem o ciclo do combustível nuclear e a apresentação de algumas características específicas do ciclo do combustível nuclear no Brasil.

3.1 O URÂNIO

A descoberta (TSOULFANIDIS, 2013) do urânio é atribuída ao professor e farmacêutico alemão Martin Heinrich Klaporth, que em 1789 conseguiu isolar um óxido de urânio. O nome desse óxido foi uma homenagem ao planeta recém descoberto. Em 1942, o químico francês Eugène Péligot conseguiu isolar pela primeira vez o metal.

O urânio é o elemento químico metálico de símbolo U de massa 238, número atômico 92 e pertencente à família dos actínídeos. Normalmente encontrado na natureza no estado sólido em forma de minério, é mais abundante que a prata e que o ouro e menos abundante que o ferro e o alumínio (TSOULFANIDIS, 2013).

O mineral urânio é qualquer concentração de minerais que contenha urânio e permita a exploração econômica. Cerca de 100 tipos de minerais contendo urânio foram identificados (TSOULFANIDIS, 2013); cada mineral tem sua cor característica. Os óxidos são pretos ou marrons, já os fosfatos normalmente amarelos e a torbenita é verde. A concentração de urânio efetiva depende de cada depósito de urânio.

Isótopos são átomos de um mesmo elemento químico que possuem o mesmo número de prótons e diferem em números de nêutrons e de massa. O urânio possui alguns isótopos, somente três deles são encontrados na natureza e são classificados pela sua massa.

Os principais isótopos do são o massa 238 (^{238}U), o de massa 235 (^{235}U) e o de massa 234 (^{234}U). Existem outros isótopos como ^{236}U , ^{233}U e ^{239}U mas não são encontrados naturalmente (BENEDICT, 1981). A Tabela 3.1 apresenta a composição isotópica do urânio natural.

Tabela 3.1 – Concentração isotópica do urânio natural (TSOULFANIDIS, 2013)

Isótopo	Concentração
^{234}U	0,0054%
^{235}U	0,7205%
^{238}U	99,234%

3.2 CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

O conjunto de etapas do processo industrial que transforma o mineral urânio, desde a sua mineração no estado natural até a sua disposição final, é chamado de ciclo do combustível nuclear (CCN). (TSOULFANIDIS, 2013)

O CCN é dividido em duas partes, o *front end*, que são as etapas que ocorrem antes da utilização do combustível em um reator e o *back end*, que são as etapas subsequentes. O CCN é classificado em aberto, quando não há reprocessamento de combustível, ou fechado, quando essa etapa é realizada.

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam dois exemplos de fluxogramas do CCN sem e com reprocessamento respectivamente. Existem outras possibilidades de CCN como a utilização de urânio natural onde a etapa de enriquecimento não é executada ou CCN com reprocessamento onde não é fabricado o MOX.

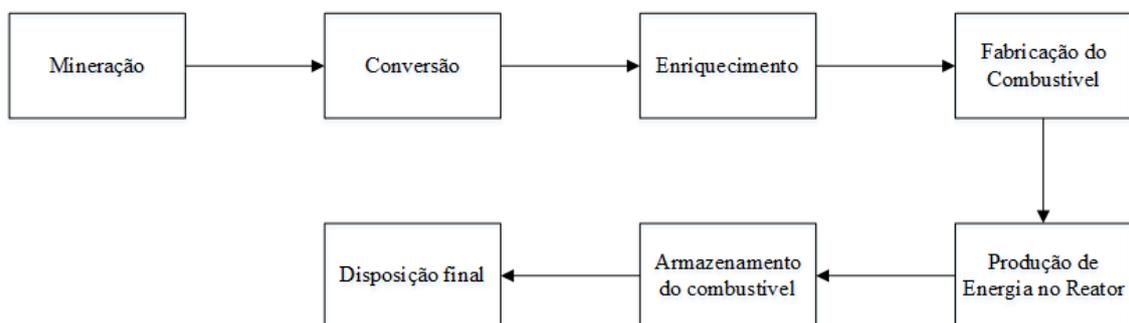


Figura 3.1 – Ciclo do combustível nuclear sem reprocessamento Adaptado (LAMARSH, 2001)

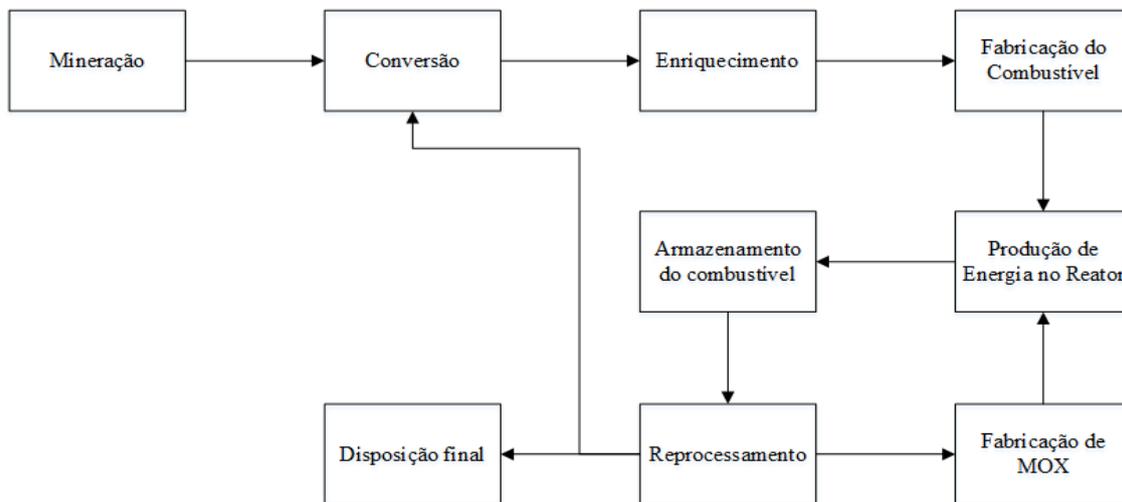


Figura 3.2 – Ciclo do combustível nuclear com reprocessamento Adaptado (LAMARSH, 2001)

3.2.1 Etapas do Ciclo do Combustível Nuclear

3.2.1.1 Mineração

A primeira etapa do CCN é a mineração, que consiste em obter o minério de urânio e transformá-lo em *yellowcake* (U_3O_8), nesta etapa, o urânio está com sua composição isotópica natural.

3.2.1.2 Conversão

A etapa de conversão tem como objetivo purificar o *yellowcake* e transformá-lo em hexafluoreto de urânio (UF_6).

O UF_6 se torna gasoso a temperatura relativamente baixa ($56^\circ C$), essa propriedade possibilita o processo de enriquecimento, que é a etapa seguinte daí se segue a importância da etapa de conversão.

3.2.1.3 Enriquecimento

Na maioria dos reatores utilizados no mundo a concentração natural do isótopo U-235 não é adequada para estabelecer a reação em cadeia. Para produzir o combustível nuclear com a concentração de U-235 adequada, entre 2% e 5%, é necessário o processo de enriquecimento isotópico.

O método predominante de enriquecimento é baseado na diferença de massa entre o U-235 e o U-238, o gás UF_6 passa por um conjunto de centrífugas que fazem

uma separação isotópica do urânio. As centrífugas são agrupadas, formando cascatas concentram as moléculas pesadas de UF_6 na parte de cima da centrífuga e as mais leves na parte de baixo.

Através das centrífugas se produz dois tipos de urânio, um enriquecido e outro pobre em U-235. A Figura 3.3 apresenta um esquema de cascata de enriquecimento.

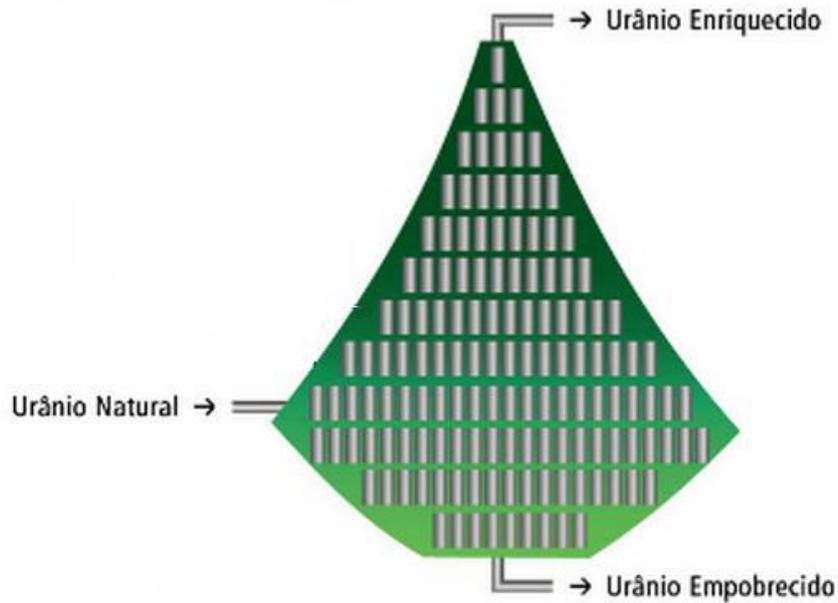


Figura 3.3 - Cascata de enriquecimento de urânio Fonte: INB

3.2.1.4 Fabricação do combustível nuclear

Após o enriquecimento isotópico do urânio, o UF_6 é convertido em UO_2 . Cada reator demanda um tipo característico de combustível; nos reatores mais comuns o UO_2 é armazenado em cilindros de metal denominados varetas combustíveis, que são agrupadas no conjunto denominado elementos de combustível como é apresentado a Figura 3.4.

Elemento combustível

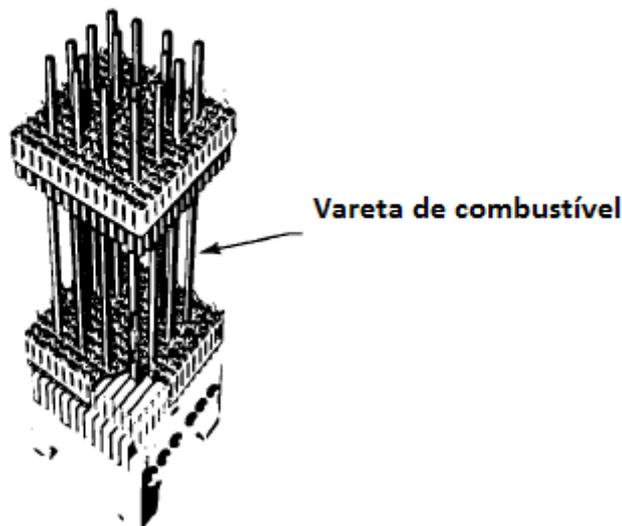


Figura 3.4 – Vareta de combustível e elemento combustível Adaptado de (TODREAS, 1993)

3.2.1.5 Produção de energia no reator

Fabricado o elemento combustível, esse é instalado no núcleo do reator e se inicia a etapa de produção de energia na usina. A vida útil de uma usina é de 40 a 60 anos e durante esse tempo são feitas várias recargas de combustível do núcleo. Tipicamente período entre recargas variam de 12 até 18 meses (TSOULFANIDIS, 2013).

3.2.1.6 Armazenamento do combustível usado

O combustível removido do núcleo do reator após a geração de energia (combustível irradiado) ainda produz calor de decaimento e deve ser resfriado; normalmente é armazenado na piscina de combustível, que é um grande reservatório com água localizado dentro do próprio sítio da usina.

3.2.1.7 Reprocessamento

O combustível irradiado é altamente radioativo, na sua composição existe grande parte do ^{238}U original, entre 0,6% e 0,8% de ^{235}U e parte do ^{238}U gera o plutônio (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu e ^{242}Pu).

Os isótopos presentes no combustível irradiado podem ser reaproveitados através do reprocessamento. Após essa etapa, os isótopos de urânio e o plutônio recuperados podem ser utilizados em usinas novamente.

Após o reprocessamento, dependendo do propósito, o urânio pode ser enviado diretamente para a fábrica de elemento de combustível ou para uma planta de enriquecimento ou simplesmente ser armazenado.

O plutônio é enviado para fábricas de combustível que produzem o MOX (*Mixed-Oxide Fuel* – Combustível de Óxido Misto). O MOX é um óxido de plutônio e urânio que pode ser utilizado como combustível para o reator.

3.2.1.8 Disposição final

Durante todo o CCN são produzidos rejeitos radioativos que são classificados em 2 tipos principais, os rejeitos de alta atividade (HLW – *High Level Wastes*) e os de baixa atividade (LLW – *Low Level Wastes*).

Os HLW são definidos como material altamente radioativo resultante do reprocessamento de combustível irradiado, o próprio combustível irradiado ou qualquer material sólido ou líquido que tenha uma concentração de produtos de fissão suficiente para ser classificado como tal. Esse material deve ser isolado permanentemente em depósitos que não permitam o contato com o ambiente até que o poder de dano seja atenuado.

Os LLW são definidos como materiais de baixa atividade radioativa gerados em todas as etapas que envolvem materiais radioativos. Como exemplos de LLW podem-se citar roupas, papéis, luvas ou instrumentos contaminados. Esse material deve ser isolado em depósitos adequados.

3.3 CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL

O CCN no Brasil é o aberto; são feitas apenas as etapas do *front end* e a única etapa do *back end* é o armazenamento do combustível irradiado nas piscinas no sítio das usinas. A Figura 3.5 apresenta as etapas do CCN brasileiro.

Todas as etapas são feitas em escala industrial para o suprimento da demanda das usinas nacionais, a única etapa que é feita apenas em escala piloto é a conversão do U_3O_8 em UF_6 .



Figura 3.5 – Ciclo do combustível nuclear no Brasil Fonte:INB

O Brasil se encontra em uma posição de destaque no cenário internacional em se tratando de reservas de urânio, apesar de ter apenas 25% de todo o seu território prospectado, atualmente se encontra na sétima posição mundial com uma reserva de 309 mil toneladas de U_3O_8 (INB, 2013_b).

As reservas são classificadas quanto ao custo de produção de urânio e as reservas brasileiras possuem custo de produção menor que U\$80 por quilo de urânio, como mostra a Tabela 3.2. As reservas se diferenciam também pela forma de cálculo da quantidade de urânio presente na reserva, na reserva medida a tonelagem de minério é computada com base em medições e análises detalhadas de dimensões e teores; na reserva indicada a quantidade e o teor de minério são computados parcialmente em medidas e amostras específicas; na reserva inferida a estimativa é feita com base no conhecimento dos caracteres geológicos do depósito mineral, havendo pouco ou nenhum trabalho de pesquisa.

Tabela 3.2 Reservas de urânio brasileiras Fonte: INB

Depósito-Jazida	Medidas e Indicadas			Inferidas	TOTAL
	<40US\$/kg U	<80US\$/kg U	Sub-Total	<80US\$/kg U	
Caldas (MG)		500t	500t	4.000t	4.500t
Lagoa Real/Caetité (BA)	24.200t	69.800t	94.000t	6.770t	100.770t
Santa Quitéria (CE)	42.000t	41.000t	83.000t	59.500t	142.500t
Outras				61.600t	61.600t
TOTAL	66.200t	111.300t	177.500t	131.870t	309.370t

Em comparação com as reservas mundiais, as brasileiras são bastante competitivas comercialmente, pois poucos países possuem essa quantidade de reservas dessa qualidade, como demonstra o gráfico na Figura 3.6.

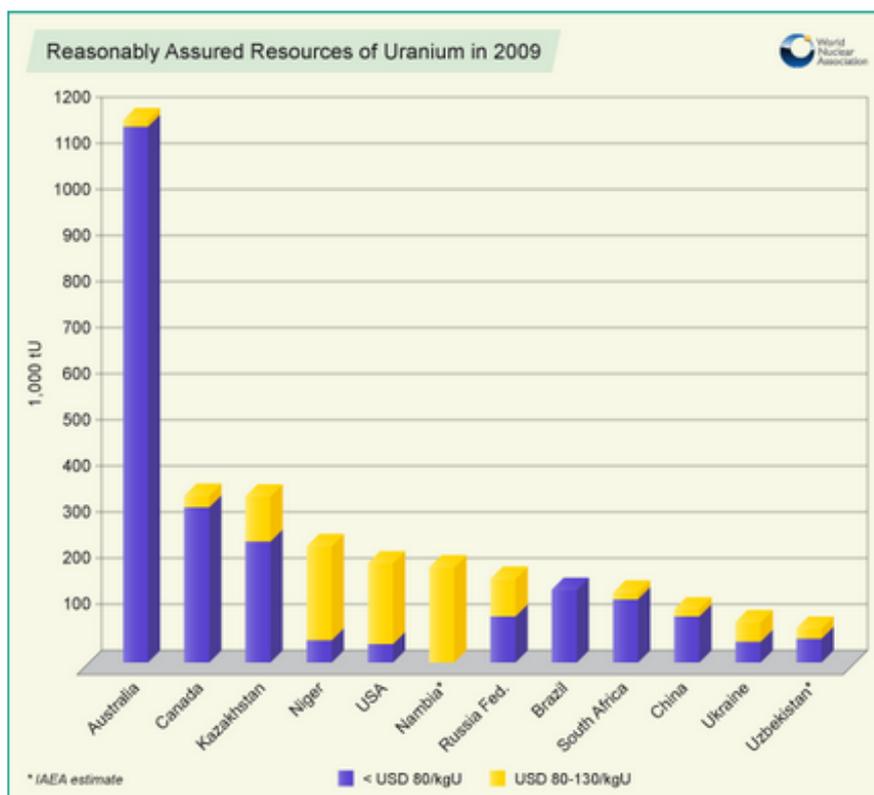


Figura 3.6 – Reservas de urânio no mundo por custo de produção

O Brasil possui o domínio da tecnologia necessária para executar todas as etapas necessárias do CCN em escala piloto e futuramente em escala industrial. Possui também

uma posição de destaque nas reservas internacionais de minério de urânio e possui o domínio da tecnologia para a geração de energia a partir de fonte nuclear, atualmente implantada nas usinas de Angra I e II, o que o coloca em uma posição de destaque no cenário da energia nuclear no mundo.

4 ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA DE CONVERSÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

Neste capítulo são apresentadas as características gerais do processo de conversão de *yellowcake* em hexafluoreto de urânio, incluindo os fluxogramas, descrições dos processos mais comuns e características da produção mundial com o objetivo de contextualizar os processos que serão descritos na unidade que foi estudada. Na descrição do projeto da Unidade de Conversão de Hexafluoreto de Urânio da INB (USICON) é feita uma delimitação dos processos estudados e apresentados os processos que serão executados na unidade, os equipamentos utilizados e a localização dos processos nos prédios da unidade.

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROCESSO DE CONVERSÃO

Na etapa de conversão do urânio, o *yellowcake* é processado quimicamente para se produzir o composto hexafluoreto de urânio (UF_6), que, posteriormente, será processado no estado gasoso nas usinas de enriquecimento isotópico. No mundo o processo de conversão é feito comercialmente por 6 países como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Produção de UF_6 mundial (IAEA, 2013)

País	Nome da Planta	Produção
Canadá	Cameco - Port Hope	12.500 t/ano
China	Lanzhou	3.000 t/ano
França	Comurhex Pierrelatte	14.000 t/ano
Rússia	Angarsk/ Ekaterinburg	24.000 t/ano
Reino Unido	Springfields Line 4 Hex Plant	6.000 t/ano
Estados Unidos	Metropolis / Converdyn	17.600 t/ano
	Total	77.100 t/ano

O processo de conversão admite variantes para o processo de produção de UF_6 que são descritas em linha gerais em (BENEDICT, 1981), (IAEA, 2010) e

(TSOUFANIDIS, 2013). A Figura 4.1 apresenta um fluxograma dos processos da etapa de conversão com as duas rotas mais comuns.

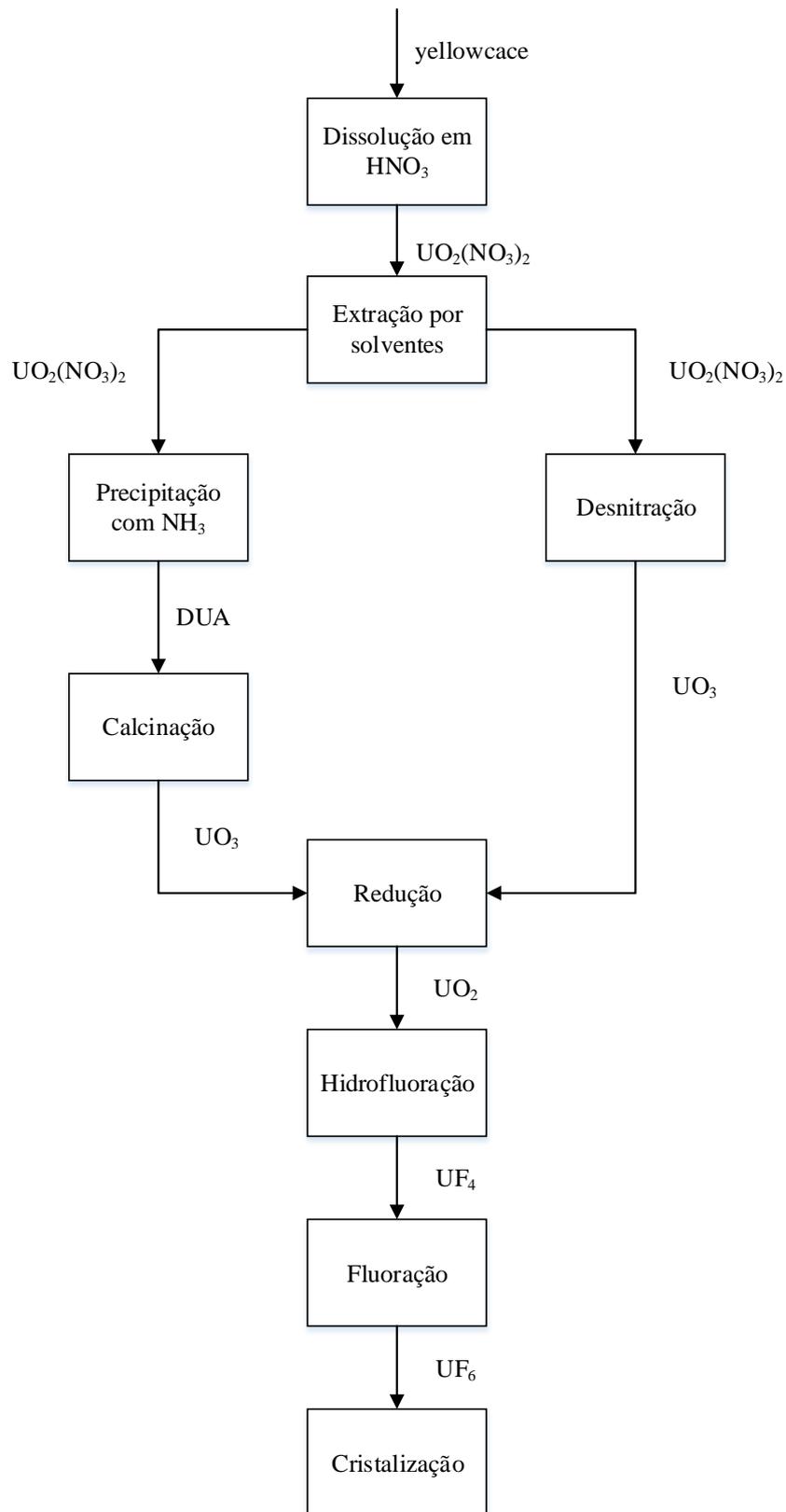


Figura 4.1 – Fluxograma geral da conversão. Adaptado de (AZEVEDO, 1996)

4.2 ETAPAS DA CONVERSÃO

4.2.1 Purificação do concentrado de urânio

Antes do *yellowcake* ser convertido em UF_6 , ele deve ser purificado, a primeira etapa no processo convencional de conversão é a dissolução do concentrado de urânio (*yellowcake*) em ácido nítrico (HNO_3). O produto dessa etapa é uma solução aquosa de nitrato de uranila, $UO_2(NO_3)_2$.

A segunda etapa de purificação, que é feita na maioria das plantas de conversão, é a extração por solventes que tem como objetivo remover impurezas metálicas do nitrato de uranila. O solvente mais comum é o fosfato de tributílica (TBP).

4.2.2 Conversão do nitrato de uranila em UO_3

Existem duas rotas principais para a conversão do nitrato de uranila em trióxido de urânio (UO_3). Na primeira, após a extração por solvente, é feita uma precipitação através da adição da amônia (NH_4) ao nitrato de uranila e o produto desse processo é o diuranato de amônia (DUA). Terminada a etapa de precipitação, é feita a calcinação do DUA para liberar a amônia do processo e formar o UO_3 .

A outra rota possível é chamada de desnitração, na qual o nitrato de uranila é concentrado para ser iniciado o processo de produção de UO_3 , que serve de insumo para a produção do UF_6 .

O nitrato de uranila proveniente da etapa de purificação passa por estágios de evaporação para ser concentrado e alimentar os reatores de desnitração, onde este concentrado é agitado, eletricamente aquecido e termicamente decomposto até formar trióxido de urânio (UO_3), óxidos de nitrogênio (NO_x) e vapor de água.

4.2.3 – Redução

O processo de redução consiste em converter o UO_3 em UO_2 , esta etapa pode ser realizada em alguns equipamentos, como fornos rotativos, a exemplo do que ocorre em Springfield, fornos de leito contínuo, como na Comurhex, ou em fornos de leito fluidizado, como na Cameco.

O UO_3 é convertido em UO_2 através da reação com o gás de amônia craqueada ($3H_2 : N_2$) ou pela mistura de gases hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N_2), diretamente.

A reação de dissociação da amônia é $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3 \text{H}_2$.

A reação de redução é $\text{UO}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{UO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

4.2.4 – Hidrofluoração

O processo de hidrofluoração consiste em converter o UO_2 em tetrafluoreto de urânio (UF_4). Assim como a redução, a hidrofluoração pode ser realizada em diversos equipamentos. Na Coverdyn, são utilizados reatores de leito fluidizado, já na Comurhex são utilizados reatores de leito móvel e, em Springfield são usados fornos rotativos.

Em todas as plantas o UO_2 é convertido através da reação com o ácido fluorídrico (HF). As reações com HF anidro são chamadas de hidrofluoração a seco e as com que utilizam HF em meio aquoso, de hidrofluoração úmida.

A reação de hidrofluoração é $\text{UO}_2 + 4 \text{HF} \rightarrow \text{UF}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$.

4.2.5 – Fluoração do UF_4

O processo de fluoração consiste em fazer o pó de UF_4 produzido na hidrofluoração reagir com o flúor elementar (F_2). Essa reação é realizada em um reator do tipo torre chamado de reator de chamas.

A reação de fluoração é $\text{UF}_4 + \text{F}_2 \rightarrow \text{UF}_6$.

4.2.6 – Cristalização

Na etapa de cristalização não ocorre nenhuma reação química, esse processo consiste em dessublimar o UF_6 produzido no processo de fluoração. Uma mistura de gases contendo UF_6 proveniente dos reatores de chamas é direcionada para o cristalizador (armadilha fria), que está a baixa temperatura. Quando a mistura de gases entra no cristalizador, o UF_6 se solidifica e os outros gases são liberados.

4.3 DELIMITAÇÃO DOS PROCESSOS ESTUDADOS

Durante a maior parte da realização deste trabalho o conceito do projeto era dividir a USICON em duas partes. Na primeira, seria feita a purificação do *yellowcake* e a produção de UO_3 , essa instalação seria implantada no município de Caetité no estado da Bahia, local onde é feita a mineração do urânio. E uma segunda instalação seria

implantada no município de Resende, no estado do Rio de Janeiro, para realizar os processos de transformação do UO_3 até a produção de UF_6 . Após uma análise inicial das duas plantas, a instalação de Resende foi identificada como a que concentra os principais perigos contidos no processo de conversão e, como consequência a que poderia ser mais beneficiada com um conjunto de FCS.

Atualmente, o conceito da USICON sofreu uma alteração e está sendo desenvolvido de modo que os processos de purificação do *yellowcake* e obtenção de UO_3 sejam feitos em uma instalação também em Resende-RJ. Desta maneira, todos os processos da conversão serão localizados no mesmo sítio da INB no Rio de Janeiro.

Esta alteração não é relevante para este trabalho, que esse se propôs a estudar a aplicação do conceito de FCS a processos de uma unidade de produção de UF_6 e os processos críticos para a unidade de conversão foram estudados.

4.4 DESCRIÇÃO DA UNIDADE

4.4.1 Introdução

A unidade será localizada no município de Resende-RJ, terá capacidade de produção de 1.500 toneladas de UF_6 por ano. Sua construção é formada por 3 prédios principais: Abastecimento de HF, Produção de Flúor e Produção de UF_6 .

Os principais processos que serão executados na planta são:

- (a) Abastecimento de HF;
- (b) Redução;
- (c) Hidrofluoração;
- (d) Produção de Flúor;
- (e) Fluoração
- (f) Cristalização;
- (g) Destilação;

A Figura 4.2 mostra um diagrama da localização dos processos dentro dos prédios.

O abastecimento de HF é feito em um prédio separado e é bombeado para dentro dos outros prédios para ser utilizado nos processos da unidade; é utilizado na hidrofluoração e na preparação de eletrólito para as células de flúor.

O processo de redução é feito em um forno rotativo dentro do prédio de produção de UF₆.

O processo de hidrofluoração é feito em um forno rotativo dentro do prédio de produção de UF₆.

O processo de produção de flúor é feito em um prédio dedicado e inclui a preparação de eletrólito para abastecer as células de flúor e um sistema de alimentação de flúor que o envia para o reator de chamas.

O processo de fluoração é feito no reator de chamas e no reator de pratos dentro do prédio de produção de UF₆.

O processo de cristalização é feito nos cristalizadores após a fluoração dentro do prédio de produção de UF₆. Após a cristalização, o UF₆ passa por um armazenamento intermediário (vaso buffer) no estado líquido antes de ir para o processo de destilação

O processo de destilação é feito na coluna de destilação dentro do prédio de produção de UF₆.

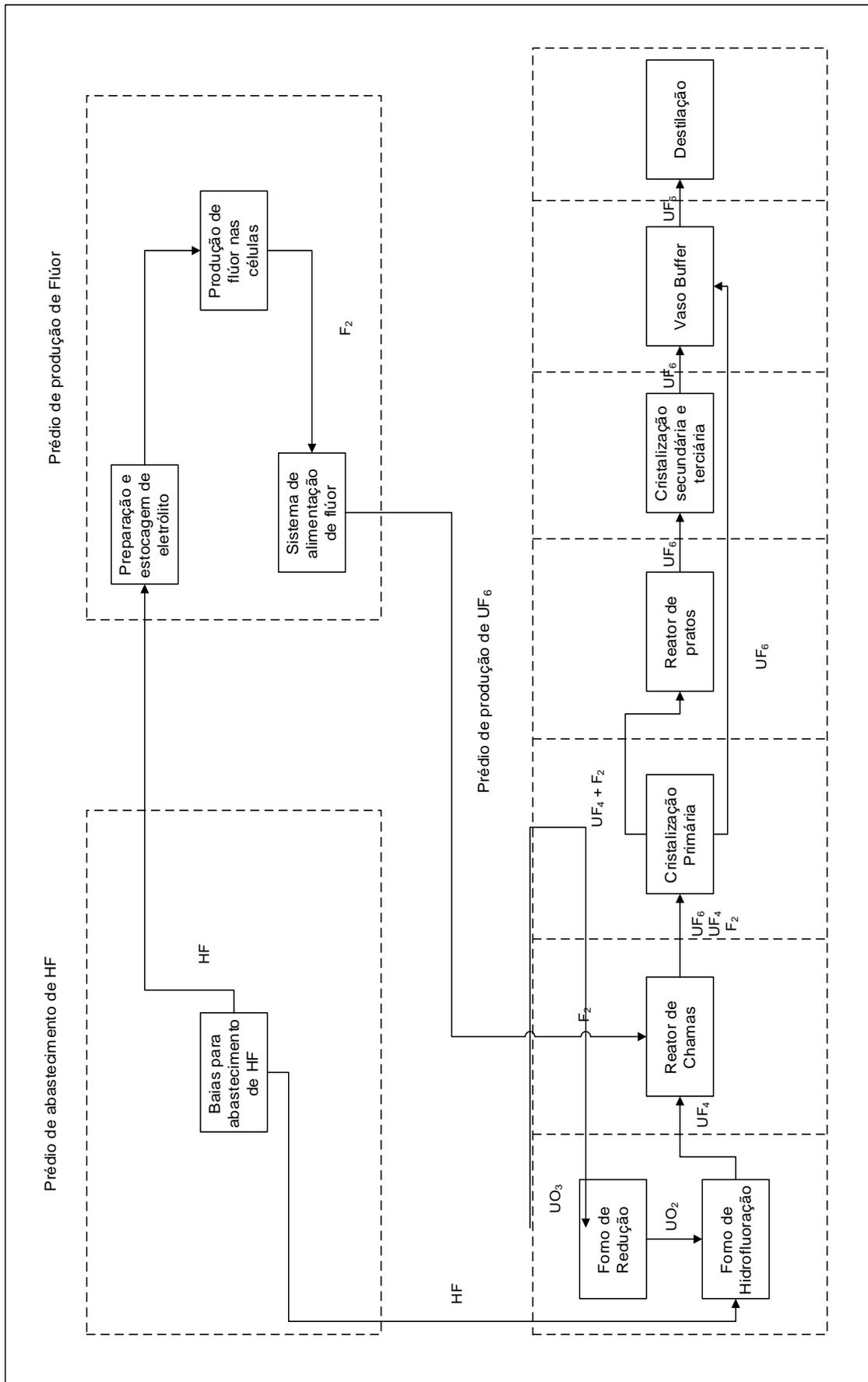


Figura 4.2 – Localização dos processos nos prédios

4.4.2 Abastecimento de HF

O ácido fluorídrico (HF) é utilizado como insumo em dois processos na unidade; no forno de hidrofusão e na preparação do eletrólito para as células de flúor. Não há produção de HF na unidade, o HF chega por transporte rodoviário e é armazenado nela.

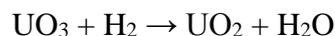
Para o abastecimento, a carreta entra na baia, o cilindro de HF é desacoplado e a carreta sai e a baia é fechada para o início do processo. Um trabalhador vestido com equipamento de proteção especial, acopla a mangueira de abastecimento de HF ao isotanque.

Cada baia possui uma entrada e uma saída, a fim de evitar manobras com a carreta, conta também com uma área especial para o trabalhador se vestir com roupas adequadas para a operação. Além disso, as baias possuem sistemas de detecção de vazamento de HF e de fumaça, sistema de refrigeração para manter o interior da baia a uma temperatura de 10°C (para diminuir a volatilidade do HF), sistema de sprays de água que são acionados em caso de vazamento de HF para fazer o abatimento da nuvem e um sistema de ventilação forçado para conduzir os gases ácidos para uma torre de lavagem básica.

4.4.3 Redução

O processo de redução consiste em transformar o trióxido de urânio (UO₃) em dióxido de urânio (UO₂).

A reação principal é:



Para esse processo é utilizado um forno rotativo, o pó de UO₃ passa de uma extremidade à outra do forno e, durante esse percurso, ocorre a reação com o H₂ (gás) que é introduzido no sistema em contracorrente.

O H₂, e também o N₂ (que é introduzido junto com o H₂ para evitar os limites de inflamabilidade do hidrogênio), após a reação com o UO₃, passam por um filtro de material sinterizado e saem do processo.

O UO_2 sai do forno e é armazenado em um silo de estocagem intermediária que será levado para o forno de hidrofusão. Um esquema do forno rotativo é apresentado na Figura 4.3.

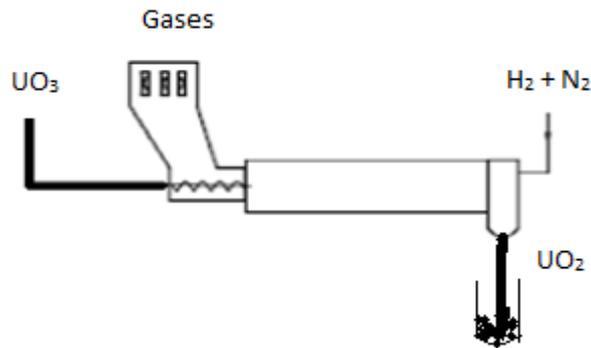


Figura 4.3 - Forno rotativo

Os elementos principais do forno rotativo são:

- a) Alimentação de UO_3 ;
- b) Alimentação de mistura H_2 e N_2 ;
- c) Exaustão de gases;
- d) Descarga de UO_2 ;

4.4.4 Hidrofluoração

O processo de hidrofluoração consiste em transformar o trióxido de urânio (UO_3) em tetraflureto de urânio (UF_4).

A reação principal é



Esse processo, assim como o de redução, acontece em um forno rotativo, onde o pó de UO_2 passa de uma extremidade à outra e durante esse percurso o ácido fluorídrico (HF) é introduzido no sistema em contracorrente.

Após o processo, o UF_4 é colocado em um armazenamento intermediário para ser levado para o processo de fluoração.

4.4.5 Produção de flúor

O flúor gasoso (F₂) é um importante insumo para o processo de fluoração e será produzido na própria usina, como em todas plantas comerciais de produção de UF₆. O primeiro processo é a preparação do eletrólito KF.2HF, que é preparado adicionando HF ao hidrogênio fluoreto de potássio (KF.HF).

O flúor é produzido por eletrólise do KF.2HF e as principais reações químicas do processos são descritas abaixo:

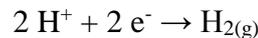
Dissociação do KF.2HF



Reação no anodo



Reação no catodo



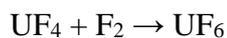
O flúor e o hidrogênio são produzidos em partes diferentes das células de flúor e o contato deve ser evitado, pois a mistura entre os dois resulta em uma reação violenta.

O gás hidrogênio produzido é direcionado para a lavagem de gases e liberado para o ambiente e o gás flúor é tratado e direcionado para um sistema de alimentação para a fluoração.

4.4.6 Fluoração

O processo de fluoração consiste em transformar o tetrafluoreto de urânio (UF₄) em hexafluoreto de urânio (UF₆).

A principal reação é:



Esse processo ocorre em um reator de chamas do tipo torre, onde o pó de UF₄ é alimentado na parte superior do reator, entra em contato com o F₂ (gás) e com a chama do reator, que está a uma temperatura de aproximadamente 1500°C. A reação ocorre

quase que instantaneamente e a pequena porção de UF_4 que não reagiu é armazenada no fundo do reator.

O UF_6 (gás) produzido é direcionado para o processo de cristalização junto com o excesso de flúor e algumas cinzas de UF_4 .

A fluoração no reator de chamas tem um baixo rendimento, cerca de 45%; para melhorar a eficiência do processo, as cinzas de UF_4 e o excesso de F_2 são reprocessados em um reator secundário, chamado reator de pratos.

4.4.7 Cristalização

O UF_6 produzido pelos reatores de chamas e pratos é gasoso e está acompanhado de impurezas sólidas e F_2 . Para fazer a separação do UF_6 , os gases são direcionados para os cristalizadores (também chamados de armadilhas frias ou dessublimadores). Os cristalizadores são cilindros que são resfriados, de modo que sua temperatura interna seja menor que a do ponto de solidificação do UF_6 que, ao passar pelo cristalizador, fica contido no estado sólido e as impurezas saem do cristalizador.

A saída do reator de chamas é acoplada a um cristalizador (cristalização primária); após passar pelo cristalizador, os resíduos são direcionados para o reator de pratos, que é acoplado a dois outros cristalizadores em série (cristalização secundária e terciária).

Após o enchimento dos cristalizadores, uma segunda etapa é iniciada, a de aquecimento. É fechada a conexão do cristalizador com o reator de produção de UF_6 e o cristalizador é aquecido até transformar o UF_6 para o estado líquido, sendo enviado para um tanque (vaso buffer) intermediário para homogeneização.

4.4.8 Destilação

O processo de destilação será um processo opcional na USICON, pois dependendo da especificação do exigida na produção de UF_6 , ele pode ou não ser executado.

O processo é feito em uma coluna de destilação que tem como partes principais a torre, o condensador e o refeedor.

O UF₆ proveniente do vaso *buffer* entra pelo meio da coluna na forma líquida, o refulvedor fica na parte de baixo da coluna e seu objetivo é fazer com que o UF₆ líquido que desce pela coluna seja transformado em gás; o objetivo do condensador é transformar o UF₆ gasoso em líquido no topo da coluna.

Desta maneira, é feito um fluxo de UF₆ ao longo da torre, fluxo este que faz com que as impurezas mais leves se concentrem na parte de cima da torre e as mais densas, na de baixo. De acordo com a especificação necessária para a produção do UF₆, é escolhida um ponto da torre para a retirada do UF₆.

5 FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA PARA A USINA DE CONVERSÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

Nesse capítulo são apresentadas as barreiras de proteção, as diferenças entre o reator nuclear e outras plantas do ciclo do combustível nuclear, a identificação dos perigos e dos sistemas críticos da Unidade de Conversão de Hexafluoreto de Urânio da INB (USICON) e sobre a atuação do sistema de funções críticas de segurança (FCS) para a instalação.

5.1 SOBRE AS BARREIRAS DE PROTEÇÃO

O princípio da defesa em profundidade (INSAG-10,1996) consiste em desenvolver múltiplas camadas de proteção, com o objetivo de manter a efetividade das barreiras físicas situadas entre o material perigoso e os trabalhadores, o público ou o meio ambiente em operação normal, antecipação de ocorrências operacionais e em condições de acidentes.

Para seguir o princípio da defesa em profundidade, são definidas as barreiras de proteção (FRUTUOSO e Melo *et al*, 2011) que são um impedimento, um obstáculo ou uma obstrução física que possibilita prevenir um evento ou diminuir as consequências se esse acontecer. As barreiras servem para diminuir liberações de material e energia e para limitar ou atenuar as consequências de um evento.

As barreiras físicas de proteção utilizadas nesse trabalho foram estabelecidas baseadas em U.S.NRC. (1984). A Figura 5.1 apresenta um diagrama das barreiras de proteção para uma unidade de conversão de hexafluoreto de urânio.

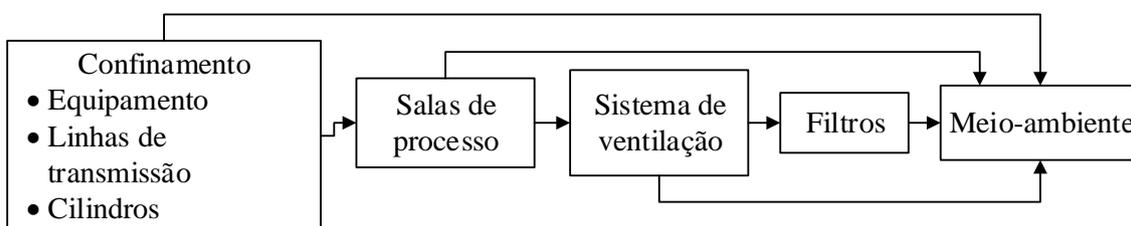


Figura 5.1 – Barreiras de proteção

A primeira barreira, chamada de confinamento, consiste nos cilindros de armazenamento, equipamentos e linhas de transmissão que contêm material perigoso. Na maioria das vezes, o confinamento está dentro das salas de processo, porém, em

alguns casos, como trechos de linhas de transmissão que vão de um prédio para outro, há a possibilidade de a perda de efetividade da barreira levar a uma liberação direta para o meio ambiente.

A segunda barreira são as salas de processo, que são isoladas umas das outras para não permitir que um evento em um determinado local da planta afete outro. Em sua maioria, as salas são protegidas pelo sistema de ventilação; entretanto, é possível que material seja liberado diretamente para o meio ambiente em caso de falha no sistema de ventilação ou em acessos que tenham contato direto com o meio ambiente, como entrada de insumos da planta.

A terceira barreira é o sistema de ventilação que, através do controle do fluxo de ar entre as salas de processo, estabelece diferenças de pressões entre elas e evita a transferência de material de um ponto a outro da planta, e também possibilita o confinamento de material em casos de liberação dentro de uma sala de processo.

As barreiras não podem ser absolutamente estanques em todas as circunstâncias, seja por impossibilidades técnicas ou porque certas operações envolvem pausa temporária de contenção, quando, por exemplo, os produtos estão sendo introduzidos ou retirados dos equipamentos. Nesses casos, o sistema de ventilação se torna uma barreira imprescindível para a instalação.

A quarta barreira são os filtros presentes nos sistemas de ventilação que têm como objetivo conter o material perigoso e não permitir que seja liberado diretamente para o meio ambiente.

5.2 DIFERENÇAS ENTRE O REATOR E OUTRAS ETAPAS DO CICLO DO COMBUSTÍVEL

A manutenção da segurança em instalações do CCN tem características diferentes das do reator de potência. Essas diferenças são explicitadas nos documentos de agências internacionais (IAEA, 2008) (IAEA, 2001) (OECD, 2005). Nesta seção serão comentados os aspectos mais relevantes.

Em plantas do ciclo combustível, o material físsil e seus rejeitos são manuseados, estocados, tratados, transportados em diferentes unidades, além disso o material é processado em diferentes formas (sólido, líquido e gás) e em diferentes

equipamentos dentro da mesma planta, diferentemente do reator, onde o maior volume de material está em estado sólido e confinado no núcleo do reator e nas piscinas de armazenamento de combustível.

Essa característica exige um tratamento diferente na análise das barreiras de proteção para os perigos de uma usina do ciclo combustível, pois o material radioativo é facilmente dispersado, o fluxo desse material que entra e sai das instalações do ciclo é maior e existem menos barreiras para o meio ambiente.

Além disso, é importante citar outras características. Os processos no CCN exigem a utilização de uma grande quantidade de produtos químicos que podem ser inflamáveis, tóxicos ou corrosivos e esses materiais podem causar danos a trabalhadores, público e meio ambiente, portanto é necessário identificá-los e tomar medidas para diminuir o risco associado a eles.

O risco ocupacional necessita de um cuidado especial em plantas do ciclo combustível devido à proximidade do operador com o material que será processado.

Também são mais frequentes no CCN as mudanças de operações, equipamentos e processos, por motivos de desenvolvimento de produto, pesquisas ou atendimento a metas de produção.

Uma característica importante para um conjunto de FCS é o processo de desligamento (interrupção do processo). Em um reator nuclear, quando se interrompe a reação em cadeia desligando o reator, devido ao calor de decaimento, as ameaças às barreiras de proteção são tão intensas quanto no momento que a usina está em operação normal. Já em instalações do CCN, a interrupção do processo é mais simples, se comparada ao reator.

Entretanto, o sistema de ventilação tem grande importância, tanto na operação normal quanto na mitigação de acidentes, pois os materiais em processamento muitas vezes estão em contato direto com esse sistema.

Outro aspecto importante é o fato das instalações do CCN possuírem um inventário considerável de solventes orgânicos e materiais inflamáveis, fazendo elevar o grau de importância de prevenção e mitigação de incêndios, similar o das plantas

químicas. A probabilidade de liberação de energia química (incêndio, explosão) é alta em plantas do ciclo do combustível.

O incêndio é importante em dois aspectos, primeiro como causa iniciadora de sequência de eventos que podem gerar um acidente e segundo, como desregulador dos sistemas de segurança da planta. Um exemplo de incêndio e explosão pode ser encontrado no acidente em Tokaimura, em março de 1997 (IAEA, 2008), que resultou na contaminação radioativa de 37 trabalhadores da planta, entretanto, não houve fatalidades.

5.3 IDENTIFICAÇÃO DOS PERIGOS NA PLANTA

Segundo a IAEA (2010), a planta de conversão possui 3 funções de segurança: prevenção de criticalidade; prevenção contra dose interna e liberação de compostos químicos danosos; prevenção contra dose externa.

A prevenção de criticalidade é necessária apenas em plantas que processam urânio com mais de 1% de enriquecimento. A prevenção contra dose externa é uma preocupação em plantas que utilizam urânio reprocessado. Para a planta estudada os perigos relevantes são relacionados com dose interna e liberação de materiais químicos.

5.3.1 Compostos químicos presentes na planta

5.3.1.1 Ácido fluorídrico (HF)

O ácido fluorídrico é altamente corrosivo, produz sérias queimaduras em tecidos vivos, e o íon de flúor rapidamente causa danos em tecidos mais profundos da pele e reage com os ossos. Diferentemente de outros ácidos, sua neutralização leva dias.

O HF é altamente corrosivo e exposições moderadas no ar podem causar queimaduras na pele, irritações do aparelho respiratório e da membrana conjuntiva.

Exposições agudas podem causar a destruição dos brônquios e inchaço pulmonar, o que pode ser fatal.

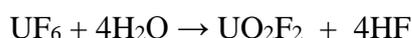
5.3.1.2 Hexafluoreto de urânio (UF₆)

À temperatura ambiente, o UF₆ apresenta-se como um sólido branco. Como este é o único composto do urânio passível de ser mantido na fase gasosa através do controle

da temperatura e da pressão, é adequado o seu uso em plantas de enriquecimento isotópico. À pressão atmosférica ($1,01 \times 10^5$ Pa), sublima à temperatura de $56,4^\circ\text{C}$.

Embora o UF_6 seja um composto estável, sua manipulação é complexa, pois é altamente reativo com a água, éter e álcool, formando produtos estáveis. A reação do UF_6 com a água é altamente exotérmica, produzindo fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF).

A reação é:



HF apresenta apenas toxicidade química, enquanto o UO_2F_2 possui toxicidade química e radiológica (emissor alfa-gama).

5.3.1.3 Flúor (F_2)

O gás flúor é altamente tóxico e extremamente reativo. É o elemento de maior poder de oxidação. Reage com óleos, gorduras e compostos oxigenados, inclusive ao simples contato com a pele humana. O flúor também é capaz de fragilizar ou solubilizar ligas metálicas devido ao forte calor de reação com elementos químicos presentes na maior parte das ligas metálicas.

5.3.1.4 Hidrogênio (H_2)

O hidrogênio é um gás inflamável, não tóxico, incolor e insípido. O H_2 é inflamável quando em concentração volumétrica entre 4% e 94%, o vazamento no ar externo pode espontaneamente entrar em combustão, isto é, temperatura de auto ignição 400°C). (CROW & LOUVAR, 2011)

5.3.1.5 Óxidos de urânio

Na USICON são processados 2 tipos de óxidos de urânio: UO_3 e UO_2 .

5.3.1.6 Tetrafluoreto de urânio (UF_4)

O tetrafluoreto de urânio é um sal de coloração verde altamente solúvel em água. Na planta de conversão é produzido no processo de hidrofluoração. A reação do UF_4 com água produz o HF.

5.3.2 Eventos postulados para a unidade

5.3.2.1 Vazamento de HF

O evento postulado envolve o vazamento de HF líquido ou gasoso.

Locais: Prédio de abastecimento de HF, Prédio de produção de F₂ (Preparo de eletrólito), Prédio de produção e UF₆ (Seção de hidrofluoração).

Causas: Falhas em linhas de HF, falha no forno rotativo, Falha na preparação de eletrólito para as células de produção de flúor, falha no abastecimento de HF, rompimento de isotanque de HF.

Vazamento de HF nos cenários analisados podem ser detectados por um ou mais dispositivos do sistema de instrumentação e controle (temperatura, pressão e/ou vazão) na linha de HF gasoso para o forno rotativo, ou pelo detector de HF instalado na sala. Além disso, o odor característico serve para a identificação de vazamento.

Consequências: Formação de nuvem tóxica, possibilidade de morte de trabalhador e indivíduo público.

5.3.2.2 Vazamento de H₂

O evento postulado envolve o vazamento de hidrogênio gasoso.

Locais: Armazenamento de produtos químicos e Prédio de Produção de UF₆ (Seção de Redução)

Causas: Falhas no forno rotativo, falha em linha de transmissão e falha em cilindro de armazenamento.

Consequências: Incêndio e explosão em caso de ignição, risco ocupacional.

5.3.2.3 Vazamento de F₂

O evento postulado envolve o vazamento de F₂.

Local: Produção de flúor e produção de UF₆

Causas: Falha em linhas de transmissão de F₂, falha no reator de chamas ou pratos.

Consequências: Formação de nuvem explosiva e tóxica, possibilidade de morte de trabalhador.

5.3.2.4 Liberação de UO_3

O evento postulado envolve o vazamento de UO_3 .

Locais: Produção de UF_6 (Seção de Redução) e Abastecimento de UO_3

Causas: Falha no forno de redução e falhas em linhas de transmissão de UO_3

Consequências: Impacto radiológico local com risco ocupacional.

5.3.2.5 Vazamento de UF_4

O evento postulado envolve o vazamento de UF_4 .

Locais: Prédio de produção de UF_6 (Seção de fluoração e hidrofluoração)

Causas: Falhas no reator de chamas, falha no reator de pratos, falha no forno de hidrofluoração e falha no transporte de UF_4 .

Consequências: Impacto radiológico local com risco ocupacional.

5.3.2.6 Liberação de UF_6

O evento postulado pode ocorrer em vários cenários, envolvendo a ruptura de cilindro, vasos, tubulações válvulas ou conexões.

O evento pode ser identificado pela pressão baixa na linha de entrada de UF_6 , pela névoa formada e odor característico do HF.

Nesse cenário a detecção de HF é alarmada na sala de controle, com isolamento automático da área de vazamento, através do fechamento dos *dampers* e desligamento dos ventiladores principais de insuflamento e exaustão. O subsistema de exaustão, ligado à coluna de lavagem e aos filtros grosso, fino e absoluto, atende permanentemente a estas áreas. Tal subsistema permanece em operação, amenizando a liberação de UF_6 e HF.

Locais: Produção de UF_6 (Seção de cristalização, Vaso buffer e destilação)

Causas: Falha em linhas de UF₆, ruptura em cilindro ou vasos, falha em cristalizador.

Consequências: Formação de nuvem tóxica de HF, possibilidade de morte de trabalhador. Formação de aerossóis de fluoreto de uranila (UO₂F₂) com impacto radiológico local com risco ocupacional.

5.3.2.7 Mistura explosiva de F₂ e H₂ na célula eletrolítica.

O evento postulado envolve a formação da mistura explosiva de F₂ e H₂ nas células eletrolíticas.

Locais: Produção de Flúor (Seção das células eletrolíticas)

Esta reação pode ocorrer na célula eletrolítica de produção de F₂. A célula produz F₂ e H₂ em compartimentos separados. O nível normal de banho de eletrólito não permite o contato entre esses dois gases.

Causas: As falhas na adição intermitente de HF podem ocorrer devido à obstrução do orifício de alimentação, falha na instrumentação e falha na válvula ON/OFF.

Consequências: Explosão na célula eletrolítica, liberação de F₂ e H₂. Risco ocupacional.

5.3.2.8 Mistura explosiva de O₂ e H₂.

O evento postulado envolve a formação de mistura explosiva de O₂ e H₂ dentro do forno rotativo.

Local: Prédio de produção de flúor (Seção de redução).

Causas: Falha no processo de purga com N₂, perda de estanqueidade do forno, falha na absorção de gases do forno, falhas no sensor de oxigênio do forno rotativo.

Consequências: Explosão no forno rotativo, possibilidade de liberação de UO₃ e UF₄, impacto radiológico local com risco ocupacional.

5.3.2.9 Mistura explosiva de óleo de silicone e ar

O evento postulado envolve a formação de mistura explosiva nos cilindros de óleo de silicone do sistema de aquecimento resfriamento dos cristalizadores. A detecção do evento é feita através do alarme de nível baixo no vaso de silicone.

Local: Prédio de produção de UF₆ (Sessão de cristalização)

Causas: Incêndio é provocado pela mistura explosiva de óleo de silicone e ar.
Perda de estanqueidade do cilindro

Consequências: Incêndio na área de cristalização.

5.4 IDENTIFICAÇÃO DOS SISTEMAS CRÍTICOS

Foram analisados os acidentes postulados para a instalação (CNEN, 1983) e identificados os perigos que apresentam um maior risco, avaliado pela análise preliminar de perigos (PHA – *Preliminary Hazard Analysis*) (U.S.DOD, 1993) (IEC, 2009) para o projeto da instalação. Encontrada a localização dos perigos e acidentes nos processos da unidade foram identificados os sistemas críticos.

5.4.1 Fornos rotativos

Os fornos rotativos são utilizados em duas etapas da USICON, na redução e na hidrofluoração.

5.4.1.1 Forno de Redução

Os perigos associados ao forno de redução são a formação de mistura explosiva entre H₂ e O₂ o vazamento de H₂.

5.4.1.2 Forno de Hidrofluoração

Os perigos associados ao forno de hidrofluoração são a formação de mistura explosiva entre H₂ e O₂, que é possível porque o HF na presença de metais pode formar H₂ e o outro perigo é vazamento de HF.

5.4.2 Reator de chamas e reator de pratos

Os perigos associados ao reator de chamas e o reator de pratos são o vazamento de F₂ e a explosão por exposição do flúor a alta temperatura por tempo prolongado.

5.4.3 Cristalizadores

Os perigos associados aos cristalizadores são o vazamento de UF_6 devido ao sobreenchimento do cristalizador e posterior ruptura durante a fase de aquecimento e a formação de mistura explosiva entre ar e óleo de silicone no sistema de aquecimento e resfriamento do cristalizador.

5.4.4 Células eletrolíticas

O perigo associado às células eletrolíticas de produção de flúor é a formação de mistura explosiva entre F_2 e H_2 no interior das células.

5.4.5 Linhas de HF, H_2 , F_2 e UF_6

O perigo associado às linhas de transmissão é o vazamento dos compostos que fluem por elas.

No caso do F_2 e do HF deve ser respeitado o limite de velocidade do componente na linha. O F_2 pode fluir até uma velocidade máxima de 10 m/s, pois acima dessa velocidade acontece o processo de corrosão da linha e no HF esse processo acontece em velocidade maior que 0,5 m/s.

5.4.6 Abastecimento de HF

O perigo associado ao abastecimento de HF é o vazamento do ácido. Este é o local onde pode vazar a maior quantidade de HF na planta e onde ocorre a maior probabilidade de vazamento devido à operação de acoplamento que é feita para retirar o HF do isotanque e bombeá-lo para o interior da fábrica.

5.4.7 Sistema de ventilação

Os perigos associados ao sistema de ventilação são os vazamentos ou liberações dos processos serem encaminhados para o meio ambiente.

5.4.8 Destilação

O perigo associado ao processo de destilação é o vazamento de UF_6 .

5.6 ATUAÇÃO DO SISTEMA DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA

Nas usinas nucleares, o sistema de monitoração de FCS tem um papel importante nas paradas de emergência, onde é necessário desligar o reator e remover o calor de decaimento do núcleo.

A gestão por função crítica de segurança permite uma avaliação do estado de segurança da planta através de monitoração das variáveis de estado que a caracterizam, a análise em tempo real quanto às suas tendências e projeção num painel (*feedback* ao operador) que mostre o grau de ameaça à cada FCS. Nesses casos, o sistema de FCS é acionado para auxiliar o operador a levar a planta a uma parada segura.

Em um reator nuclear as FCS tem importante papel em manter as condições seguras da unidade após a interrupção do processo. Em uma usina de conversão de hexafluoreto de urânio, em virtude da simplicidade dessa operação em comparação com o reator, a atuação das FCS é mais importante na monitoração antes da interrupção do processo.

A Figura 5.2 é uma representação da atuação do sistema de FCS (salientada por meio da flecha maior) na planta de conversão de hexafluoreto, e a Figura 5.3 uma representação da atuação do sistema de FCS para o reator.

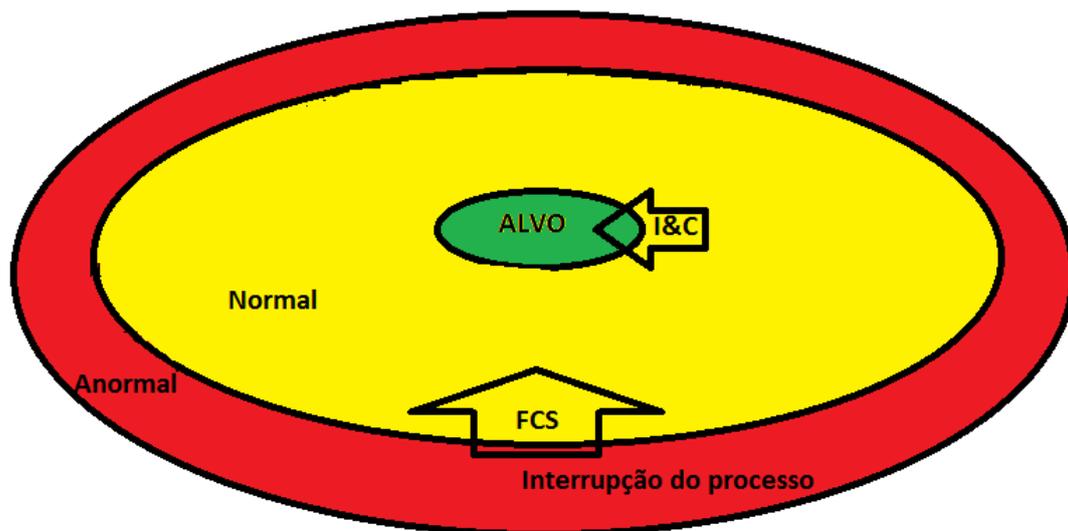


Figura 5.2 – Atuação do sistema de FCS na conversão

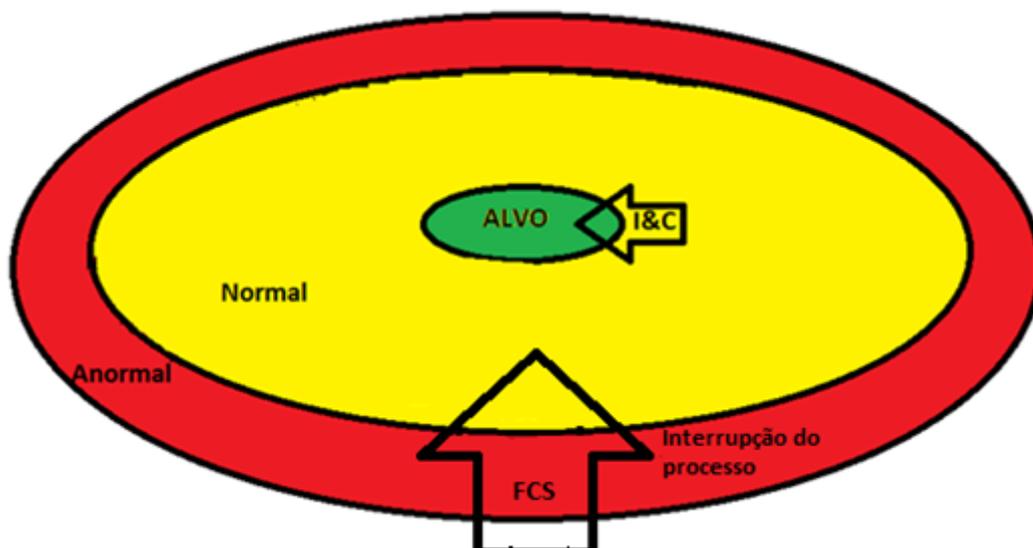


Figura 5.3 – Atuação do sistema de FCS reator

Tomemos como exemplo, para ilustrar a atuação do sistema de FCS, para unidade de hexafluoreto de urânio, o processo de redução química (descrito em 4.4.3) realizado em forno rotativo representado na Figura 4.3.

A temperatura e a pressão são as variáveis críticas desse processo e elas devem ser monitoradas pelo sistema de FCS.

A pressão é controlada através da regulação das vazões de entrada de H_2 e N_2 no forno.

Em operação normal, a pressão no forno pode variar próximo ao valor de set point, sendo impostos os limites de controle do tipo *High* e *Low* [alto e baixo, respectivamente], para alarme de condição anormal da pressão. Nestes limites, o operador deve tomar medidas para reestabelecer um valor aceitável desta variável e verificar o que pode ter causado a anormalidade de operação. Se a pressão chegar aos limites extremos nos níveis *High High* [muito alto] ou *Low Low* [muito baixo], o processo deve ser interrompido [de forma automática ou manual] e uma investigação de causa raiz deve ser realizada para determinar as causas da extrema instabilidade do processo. Uma representação dos níveis de controle para a variável pressão do forno é apresentada na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Representação dos níveis de controle

Em certos casos, os sistemas de controle permitem que a variável suba um pouco acima dos limites por um tempo determinado. Caso este tempo seja ultrapassado então fica confirmado que não se trata de um ligeiro desvio e sim de uma anormalidade, sendo então tomadas todas as medidas instruídas no diagrama lógico para o processo em controle.

A seguir um exemplo de como as funções críticas podem atuar para auxiliar na operação.

A pressão aumenta e se estabiliza em um patamar acima do valor *High*. Após um tempo pré-estabelecido é indicado para o operador o grau de ameaça à função crítica de segurança e indicada a ação para reestabelecer a segurança da planta. Com a intervenção do operador, a variável volta ao valor estabelecido para a operação.

A Figura 5.5 mostra uma representação gráfica da pressão atingindo um nível próximo da interrupção do processo, e em seguida, após a indicação do sistema de FCS e a ação do operador, o reestabelecimento da variável em níveis melhores de operação.

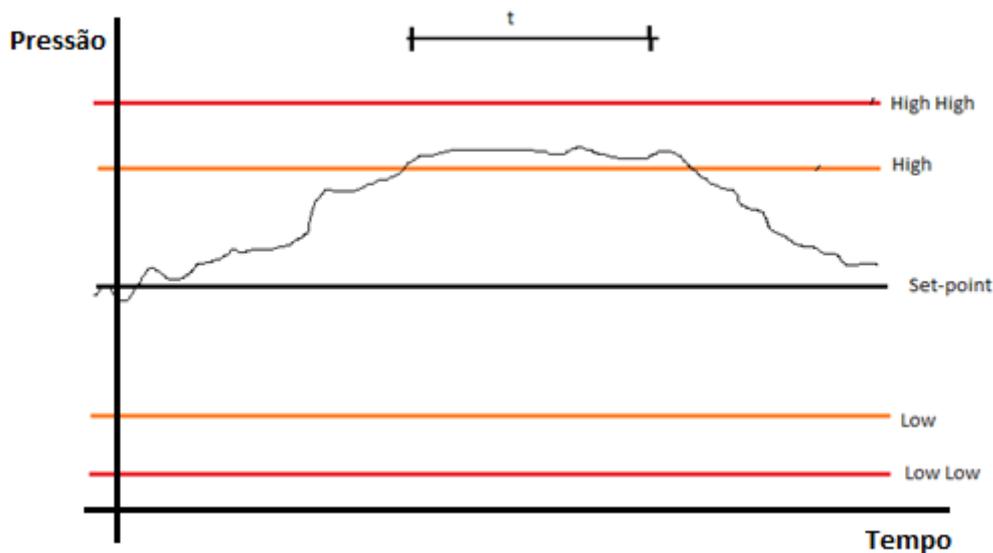


Figura 5.5 - Gráfico representativo da pressão em forno rotativo

No caso de o operador não conseguir reestabelecer valores aceitáveis para a variável em questão, o sistema de proteção deve atuar interrompendo o processo.

Outra variável crítica para o forno rotativo é a temperatura, que tem um valor máximo de operação e, se esse valor for ultrapassado por um determinado tempo, deverão se iniciar os procedimentos para o resfriamento do forno.

Temperaturas elevadas podem fazer com que o urânio e outros materiais mudem seu estado de agregação e/ou granulometria, ocasionando o entupimento das velas do forno. Tal entupimento elevará a pressão, podendo levar o sistema à indesejável perda de estanqueidade.

Um desvio pequeno poderia ser tolerado pelo controle de processo, como na Figura 5.6, porém com o uso de FCS haveria registro deste estado, alertando o operador da condição de insegurança em formação. Em caso de repetição destes transientes, uma mensagem de ajuste/falha do controle de temperatura e verificação das velas do forno poderia ser enviada ao operador, como ação antecipatória, pelo sistema FCS.

A Figura 5.6 mostra uma representação gráfica da temperatura atingindo um nível próximo da interrupção do processo e, em seguida, após a indicação do sistema de FCS e a ação do operador, o reestabelecimento da variável em níveis mais aceitáveis de operação.

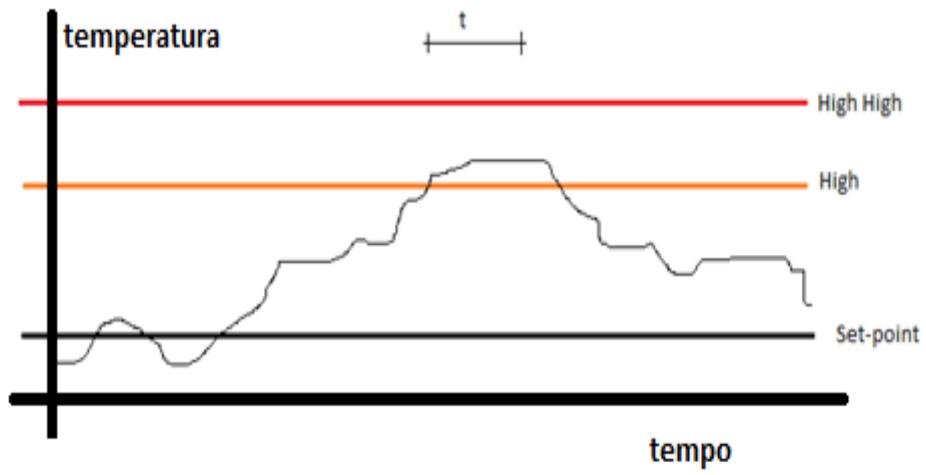


Figura 5.6 – Gráfico representativo da temperatura em forno rotativo

6 – PROPOSTA DE UM CONJUNTO DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA

Nesse capítulo é apresentada uma proposta de um conjunto para monitoração por funções críticas de segurança para o projeto da Unidade de Hexafluoreto de Urânio da INB (USICON).

6.1 - INTRODUÇÃO

Para liberação de substâncias perigosas presentes na planta de conversão, essas substâncias necessitam passar pelas barreiras de proteção cuja integridade é monitorada através das funções críticas de segurança. Dessa maneira, se as FCS estão satisfeitas, diminui-se a probabilidade de ocorrência de acidentes.

As FCS foram desenvolvidas identificando os perigos e os sistemas críticos quanto à segurança da planta, foram definidas as barreiras de proteção para a unidade e identificadas as variáveis de controle que ameaçam as barreiras de segurança e também a identificação de procedimentos operacionais para a manutenção das barreiras e mitigação de acidentes com o objetivo de elaborar árvores de estados para as FCS.

6.2 - CONJUNTO DE FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA

O conjunto de FCS foi proposto com o objetivo de estabelecer um número mínimo de funções que, se preservadas, não permitem a liberação de materiais que possam causar dano aos trabalhadores público ou meio ambiente. Cada FCS monitora a integridade de uma ou mais barreiras de proteção

Este trabalho propôs um conjunto de 8 funções críticas de segurança para a unidade de conversão de hexafluoreto que são apresentadas em ordem de prioridade:

- 1 – Estanqueidade durante o abastecimento de HF;
- 2 – Disponibilidade do sistema de ventilação;
- 3 – Estanqueidade dos cristalizadores ;
- 4 – Estanqueidade das células de flúor;
- 5 – Estanqueidade do reator de chamas / pratos;

- 6 – Estanqueidade dos fornos rotativos;
- 7 – Estanqueidade da coluna de destilação;
- 8 – Estanqueidade das linhas de abastecimento de insumos.

A proposição das FCS foi feita através da identificação dos perigos e dos sistemas críticos da unidade que ameaçam as barreiras de proteção. Foram identificados oito processos na unidade onde a perda do controle pode levar a perda da integridade das barreiras de proteção. Para cada sistema crítico foi criada uma FCS que está relacionada com a garantia da integridade de uma ou mais barreiras de proteção, um esquema da relação entre as barreiras e as FCS propostas é apresentada na Figura 6.1.

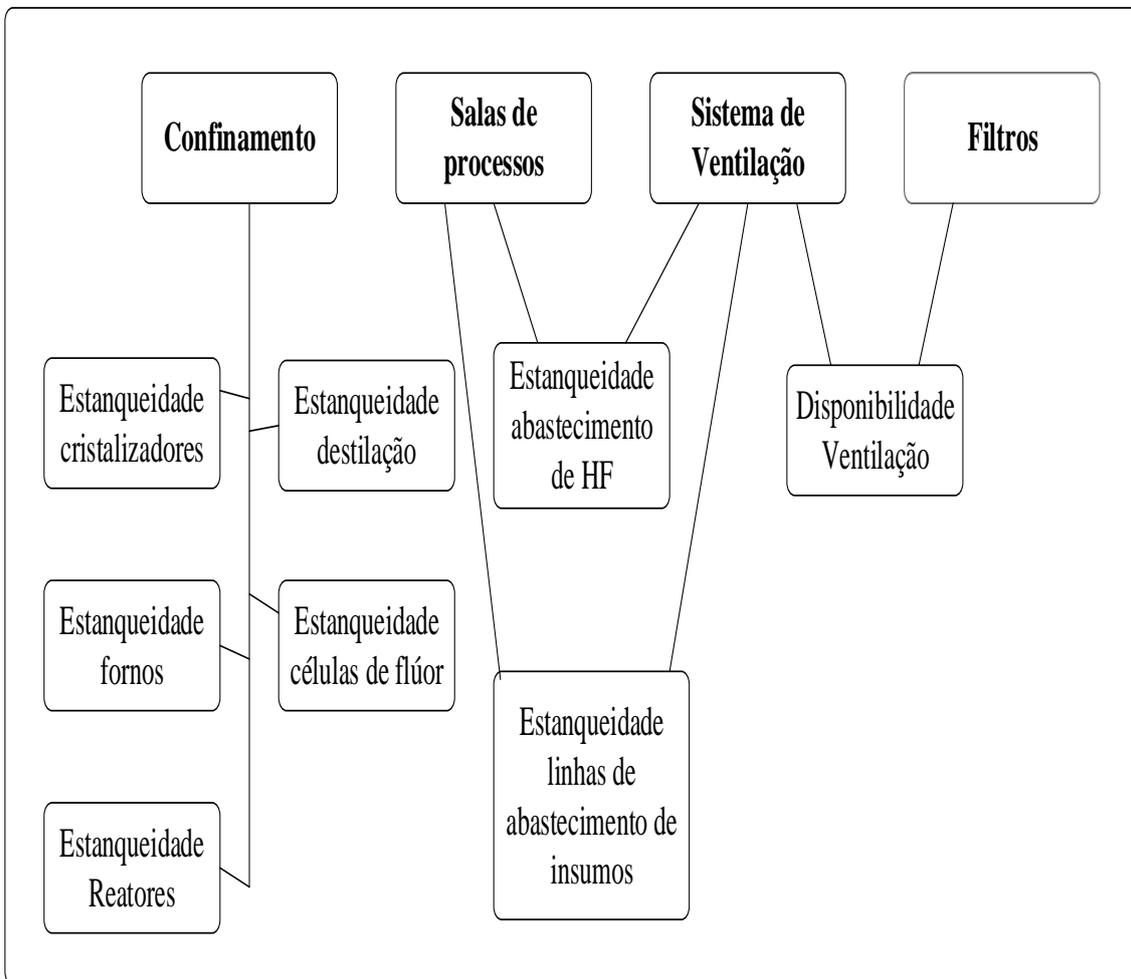


Figura 6.1- Relação das barreiras de proteção com as FCS

Uma vez identificadas as FCS, foram desenvolvidas as árvores de estado identificando as variáveis que ameaçam as FCS e os procedimentos que possam satisfazê-las. Nesta seção são apresentadas as árvores de estado para de cada FCS, a

apresentação é feita com uma explicação inicial sobre a árvore da FCS e em seguida, uma descrição de cada estado da árvore, iniciando do estado mais crítico para o menos crítico de cada FCS.

Foram adotados 4 estados para as FCS, semelhante a proposta para o reator nuclear, os quais caracterizam os graus de ameaça extrema, severa, condição anormal e normal.

Nem todas as FCS criadas possuem todos os estados, na descrição de cada FCS são apresentados os estados correspondentes. Para cada estado deve ser indicado o procedimento para o operador executar com o objetivo de estabelecer a FCS.

Uma vez que o projeto está em fase de desenvolvimento e nem todos os procedimentos operacionais foram estabelecidos, não foi possível levantá-los completamente e, desta maneira, alguns procedimentos nas árvores de estados das FCS são apresentados apenas de forma representativa.

6.2.1 Estanqueidade durante o abastecimento de HF

A unidade possui um prédio para o abastecimento de HF essa FCS tem como objetivo proteger as barreiras salas de processo e sistema de ventilação durante o abastecimento de HF. A árvore de estado para o abastecimento de HF foi desenvolvida para evitar a liberação do ácido durante a transferência de HF do isotanque para processos da unidade de conversão e mitigar as consequências no caso de vazamento. A árvore de estado está baseada no monitoramento de todo o prédio de abastecimento de HF. A Figura 6.2 apresenta a árvore de estado para a FCS estanqueidade durante o abastecimento de HF.

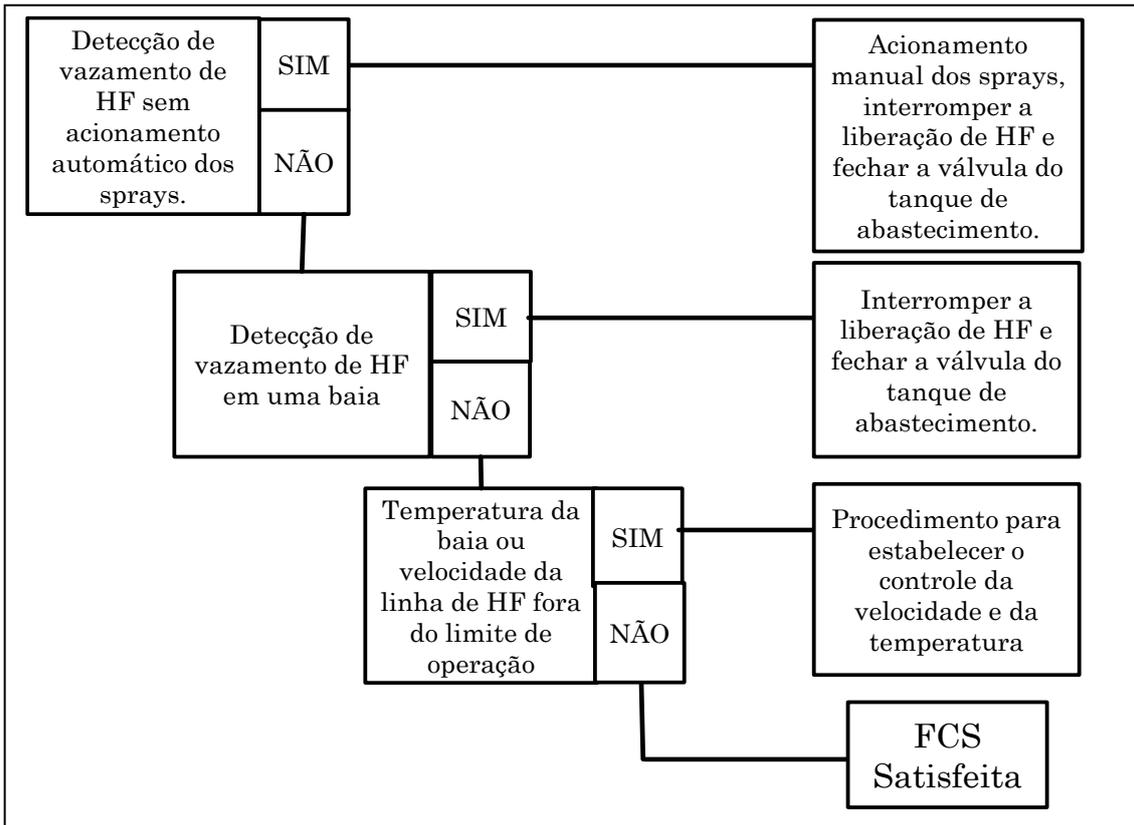


Figura 6.2 – Árvore de estados da FCS estanqueidade durante o abastecimento de HF

A árvore de estados da FCS estanqueidade durante o abastecimento de HF possui 4 estados.

Estado 1 – Ameaça extrema – Detecção de vazamento de HF em uma baia sem acionamento automático dos sprays.

O objetivo é evitar o vazamento de HF. Para isso, são monitorados os sensores de HF e o acionamento dos sprays de abatimento de HF. Esse estado é acionado em caso de detecção de vazamento de HF em uma baia sem acionamento automático dos sprays.

Estado 2 – Ameaça severa – Detecção de vazamento de HF em uma baia.

O objetivo é evitar o vazamento de HF. Esse estado é acionado após a detecção de HF por sensores e o início do processo de abatimento da nuvem de HF pelo spray.

Estado 3 – Condição anormal – Temperatura da baia ou velocidade do HF acima do limite de operação

O primeiro objetivo é evitar a formação de nuvem de HF em caso de vazamento. Para isso, é feito o monitoramento da temperatura das baias de HF e, no caso de temperatura acima do limite de operação, esse estado é acionado.

O segundo objetivo é evitar a corrosão da linha de HF por excesso de velocidade do ácido na linha de transmissão. Para isso, é feito o monitoramento da velocidade de HF nas linhas de abastecimento e, no caso de velocidade acima do limite, esse estado é acionado.

Estado 4 – Condição normal – FCS satisfeita

6.2.2 Disponibilidade da ventilação

A unidade possui um sistema de ventilação dedicada para o prédio de produção de F₂ e de produção de UF₆. A Figura 6.3 apresenta a árvore de estados da FCS disponibilidade da ventilação. Essa FCS tem como objetivo proteger as barreiras de proteção sistema de ventilação e filtros.

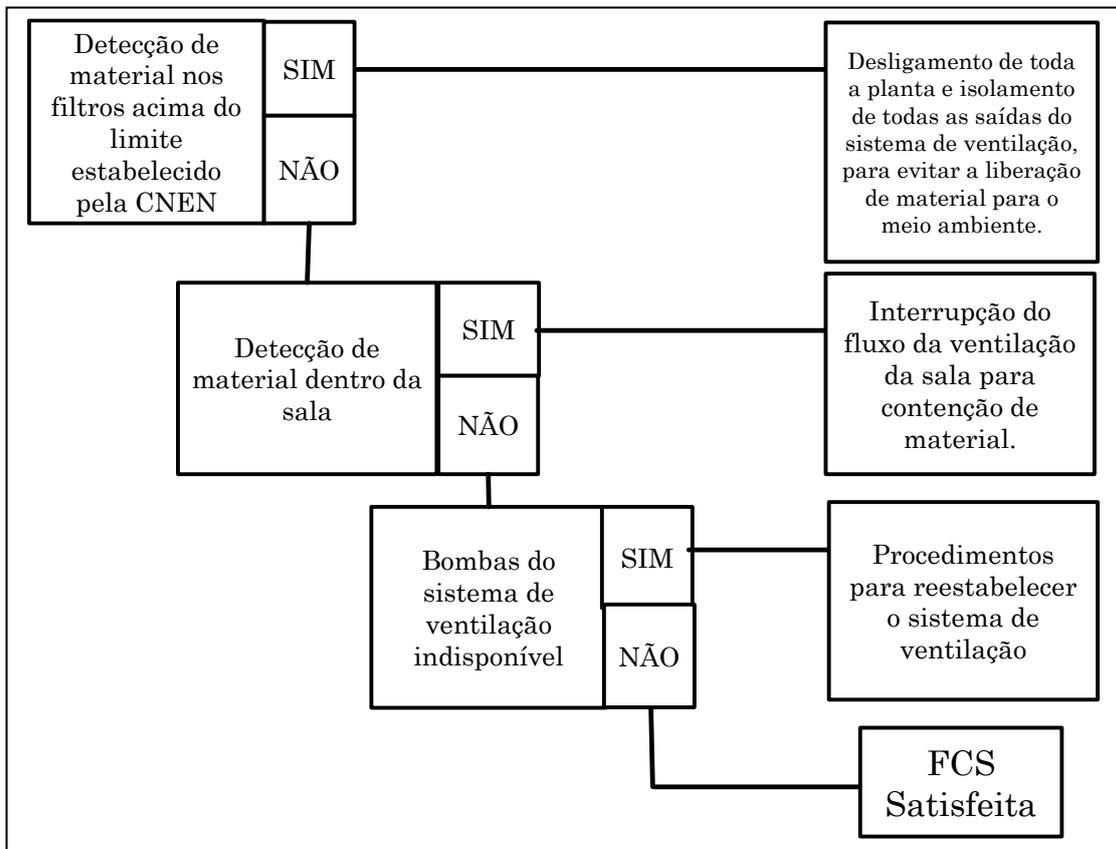


Figura 6.3 – Árvore de estados da FCS disponibilidade da ventilação

A árvore de estados da FCS disponibilidade da ventilação possui 4 estados:

Estado 1 – Ameaça extrema – Detecção de materiais nos filtros da ventilação acima do limite.

O objetivo é evitar a liberação de material para o meio ambiente. Para isso, é feito o monitoramento dos filtros do sistema de ventilação, em caso de detecção o estado é ativado.

Estado 2 – Ameaça severa – Detecção de material em sala de processo

O objetivo é evitar a liberação de material para o meio ambiente. Para isso, é feito o monitoramento dos detectores das salas de processo e, em caso de detecção, o estado é ativado.

Estado 3 – Condição anormal – Bombas do sistema de ventilação indisponível

O objetivo é verificar a efetividade do sistema de ventilação. Para isso, verifica-se se todas as bombas que fazem o ar circular na unidade estão funcionando corretamente, no caso de não estarem, esse estado é ativado.

Estado 4 – Condição normal – FCS satisfeita

6.2.3 Estanqueidade dos cristalizadores

A unidade possui um cristalizador para a fluoração primária acoplado ao reator de chamas e dois outros cristalizadores em série para o reator de pratos. O funcionamento dos cristalizadores é idêntico e é utilizada uma árvore de estado, com a mesma lógica, para cada cristalizador. A Figura 6.4 apresenta a árvore de estado da FCS estanqueidade dos cristalizadores. Essa FCS protege a primeira barreira de proteção confinamento que neste caso é o cristalizador.

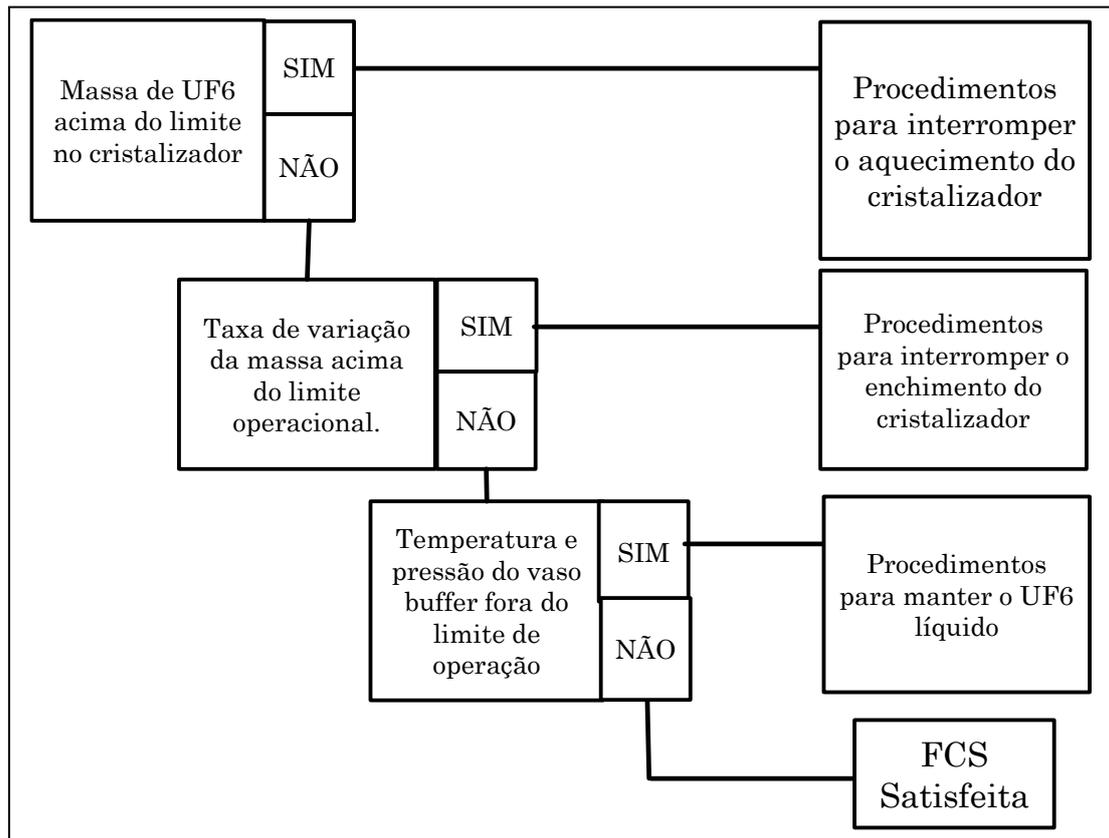


Figura 6.4 - Árvore de estados da FCS estanqueidade dos cristalizadores

A árvore de estados da FCS estanqueidade dos cristalizadores possui 4 estados:

Estado 1 – Ameaça extrema – Estanqueidade dos cristalizadores

O objetivo é evitar a ruptura do cristalizador por sobreenchimento do cilindro de UF₆. Para isso, é feito o monitoramento do valor da massa dos cristalizadores, e caso a massa de UF₆ atinja o limite durante o enchimento ou aquecimento do cristalizador, o processo deve ser interrompido.

Estado 2 – Ameaça severa – Variação da massa acima de limite operacional

O objetivo é fazer a monitorar da variação da massa, pois uma variação com valor superior do possível para o enchimento do cristalizador indica erro na medição do valor da massa.

Estado 3 – Condição anormal – Pressão e temperatura do vaso buffer

Objetivo é monitorar a temperatura e pressão dentro do vaso buffer, em caso dessas variáveis atingirem valores que não permitam para manter o UF6 líquido, procedimentos para resfriamento ou aquecimento devem ser adotados.

Estado 4 – Condição normal – FCS satisfeita

6.2.4 Estanqueidade das células de flúor

A unidade possui um prédio para a produção de F_2 que é utilizado no processo de fluoração. As células de produção de F_2 são idênticas e a mesma lógica é utilizada nas árvores de estado de cada célula. A Figura 6.5 apresenta a árvore de estado para a FCS formação de mistura explosiva em células de flúor. Essa FCS protege a primeira barreira de proteção, confinamento, que neste caso são células de flúor.

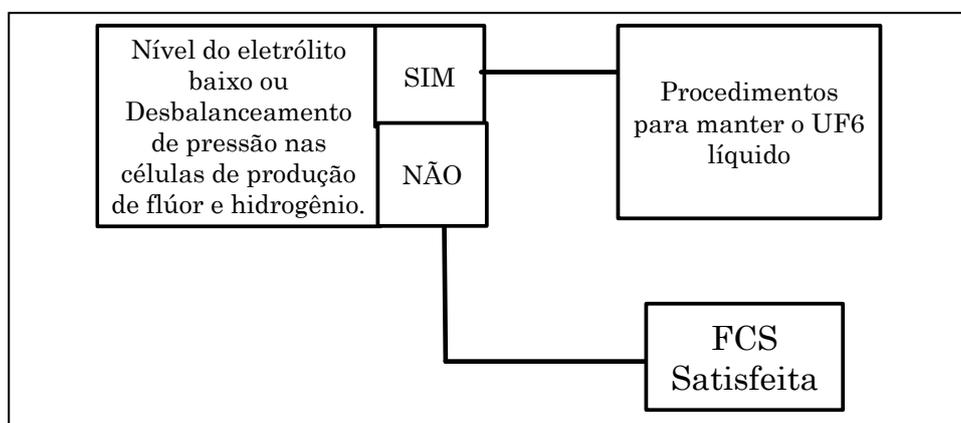


Figura 6.5 – Árvore de estados estanqueidade das células de flúor

A árvore de estados estanqueidade das células de flúor possui 2 estados;

Estado 1 – Ameaça extrema – Desbalanceamento de pressão nas células de produção de flúor ou nível de eletrólito baixo.

O primeiro objetivo é evitar a formação de mistura explosiva entre o F_2 e o H_2 . Para isso, é feito o monitoramento da pressão nas células de produção de flúor e de hidrogênio e, no caso de pressão acima do limite estabelecido, esse estado é acionado.

O segundo objetivo é evitar a mistura explosiva entre o H_2 e o F_2 . Para isso, é monitorado o nível de eletrólito nas células de flúor, em caso do nível diminuir até o limite de operação esse estado é acionado.

Estado 2 – Condição normal – FCS satisfeita

6.2.5 Estanqueidade do reator de chamas/pratos

A unidade possui dois reatores para o processo de fluoração, o reator de chamas, que é o principal, e o reator de pratos que reprocessa os resíduos do primeiro. O funcionamento dos dois reatores é semelhante e a lógica da árvore de estados é a mesma, será utilizada uma árvore para cada reator. A Figura 6.6 apresenta a árvore de estado da FCS reatores de chamas e o de pratos. Essa FCS protege a primeira barreira de proteção, confinamento, que neste caso são os reatores de chamas e o de pratos.

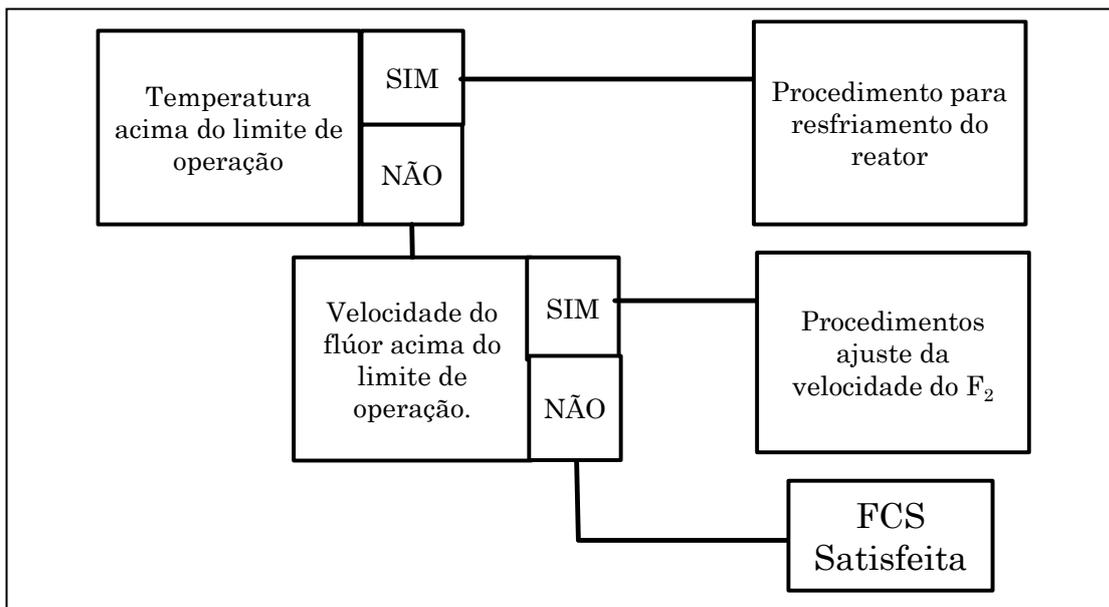


Figura 6.6 – Árvore de estados da FCS estanqueidade dos Reatores de Chamas/Pratos

A árvore de estados da FCS estanqueidade dos reatores de chamas e de pratos possui 3 estados;

Estado 1 – Ameaça Extrema – Temperatura acima do limite de operação

O objetivo é evitar a corrosão do reator pelo F₂ por exposição a temperaturas altas.

A temperatura deve ser controlada para evitar a aceleração do processo de corrosão do reator pelo F₂ e também para evitar a explosão devido à exposição do F₂ ao calor por tempo prolongado.

Em caso de temperatura próxima do limite de interrupção do processo, esse estado é acionado e indicado para o operador o procedimento para resfriar o reator.

Estado 2 – Ameaça extrema – Velocidade do flúor

O objetivo é evitar a corrosão pelo F_2 ocasionada pela alta velocidade de deslocamento. Para isso, é feito o monitoramento da diferença de pressão entre a saída da produção de flúor e a entrada no reator de chamas e, no caso da diferença de pressão atingir o valor limite esse estado, é acionado e indicado o procedimento para ajuste da velocidade do F_2 .

Estado 3 – Condição normal – FCS satisfeita

6.2.6 Estanqueidade dos fornos rotativos

A unidade possui 2 fornos rotativos, um para o processo de redução e outro para o processo de hidrofluoração; o funcionamento dos dois fornos é o mesmo, por isso, a lógica das árvores de estado é a mesma. Será usada uma árvore para cada forno. A Figura 6.7 apresenta a árvore de estado para a estanqueidade dos fornos rotativos. Essa FCS protege a primeira barreira de proteção, confinamento, que neste caso são os fornos rotativos.

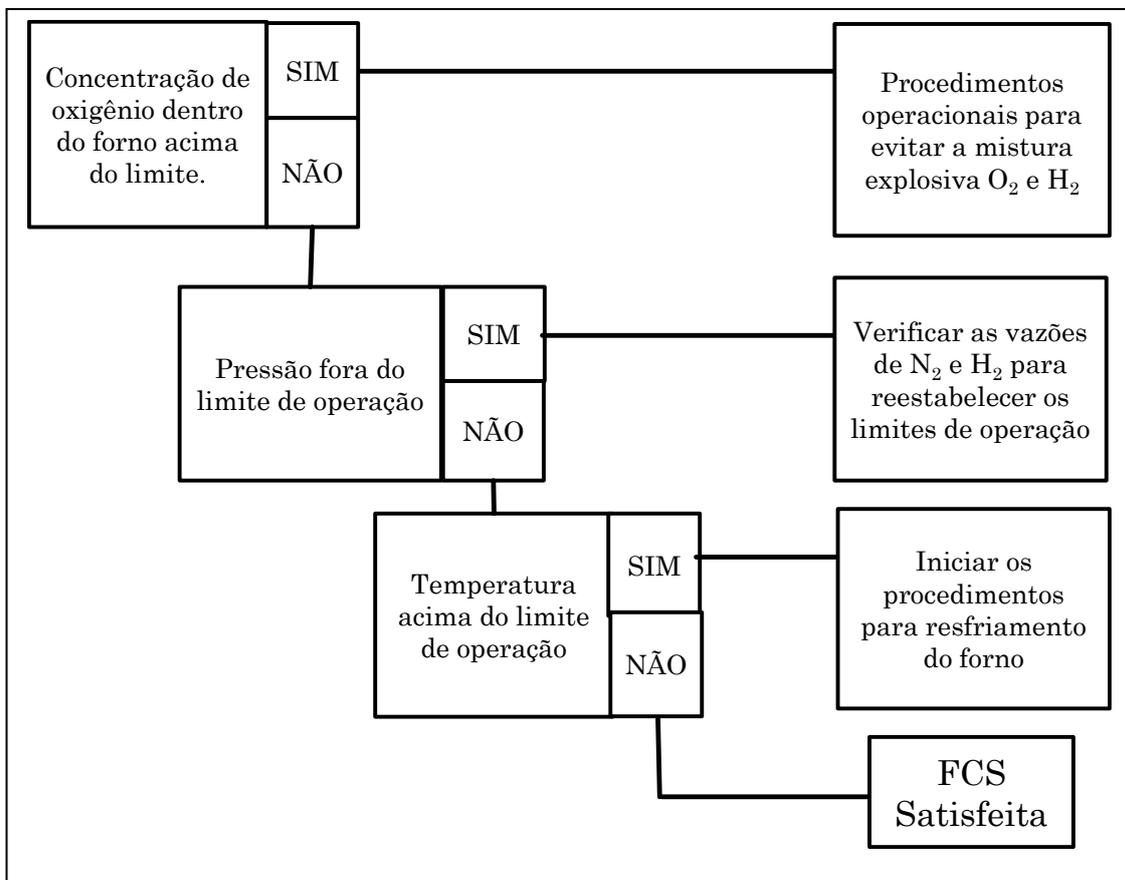


Figura 6.7 – Árvore de estados da FCS estanqueidade dos fornos rotativos

A árvore de estados da FCS estanqueidade dos fornos rotativos possui 4 estados:

Estado 1 – Ameaça extrema – Concentração de oxigênio dentro do forno acima do limite.

O objetivo é evitar a formação de mistura explosiva entre H_2 e O_2 no interior do forno rotativo. Para isso, é feito o monitoramento da concentração de oxigênio dentro do forno e, no caso da concentração se aproximar do limite de intertravamento do forno, este estado é acionado e deve ser indicado para o operador o procedimento adequado a essa situação.

Estado 2 – Ameaça severa – Pressão fora do limite de operação

O primeiro objetivo é evitar a entrada de ar dentro do forno rotativo que possibilita a formação de mistura explosiva. Para isso é feito o monitoramento da pressão interna do forno, pois em caso de perda de estanqueidade, o valor dessa variável abaixo do limite de operação possibilita a entrada de ar, podendo gerar mistura explosiva dentro do forno.

O segundo objetivo é evitar a potencialização de um vazamento de H_2 do forno rotativo para o interior da sala de processo. Para isso, é feito o monitoramento da pressão dentro do forno, pois em caso de perda de estanqueidade, o valor dessa variável acima do limite de operação potencializa a liberação de hidrogênio para o interior da sala.

Estado 3 – Condição anormal – Temperatura acima do limite de operação

O objetivo é evitar temperaturas demasiadamente altas, que propiciam o entupimento dos filtros e, como consequência, o aumento da pressão interna do forno. Para isso, é feito o monitoramento da temperatura interna do forno, e no caso do valor dessa variável atingir limites próximos do intertravamento do processo, o operador é alertado para efetuar o procedimento necessários.

Estado 4 – Condição normal – FCS satisfeita

6.2.7 Estanqueidade da coluna de destilação

A unidade possui uma coluna para destilação de UF_6 . A FCS estanqueidade da coluna de destilação tem como objetivo evitar a liberação de UF_6 . A árvore de estados

para a FCS estanqueidade da coluna de destilação possui 3 estados. A Figura 6.8 apresenta essa árvore. Essa FCS protege a primeira barreira de proteção, confinamento, que neste caso são a coluna de destilação.

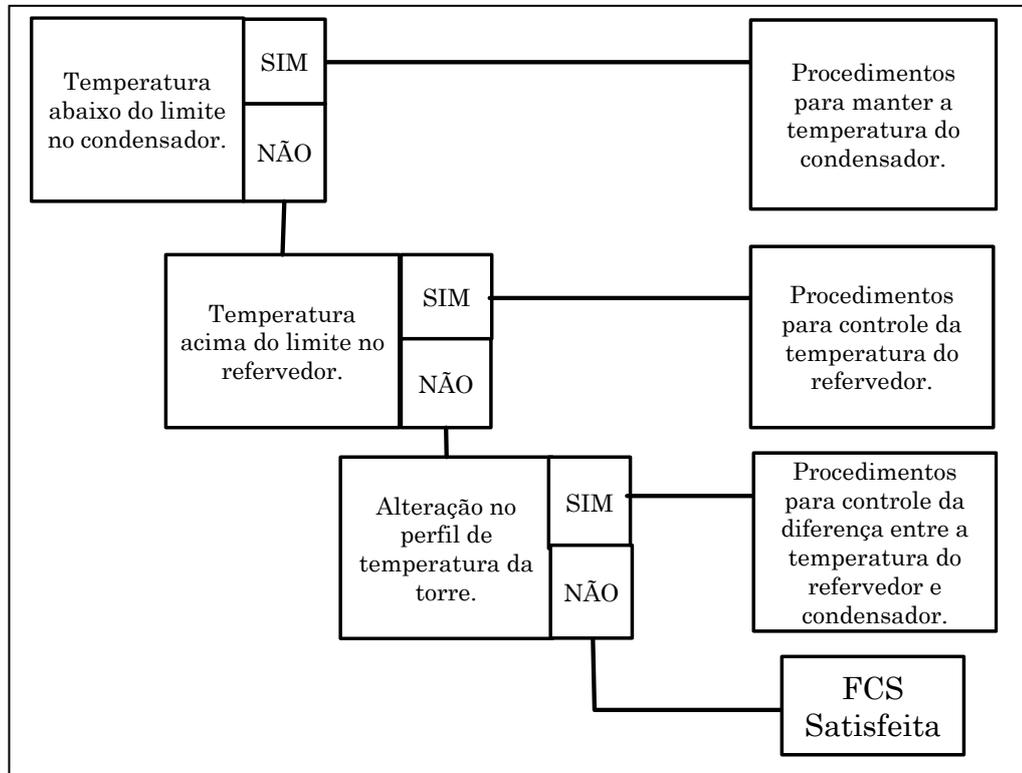


Figura 6.8 – Árvore de estados estanqueidade da coluna de destilação

Estado 1 – Ameaça extrema – Temperatura baixa no condensador

O objetivo é evitar o vazamento de UF₆. Para isso, é monitorada a temperatura do condensador e, no caso do valor dessa variável atingir um limite que permita a solidificação do UF₆ esse estado é acionado.

Estado 2 – Ameaça severa – Temperatura no refeedor

O objetivo é monitorar a temperatura do refeedor e, no caso do valor dessa variável atingir um limite acima do permitido, esse estado é acionado.

Estado 3 – Condição anormal – Alteração do perfil de temperatura na torre

O objetivo é monitorar o perfil de temperatura da torre de destilação e, caso o desvio seja maior que o permitido, esse estado é acionado.

Estado 4 – Condição normal – FCS satisfeita

6.2.8 Estanqueidade das linhas de abastecimento de insumos

As linhas de abastecimento de insumos de HF, H₂, F₂ e UF₆ estão instaladas em toda a unidade de conversão. Será utilizada uma árvore de estados para cada composto químico, utilizando a mesma lógica de estados. A árvore de estados da FCS estanqueidade das linhas de abastecimento de insumos é apresentada na Figura 6.9. Essa FCS protege as barreiras de proteção salas de processo e sistema de ventilação.

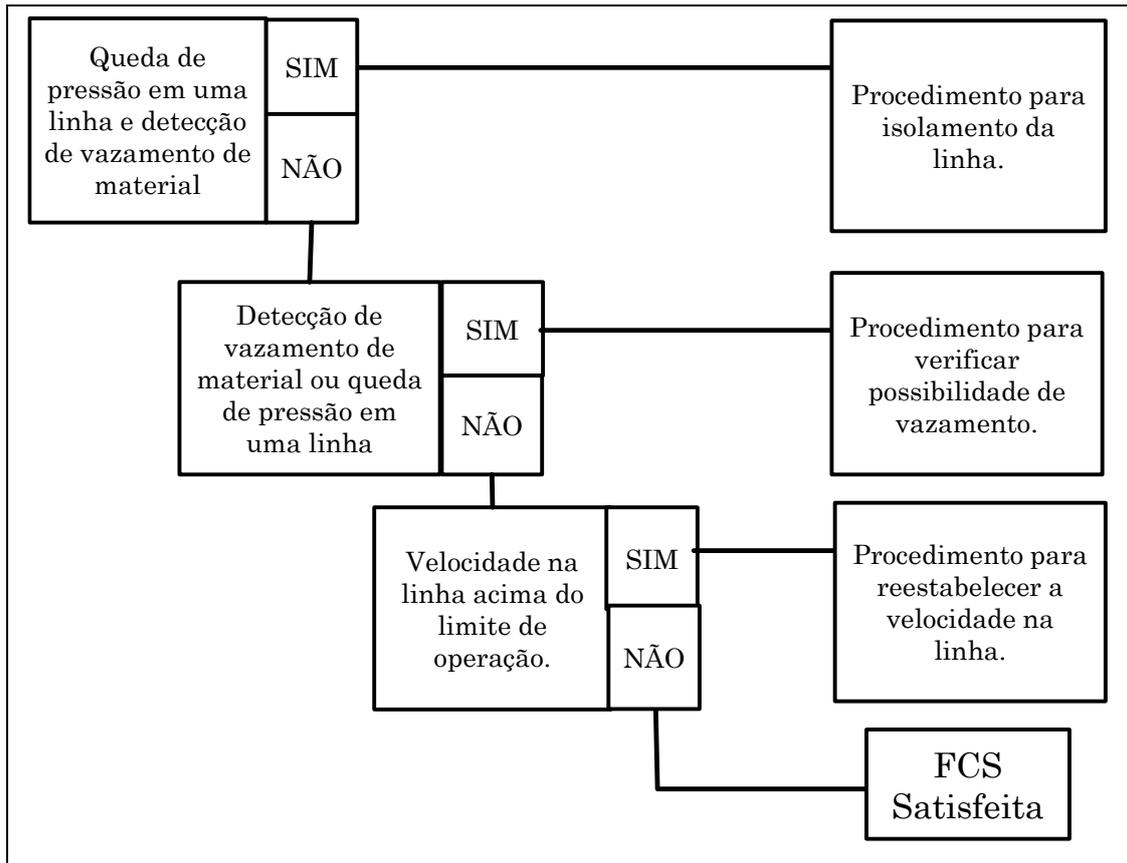


Figura 6.9 – Árvore de estados da FCS estanqueidade das linhas de abastecimento de insumos

A árvore de estados da FCS estanqueidade das linhas de abastecimento de insumos possui 4 estados:

Estado 1 – Ameaça severa – Queda de pressão em uma linha e detecção de vazamento de material.

Um vazamento grande é caracterizado pela detecção de queda de pressão em um trecho da linha somada à indicação de vazamento pelos sensores ao longo da linha.

O objetivo é evitar a continuidade de vazamento de materiais pelas linhas de transmissão. Para isso, é monitorado os sensores que detectam a presença dos elementos perigosos fora da linha de transmissão e também a pressão dentro das mesmas.

Estado 2 – Ameaça extrema – Detecção de vazamento de material ou queda de pressão em linha.

Um vazamento pequeno é caracterizado apenas pela detecção através dos sensores ao longo da linha, ou pela detecção de queda de pressão na linha.

O objetivo é evitar a continuidade de vazamento de materiais pelas linhas de transmissão. Para isso, são monitorados os sensores que detectam a presença dos elementos perigosos fora da linha de transmissão e também a pressão dentro das mesmas.

Estado 3 – Condição anormal – Velocidade na linha

O objetivo é evitar o vazamento de materiais perigosos. Para isso, é monitorada a velocidade do fluido e em caso dessa velocidade violar o limite de operação, esse estado é acionado.

Estado 4 – Condição normal – FCS satisfeita

7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema de funções críticas de segurança se tornou uma ferramenta indispensável para o apoio a operação em usinas nucleares, se tornado uma exigência para licenciamento e operação (U.S.NRC,2002).

Entretanto, esse sistema nunca foi implantado em plantas do ciclo do combustível nuclear. Foi observado através desse trabalho que o principal fato da não utilização de um sistema igual ao utilizado nos reatores está relacionada com a diferença entre a interrupção do processo nos reatores nucleares e as plantas de outras etapas do CCN, como discutido na seção 5.2.

Com a iminência da implantação de uma planta de escala industrial de conversão de hexafluoreto de urânio no Brasil, esta dissertação teve como objetivo aplicar o conceito de FCS e elaborar um conjunto de FCS para a implantação de um sistema de apoio à operação da planta de conversão de hexafluoreto de urânio.

Nessa dissertação foi proposto um conjunto de oito FCS com o objetivo de se estabelecer um sistema que apoie o operador na tomada de decisão, indicando procedimentos que devem ser executados para evitar acidentes. Para alcançar o objetivo, foram identificados os perigos e os sistemas críticos da USICON, foram definidas quatro barreiras de proteção para unidade identificando as variáveis do processo cuja perda do controle constituem ameaça às barreiras, foi feita a identificação de procedimentos que controlam ou mitigam as ameaças e a elaboração de oito árvores de estados que constituem o conjunto de FCS.

O conjunto de FCS é preliminar sendo necessário uma reavaliação e é necessário avançar no conhecimento dos procedimentos de segurança através do guia operacional da planta que ainda não foi desenvolvido. Como principal contribuição, este trabalho apresenta uma aplicação do conceito de monitoração por FCS para uma unidade diferente do reator nuclear.

Como o projeto da unidade está em fase de desenvolvimento, estando assim sujeito a modificações, uma revisão dos perigos identificados para a unidade deve ser cuidadosamente realizada, a fim de avaliar o grau de abrangência dos perigos identificados e discutidos neste trabalho.

A implantação de um sistema de FCS para a USICON, por ser uma inovação não constitui exigência nas normas brasileiras (CNEN, 1983) (CNEN, 2012) para nenhum tipo de instalação do ciclo do combustível, excetuando o reator nuclear. Porém baseando-se na experiência positiva da implementação desse sistema em reatores nucleares acredita-se na melhora no gerenciamento de acidentes e na consciência operacional da instalação.

Como sugestão para trabalhos futuros poderiam ser feitas simulações de cada FCS com o objetivo de estabelecer a interface entre o sistema de intertravamento da unidade e o sistema de FCS e o aprimoramento e a formalização de uma metodologia para desenvolvimento de FCS para outras plantas usando como base a metodologia adotada no presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, **Análise Exergética do Ciclo do Urânio Combustível Etapa Intermediária de Obtenção do UF₆**, Dissertação de M.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1996.

BENEDICT M., PIGFORD T. H., LEVI H.W., **Nuclear Chemical Engineering**, 2ª ed. USA, McGraw-Hill Book Company, 1981.

CARDOSO E.M., **Apostila Educativa Radioatividade**, CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2013.

Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>> Acesso em: Dezembro 2013.

CNEN, **Licenciamento de Instalações Nucleares**, Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN-NE-1.04, Rio de Janeiro, Brasil (2002).

CNEN, **Modelo Padrão para Relatório de Análise de Segurança de Usinas de Produção de Hexafluoreto de Urânio Natural**, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Brasil, 1983. (CNEN-NE-1.11)

CROW D.A., LOUVAR F., **Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications**, Prentice Hall, Upper Saddle River, Nova Iorque, 2011.

EPE, **PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2030**, Empresa de Pesquisas Energéticas – Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf> Acesso em: Dezembro de 2013.

FERMI E., **Enrico Fermi – Biographical**, Nobelprize.org. Nobel Media AB 2013.

Disponível em: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1938/fermi-bio.html> Acesso em: Dezembro 2013.

FRUTUOSO E MELO P.F., OLIVEIRA I.M. e SALDANHA PL, “**LWR Safety Analysis and Licensing and Implications for Advanced Reactors**”, in: P.V. Tsvetkov – Operation, Safety and Environment, Intech Open Access Publisher, 2011.
Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/nuclear-power-operation-safety-and-environment/lwr-safety-analysis-and-licensing-and-implications-for-advanced-reactors>> Acesso em: Janeiro de 2014.

HOLLNAGEL E., **Barriers and Accident Prevention**, Ashgate Publishing Limited, Aldershot, Reino Unido, 2004.

IAEA, **Instrumentation And Control Systems Important To Safety In Nuclear Power Plants**, International Atomic Energy Agency, Safety Guide N.SG – 1.3, Vienna, Áustria, 2002.

IAEA, **Nuclear Fuel Cycle Information System**, 2013.

Disponível em: < <http://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities>> Acesso em dezembro de 2013.

IAEA, **Safety Assessment for Facilities and Activities**, International Atomic Energy Agency, General Safety Requirements Part 4 - GSR Part 4, Viena, Áustria, 2009. (IAEA-GSR)

IAEA, **Safety of and Regulations for Nuclear Fuel Cycle Facilities**, International Atomic Energy Agency, TECDOC No. 1221, Viena, Áustria, 2001.

IAEA, **Safety of Conversion Facilities and Uranium Enrichment Facilities**, International Atomic Energy Agency, Specific Safety Guide – SSG-5, Vienna, Áustria 2010.

IAEA, **Safety of Nuclear Power Plant Design**, International Atomic Energy Agency, Specific Safety Requirements – SSR – 2/1 , Vienna, Áustria, 2012.

IAEA, **Severe Accident Management Programmes For Nuclear Power Plants**, International Atomic Energy Agency, Safety Guide – NS-G-2.15, Viena, Áustria, 2009.

IEC, **Risk Management — Risk Assessment Techniques**, International Electrotechnical Commission, 2009.

Disponível em: <http://www.previ.be/pdf/31010_FDIS.pdf>

Acesso em: Dezembro de 2013.

INB, <http://www.inb.gov.br/pt-br/WebForms/interna2.aspx?secao_id=48>, 2013b Acesso em dezembro de 2013.

INB, **Relatório de Gestão do Exercício 2012**, Indústrias Nucleares do Brasil, Brasil, Rio de Janeiro, 2013a.

Disponível em: <http://www.inb.gov.br/pt-br/conteudo/rel_gestao_2012.pdf> Acesso em: Dezembro de 2013

INSAG-10, **Defense in Depth in Nuclear Safety**, International Nuclear Safety Advisory Group IAEA, Austria, 1996.

KEMENY J.G., **Report of a President's Commission on the accident at Three Mile Island**, Washington D.C., U. S. Government Printing Office, 1979.

KHAN, F.I., ABBASI, S.A., **Major Accidents in Process Industries and an Analysis of Causes and Consequences**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 12, pp. 361-378, 1999.

LAMARSH J.R., BARATTA J.A., **Introduction to Nuclear Engineering**, 2ª edição, Prentice Hall, Nova Jersey, EUA, 2001.

OECD, **The Safety of the Nuclear Fuel Cycle**, Nuclear Energy Agency - Organisation for Economic Co-operation and Development, NEA No. 3588, 2005.

TODREAS M.E., KAZIMI M.S., **Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals**, 2ª Ed, Taylor & Francis, EUA, 1993.

TSOULFANIDIS N., **The Nuclear Fuel Cycle**, 2^a ed. Illinois, American Nuclear Society, La Grange Park, IL, 2013.

U.S.DOD, **Military Standard System Safety Program Requirements**, U.S. Department of Defense, Estados Unidos, 1993.

Disponível em: < <http://www.system-safety.org/Documents/MIL-STD-882C.pdf>>

Acesso em: Dezembro de 2013.

U.S.NRC, **Human Factors Acceptance Criteria for the Safety Parameter Display System**, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, EUA, 1981. (NUREG-0835)

U.S.NRC, **Human-System Interface Design Review Guidelines**, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, EUA, 2002. (NUREG-0700)

U.S.NRC, **Scenarios and Analytical Methods for UF₆ Releases at NRC-Licensed Fuel Cycle Facilities**, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3139, Washington, EUA, 1984.

U.S.NRC, **Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition**, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, EUA, 2007. (NUREG-0800)

U.S.NRC, **Three Mile Island A Report To The Commissioners And To The Public**, U.S. Nuclear Regulatory Commission - Special Inquiry Group, Volume 2, Washington, EUA, 1979.

U.S.NRC, **Three Mile Island Accident**, United States Nuclear Regulatory Commission Backgrounder, 2013.

U.S.NRC, **TMI-2 Lessons Learned Task Force Final Report**, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, EUA, 1979. (NUREG-0585)