

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES**

**ANÁLISE EXERGÉTICA DO CICLO DO
COMBUSTÍVEL NUCLEAR – ETAPA DA
MINERAÇÃO ATÉ A OBTENÇÃO DO
CONCENTRADO DE URÂNIO (“YELLOW
CAKE”)**

Jonathas Ferreira de Almeida Neto

Escola de Engenharia da UFMG
Belo Horizonte
Março de 2000

Jonathas Ferreira de Almeida Neto

**ANÁLISE EXERGÉTICA DO CICLO DO
COMBUSTÍVEL NUCLEAR – ETAPA DA
MINERAÇÃO ATÉ A OBTENÇÃO DO
CONCENTRADO DE URÂNIO (“YELLOW CAKE”)**

Dissertação apresentada ao Curso de Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de Concentração: Engenharia da Energia

Orientador: Ricardo Brant Pinheiro

Co-Orientador: Omar Campos Ferreira

Escola de Engenharia da UFMG
Belo Horizonte
Março de 2000

FICHA CATALOGRÁFICA

A447a	<p>Almeida Neto, Jonathas Ferreira de.</p> <p>Análise exergética do ciclo do combustível nuclear – etapa da mineração até a obtenção do concentrado de urânio (“Yellow cake”) / [manuscrito] / Jonathas Ferreira de Almeida Neto. – 2000. 148 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Ricardo Brant Pinheiro. Co-orientador: Omar Campos Ferreira.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f.126-148. Bibliografia: f.120-125.</p> <p>1. Engenharia nuclear – Teses. 2. Exergia (Termodinâmica) – teses. 3. Combustíveis nucleares – Teses. I. Pinheiro, Ricardo Brant. II. Ferreira, Omar Campos. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p>CDU: 621.039(043)</p>
-------	--



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE EXERGÉTICA DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR – ETAPA DA MINERAÇÃO ATÉ A OBTENÇÃO DO CONCENTRADO DE URÂNIO (“YELLOW CAKE”).

NOME DO ALUNO: JONATHAS FERREIRA DE ALMEIDA NETO

Dissertação defendida no Curso de Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, e aprovada pela Comissão Examinadora constituída por:

Ricardo Brant Pinheiro (Orientador) – DEN/UFMG - Doutor

Omar Campos Ferreira (Co-orientador) – DEN/UFMG - Mestre

Delly Oliveira Filho – DEA/UFV-MG, Doutor

Claúbia Pereira Bezerra Lima – DEN/UFMG, Doutora

Belo Horizonte, 15 de março de 2000

Área de concentração: Engenharia da Energia

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, que me deu forças para nunca desistir, meus pais, meus filhos, meus professores e todos aqueles que me auxiliaram nesta árdua jornada, a quem dirijo os versos abaixo, os quais tanto me ajudaram na vida e na minha formação, me dando uma base sólida para que pudesse chegar até aqui.

Nunca digas: “Não posso”.
Não fales: “É impossível”.
Não perguntes: “Quem sou ?”
Não afirmes: “Não tenho”.

Não te queixes: “Sou fraco”.
Não clames: “Nada valho”.
Não te digas inútil,
Não te creias sem força.

Age servindo aos outros,
Nunca deixando de ajudar,
Trabalha, trabalha sempre, e DEUS, em ti e por ti,
Criarás maravilhas
Por toda a tua vida !!!

Emanuel

Ao homem basta apenas o saber,
Então ele terá asas

Leonardo da Vint

AGRADECIMENTOS

- A Deus e aos meus Pais por terem moldado meu caminho;

- Ao Professor e Orientador Ricardo Brant Pinheiro do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG pelos seus ensinamentos e sua ajuda que possibilitaram a realização deste trabalho;

- Ao Professor e Co-orientador Omar Campos Ferreira pela sua atenção, suas indagações e sua colaboração durante este trabalho;

- À Professora Ângela Fortini Macedo do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG pelas longas conversas e reflexões;

- Aos Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG;

- À Professora Solange Vaz de Coelho do Departamento de Engenharia Química da UFMG;

- À Engenheira Química Janete Benedetto dos Santos do CDTN;

- À Secretária do CDTN Maria Aparecida Cardoso Chaves;

- Ao Geólogo Paulo Martins do CETEC-MG;

- Ao Professor George S. Valadão do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG;

- Ao Engenheiro José Humberto Costa da CEMIG;

- Ao Engenheiro José Carlos Castro da INB;

- Aos Colegas do Curso de Energia e Meio Ambiente realizado no CETEC-MG.

- À Bibliotecária Lenira do CDTN;

- Aos Colegas do CCTN/UFMG;

- A todos que de uma forma ou outra contribuíram diretamente ou indiretamente para realização desse trabalho;

- Meus sinceros agradecimentos.

LISTA DE TABELAS

pág

TABELA 3.1 – Distribuição das Reservas Uraníferas Brasileiras em toneladas de U_3O_8	58
TABELA 3.2 – Distribuição de Zonas Mineralizadas na Jazida do Cercado.....	62
TABELA 5.1 – Produção e Consumos no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, nos Anos de 1986 e 1995.....	82
TABELA 5.2 – Minério Processado e Produção de U_3O_8 no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, nos anos de 1982 a 1996.....	82
TABELA 5.3- Insumos da Extração e Tratamento Físico do Minério de Urânio no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, para concentração de 0,092% de U_3O_8	87
TABELA 5.4 – Insumos de Tratamento Químico do complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, para concentração de 0,09% de U_3O_8	89
TABELA 5.5 – Produtos do Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, para concentração de 0,09% de U_3O_8	97
TABELA 5.6 – Rejeitos Proveniente da Extração, Tratamento Físico e Químico do Minério de Urânio.....	98
TABELA 5.7 – Emissões de Rejeitos Eliminados na Atmosfera Proveniente do Tratamento Químico do Minério de Urânio.....	101
TABELA 5.8 - Emissões de Rejeitos Eliminados na Atmosfera Provenientes dos Equipamentos Mecânicos a Gasolina e a Diesel Utilizados na Extração e no Tratamento Físico do Minério de Urânio.....	102
TABELA 5.9 - Somatório das Exergias Químicas dos Insumos, Produtos, Perdas e Rejeitos.....	109
TABELA 6.1. – Insumos da Etapa de Purificação.....	112
TABELA 6.2 – Insumos da Etapa de Conversão do DUA em UF_6	113
TABELA 6.3 - Somatório das Exergias Químicas dos Insumos, Produtos, Perdas e Rejeitos.....	114

LISTA DE FIGURAS

pág

FIGURA 2.1 – Processo Reversível Utilizado para o Cálculo da Exergia – Espaço de Fases μ_i , T e P.....	48
FIGURA 2.2 – Diagrama Mostrando a Integração do Trabalho de Difusão sobre número de Moléculas da espécie i, n_i	49
FIGURA 3.1 – Localização das Reservas Brasileiras de Urânio.....	59
FIGURA 3.2 – Mapa de Localização das Jazidas do Campo de Agostinho e Cercado.....	60
FIGURA 3.3 – Mapa Geológico das Jazidas do Campo de Agostinho e Cercado.....	60
FIGURA 4.1 – Vista Parcial do Complexo Industrial da INB em Poços de Caldas.....	67
FIGURA 4.2 – Vista Parcial da Mina de Osamu Utsumi (Campo do Cercado) em Poços de Caldas, MG.....	67
FIGURA 4.3 – Vista Parcial da Usina de Tratamento Químico, a Fábrica de Ácido Sulfúrico, o conjunto de Instalações Auxiliares, a Unidade de Rejeitos Líquidos e Sólidos e a Usina de Produção de Concentrado de Urânio no Complexo Industrial da INB em Poços de Caldas, MG.....	68
FIGURA 4.4 – Concentrado de Urânio passando pelo Filtro antes da Secagem.....	70
FIGURA 4.5 – Concentrado de Urânio Embalado em Tambores Apropriados.....	70
FIGURA 4.6 – Diagrama Esquemático do Complexo Industrial da INB, em Poços de Caldas, MG.....	79
FIGURA 5.1 - Diagrama Esquemático da Análise Exergética do Minério e Concentração de Urânio do Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG.....	81
FIGURA I.1 – Fluxograma do Processamento do Minério de Urânio.....	126
FIGURA I.2 – Diagrama Esquemático do Tratamento Químico no Processamento do Minério de Urânio.....	135

GLOSSÁRIO

Absorção – Fixação de uma substância, geralmente líquida ou gasosa, no interior da massa de outra substância, em geral sólida, e resultante de um conjunto complexo de fenômenos como reações químicas.

Acidificar – Tornar ácido ou ácido; acidificar; acidar.

Adensar – Tornar espesso, denso, pesado; condensar, espessar.

Adsorção – Fixação das moléculas de uma substância (o adsorvato) na superfície de outra substância (o adsorvente).

Aegerina – Mesmo que egerina $\text{NaFe}(\text{SiO}_3)_2$ – silicato de sódio e ferro

Agente oxidante – Íon que diminui o número de cargas positivas nas reações eletroquímicas de oxidação-redução.

Agregar – Reunir, congregar, acumular, juntar, associar.

Albita – Mineral triclinico do grupo dos feldspatos, silicato de alumínio e sódio – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (aluminossilicato de sódio).

Albitita – Rocha porfírica (textura de rocha magmática que apresenta fenocristais disseminados numa pasta vítrea ou finamente cristalizada) constituída de muscovita, apatita, quartzo, óxido opacos e principalmente de albita.

Alcalino – Referente a, ou próprio de uma base forte em solução aquosa.

Amina – Classe de compostos orgânicos derivados da amônia pela substituição de um ou mais átomos de hidrogênio por grupos orgânicos.

Andradita – Mineral monométrico (formado de versos de uma só medida), silicato de ferro e cálcio, variedade do grupo mineral das granadas, e que se apresenta em grande número de subvariedades.

Anfibólio – Designação comum aos minerais do grupo muito semelhante, quanto à composição química, ao dos piroxênios. São silicatos que contêm cálcio, magnésio ou ferro, e podem conter manganês, sódio e potássio.

Apatita – Mineral hexagonal, fluorfosfato ou clorofosfato de cálcio, ou ambos em mistura, matéria-prima para a fabricação de adubo fosfatado.

Ápex – Orifício inferior para saída de polpa (ápice, ponto mais alto).

Arenito – Rocha constituída predominantemente de grãos de areia consolidados por um cimento.

Argila – 1. Designação comum a silicatos de alumínio hidratados, que constituem minerais ditos argilosos. 2. Sedimento clássico predominantemente constituído por fragmentos inferiores a dois microns de diâmetro, e que, conforme o mineral argiloso existente pode ser plástico; barro.

Augita – Mineral monoclinico dos grupos do piroxênios, metassilicato de cálcio, manganês, ferro, titânio e alumínio – $(Ca, Mg, Fe, Ti, Al)_2(Si, Al)_2O_6$.

Autógeno - Que se gera a si mesmo.

Autunita – Mineral pertencente ao grupo dos minerais uraníferos fosfatos que destacam-se pela fluorescência, de composição química $P_2O_5 \cdot 2U_2O_3 \cdot CaO \cdot 12H_2O$ [78].

Badeleyta – Mineral monoclinico, óxido de zircônio.

Bauxita – Rocha com aparência de argila, mas sem plasticidade, constituída essencialmente de hidróxidos de alumínio de mistura com argilas, hidróxido de ferro, fosfato de alumínio, etc.

Bentonita – Mineral composto de cinza vulcânica alterada que possui predominantemente a montmorilonita.

Betafita – Mineral uranífero pertencente ao grupo dos óxidos complexos, onde o urânio ocorre em um grande número de combinações oxidadas complexas, associado a vários outros metais comuns e, em geral, pertencentes ao grupo das Terras Raras. Sua composição química é $(U, Ca, Nb, Ta, Ti)_3 O_2 nH_2O$.

Branerita - Mineral uranífero pertecente ao grupo dos óxidos complexos, onde o urânio ocorre em um grande número de combinações oxidadas complexas, associado a vários outros metais comuns e em geral pertecentes ao grupo das Terras Raras. Sua composição química é $(U, Ca, Fe, Y, Th)_3 Ti_5 O_{16}$.

Cal – Óxido de cálcio (CaO) obtido pela calcinação de pedras calcárias.

Calcário - Designação comum às rochas constituídas essencialmente de carbonato de cálcio ($CaCO_3$)

Calcinação – Aquecimento de um composto em que se lhe provoca a decomposição sem oxidação.

Calcita – Mineral trigonal, carbonato de cálcio (CaCO_3), constituinte de calcários, ocorrendo também em marmóres.

Calcossilática – 1. Que contém calcário. 2. Relativo ao, ou da natureza do calcário .

Carbonífero – Que contém ou produz carvão.

Carnotita – Mineral uranífero pertencente ao grupo dos vanadatos (minerais de urânio associados com o vanádio) que são caracterizados pela associação quase exclusiva com as rochas sedimentares. Sua composição química é $\text{K}_2(\text{UO}_2)(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

Chibinito – Constituída de minerais de eudialita, nifelina e sienita, distinta do lujaurito

Cisalhamento - Deformação que sofre um corpo quando sujeito à ação de forças cortantes.

Coagulação – 1. Passagem de um líquido ao estado de sólido. 2. Floculação.

Coesão – Propriedade resultante da ação de forças atrativas existentes entre partículas (moléculas, átomos, íons) constituídas de um corpo.

Cofinita – Mineral uranífero pertencente à família dos silicatos com a seguinte composição química: $\text{U}(\text{SiO}_4)_{(1-x)}(\text{OH})_{4x}$, onde x é menor do que 1

Colóide – 1. Sistema físico-químico que contém duas fases, uma das quais, a fase dispersa está extremamente subdividida e imersa na outra, a fase dispersora. 2. Corpo que não se cristaliza, ou se cristaliza dificilmente, e que, em dissolução, se difunde com lentidão extrema.

Colofanito – Variedade de andratita de cor marrom-amarelada, incolor ou branco, constituinte essencial de rochas fosfáticas sedimentares e ossos fósseis.

Davidita – Mineral uranífero pertencente ao grupo dos óxidos múltiplos (complexos) que são constituídos pelas combinações de nióbio (Nb), tântalo (Ta), em maior proporção, e zircônio (Zr), estanho (Es) e tungstênio (W). São minerais de composição química complexa, onde o urânio e o tório aparecem substituindo outros elementos.

Decantar – 1. Separar, por gravidade, impurezas sólidas que se contenham em (um líquido).

Diluir – 1. Diminuir a concentração de uma solução, mediante a adição de um líquido conveniente. 2. Misturar com água.

Egirina – Essencialmente, um silicato de sódio e ferro férrico, NaFe (Si₂O₆). Na₂O 13,4%, Fe₂O₃ 34,6% e SiO₂ 52,0%. Um mineral com esta composição exata chama-se acmita, sendo encontrado raramente. Usualmente, o cálcio substitui o sódio, e o ferro, parcialmente, pelo magnésio e alumínio. Algum vanádio pode estar presente. Encontrado, principalmente, nas rochas ricas em carbonato de sódio e pobres em sílica.

Epidoto – designação comum dos minerais dos grupo dos epidotos, minerais ortorrômbicos ou monoclinicos, silicatos básicos de cálcio e alumínio ou ferro, ou ambos, e que podem conter, ainda manganês.

Esfarelita – Mesmo que esfalerita. Mineral isométrico, sulfeto natural de zinco (ZnS), em cristais negros ou castanhos. Ocorrendo freqüentemente com a galena.

Estéril – 1. Que não produz; árido, improdutivo, inútil. 2. Que não traz vantagem ou resultado.

Euxenita – Mineral uranífero pertencente ao grupo dos óxidos complexos, onde o urânio ocorre em um grande número de combinações oxidadas complexas, associado a vários outros metais comuns e em geral pertencentes ao grupo das Terras Raras. Sua composição química é $(Y, Ca, Ce, U, Th) (Nb, Ta, Ti)_2 O_6$.

Exploração – Ato ou efeito de explorar, tirar proveito econômico de determinada área, sobretudo recursos minerais.

Feldspático – 1. Que contém feldspato. 2. Relativo ao, ou da natureza do feldspato.

Feldspato – Designação comum aos silicatos de alumínio e de um ou mais metais alcalinos ou alcalinos terrosos, mais comumente potássio, sódio e cálcio, de cor clara, componentes de rochas eruptivas.

Fenito – Alcalissienito híbrido cuja composição consiste em 84% de micropertita, 8% de egerina (aegerina), 5% de calcita e 3% de apatita, zircônio e titanita.

Foyaíto - Rocha leucocrática, holocristalina (constituída exclusivamente de minerais cristalizados, sem vidro), de granulação média a grosseira, por vezes pegmatóide.

Floculação – 1. Precipitação da fase dispersa de um colóide (sistema físico-químico que contém duas fases, uma das quais, a fase dispersa está extremamente subdividida e imersa na outra, a fase dispersora). 2. E a agregação obtida por intermédio de polímeros orgânicos que possuem elevado peso molecular e que realizam a ligação entre as partículas servindo como pontes e originando agregados chamados flóculos ou flocos. 3. Ação de formar massas floculadas como uma névoa, um precipitado químico, etc; ação de formar massas agregadas ou massas compostas de partículas.

Flotação – É um processo de separação aplicado a partículas sólidas que explora a diferença nas características de superfície entre as várias espécies diferentes. O método trata de misturas heterogêneas de partículas suspensa em fase aquosa (polpas).

Fluorita – Mineral comum e amplamente distribuído. Composto de flureto de cálcio (CaF_2) com 51,3% de Ca e 48,7% de F. As terras raras, particularmente o ítrio e o cério, podem substituir o cálcio.

Folhelo – São rochas sedimentares de granulação fina que se formam pela consolidação de camadas de lama, argila ou silte.

Fonolito – É o equivalente vulcânico da nefelina sieneito, assim mais pobre de sílica do que o traquito. Isto é manifestado, mineralogicamente, pela presença de feldspatóides. O ortoclásio (sanidínio) é o feldspato comum; a albita raramente está presente.

Fusiforme – Mesmo que afusado. Que tem forma de fuso (porção de superfície esférica compreendida entre dois semi-planos que partem de um diâmetro da esfera); afuselado, fuselado, fusóide.

Galena – Mineral monométrico (formado de versos de uma só medida), sulfeto de chumbo, o principal minério de chumbo.

Ganga – Parte não útil presente em um minério.

Gnaisse – Rocha metamórfica feldspática laminada, nitidamente cristalina, e de composição mineralógica muito variável.

Granito – Rocha magmática granular, de profundidade caracterizada essencialmente por quartzo e feldspato alcalino.

Granulometria – método de análise que visa a classificar as partículas de uma amostra pelos respectivos tamanhos e a medir as frações correspondentes a cada tamanho.

Hematita – Mineral trigonal, óxido férrico, Fe_2O_3 , um dos mais importantes minérios de ferro, ocorrendo em cristais cinza-azul a negros e em massas terrosas avermelhadas.

Hidrometalurgia – Conjunto de tratamentos físicos e químicos, com a utilização de água, a que se submetem os minerais para se extraírem metais, devidamente purificados e beneficiados.

Imiscibilidade – Que não é miscível, ou seja, aquilo que não se pode misturar.

Jigue – Equipamento utilizado para separar materiais de densidades diferentes mediante movimento vertical alternado, de um líquido que faz sobrenadar o material mais leve e submergir o mais pesado.

Jigagem – Ato de concentrar materiais por intermédio de jigues.

Jordisita – Mineral composto de sulfeto de molibdênio (MoS_2), preto, pulverulento, amorfo, com fratura concoidal.

Lixiviação – Operação de separar certas substâncias, por meio de lavagem, os sais nelas contidos.

Lujaurito – Constituído de minerais de eudialita, sienita contendo espessuras paralelas de feldspato com grãos de nifelina e cristais de acmita.

Macerar – 1. Amolecer (uma substância sólida) pela ação de um líquido ou por meio de pancadas. 2. Impregnar um líquido com princípio solúvel de uma substância sólida. 3. Machucar um corpo para extrair-lhe o suco.

Magnetita – É um minério de ferro comum. Encontra-se distribuída, sob a forma de um mineral acessório, em muitas rochas magmáticas. Em certos tipos de rocha, através de segregação magmática, torna-se um dos principais constituintes e pode, assim, formar grandes corpos de minério. É composto de Fe_2O_4 ou Fe_2O_3 com 72,4% de Fe e 27,6% de O. Contudo, algumas análises mostram alguns por cento de magnésio e manganês bivalente.

Mármore – Calcário metamorfozido e recristalizado, duro, compacto, de cores variadas, que se pode polir.

Migmatitos – Rocha gnássóide mista, constituída de material sedimentar e magmático, formada por uma espécie de injeção.

Monoclínico – Sistema cristalino que se caracteriza essencialmente por três eixos cristalográficos (referente à cristalografia, ciência que se ocupa dos cristais, das suas formas e estrutura, e das leis que regem a sua formação) desiguais, dois deles perpendiculares entre si, e o terceiro perpendicular ao eixo horizontal, porém oblíquo em relação a vertical.

Montmorilonita – Compreende certo número de minerais argilosos compostos de camadas de silicato. A característica saliente dos membros deste grupo é sua capacidade de absorver moléculas de água entre folhas, produzindo expansão acentuada da estrutura. Composição $(\text{Al}, \text{Mg})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

“Overflow” – Partículas obtidas por transbordamento.

Oxidação – 1. Ato ou efeito de oxidar-se; oxigenação. 2. Fixação de oxigênio em um corpo. 3. Processo em que ocorre o aumento do número de cargas positivas de um íon.

Pelotamento - Ação de fazer pelota ou bola.

Pelotização – Método pelo qual o material finamente dividido sofre rolamento num tambor ou em um disco inclinado, de maneira que as partículas se unam formando pequenas pelotas (“bolas”) esféricas, as quais são, posteriormente, submetidas a endurecimento térmico.

Percolação – Operação de passar um líquido através de um meio para filtrá-lo ou para extrair substância deste meio.

Permiano – Tempo ou rochas da era paleozóica que seguem ao carbonífero e precedem ao triássico (era mesozóica) com duração de cerca de 280 milhões de anos.

Pirita – É um mineral composto de bissulfeto de ferro (FeS_2) com 46,6% de Fe e 53,4% de S. Pode conter pequenas quantidades de níquel e cobalto. Contém freqüentemente quantidades diminutas de ouro e cobre, mas provavelmente como impurezas microscópicas. É o sulfeto mais disseminado. Formou-se tanto nas temperaturas altas como baixas, mas as massas maiores se formaram provavelmente a alta temperatura.

Piroclástico – Diz-se dos sedimentos originários das atividades vulcânicas explosivas, das quais provêm fragmentos de vários tamanhos, desde poeira até blocos, que se vão depositar, formando depósitos piroclásticos.

Pirocloro – Mineral monométrico (formado de versos de uma só medida), fluorniobato e titânio de cálcio e sódio, que pode ser uma fonte de tório.

Pirolusita - É um mineral composto de dióxido de manganês com cerca de 63,2% de Mn e 36,8% de O. Se distingue dos outros minerais de manganês e se caracteriza por seu traço preto, dureza baixa e comumente pequena quantidade de água.

Piroxênio – Designação comum aos minerais do grupo dos piroxênios, formado por silicatos de magnésio, ferro, cálcio, por vezes também alumínio e sódio, raramente puros, as quais das vezes em misturas isomorfias.

pH – Logaritmo decimal do inverso da atividade de íons de hidrogênio numa solução; potencial hidrogênico.

Polímeros – Composto formado por sucessivas aglomerações de grande número de moléculas fundamentais.

Polpa – Massa, pasta; representa normalmente a mistura entre sólido e líquido.

Precipitação – Processo em que se forma um sólido insolúvel numa solução.

Precipitante – 1. Que precipita. 2. Reagente químico com que se obtém um precipitado (sólido que se forma e se deposita no seio de uma solução líquida).

Proterozóica – Era que vai desde a solidificação da crosta terrestre até o aparecimento dos primeiros sinais de vida, durou cerca de quatro bilhões de anos.

Quartzitos – Rocha metamórfica, composta essencialmente de quartzo: arenito metamorfozido em que o cimento silicoso se recristalizou.

Quartzo – Mineral trigonal, óxido de silício (SiO_2) que se apresenta em numerosas variedades, e também denominado cristal de rocha, quando duro e transparente.

Refratário – 1. Que resiste a certas influências químicas ou físicas. 2. Que pode permanecer em contato com o fogo, ou que suporta calor elevado, sem se alterar.

Resina – 1. Secreção viscosa que exsuda (sair em forma de suor ou gotejando) do caule e de outros órgãos de certas plantas, e que contém substâncias odoríferas, anti-sépticas, etc., as quais cicatrizam rapidamente qualquer ferida em tais órgãos, assumindo aspecto vítreo. 2. Designação comum a certos produtos sintéticos de características análogas às da resina.

Revolver – Volver muito, remexer, virar muitas vezes, revirar, retorcer, agitar-se, mover-se em círculo, girar.

Rocha alcalina – Rocha que contém alta percentagem de álcalis (sódio e potássio) em relação em relação à sílica e à alumina.

Rocha holocristalina – Rocha constituída exclusivamente de minerais cristalizados, sem vidro.

Rocha magmática – Rocha que resultou da consolidação de magma; rocha ígnea, rocha eruptiva.

Rocha sedimentar – Rocha resultante da destruição, desagregação ou decomposição de outras rochas ou outros materiais preexistentes e da posterior sedimentação, em camadas ou estratos, dos detritos provenientes dessa destruição; rocha estratificada.

Rutílio – É um mineral composto de dióxido de titânio (TiO_2) com 60% de Ti e 40% de O. Usualmente, está presente um pouco de ferro, podendo elevar-se sua quantidade a 10%. É encontrado no granito, pegmatitos graníticos, gnaisse, mica xistos, calcário metamórfico e dolomita. Pode estar presente como mineral acessório na rocha, ou em filões de quartzo que atravessam.

Sedimentação – 1. Formação de sedimentos. 2. Processo pelo qual substâncias minerais ou rochosas, ou substâncias de origem orgânica, se depositam em ambientes aquosos ou aéreos.

Semi-autógena – Metade gerada por si mesmo

Sericita – Presente em algumas rochas xistosas, ocorrendo sob a forma de agregados fibrosos de escamas minúsculas que tem brilho sedoso, mas não mostram plenamente a verdadeira natureza do mineral. É usualmente produto da alteração do feldspato.

Separação gravítica – Separação de materiais minerados pela diferença da densidade entre estes.

Silica – Dióxido de silício (SiO_2), cristalino, abundantíssimo na crosta terrestre.

Silicato- Numeroso grupo de substâncias minerais constituídas pela combinação da sílica com um ou mais óxidos metálicos e água, e que constituem fração importante das rochas da crosta terrestre.

Sinterização – 1. Processo em que duas partículas sólidas se aglutinam pelo efeito de aquecimento a uma temperatura inferior à da fusão, mas suficientemente alta para possibilitar a difusão dos átomos das suas redes cristalinas. 2. Aglomeração de partículas pequenas para formar partículas maiores, “bolo/tortas” ou massas; no caso de minérios e concentrados esta aglomeração é constituída pela fusão de certos constituintes. 3. Promoção de aglomeração por aquecimento.

Sistema cristalino – Conjunto de eixos cristalográficos cujas posições referentes no espaço e cujos valores dimensionais definem e classificam os cristais em sete categorias: sistema monométrico ou isométrico, tetragonal (quadrático), hexagonal, trigonal, ortorrômbico, monoclinico e triclinico.

Sobrenadar – 1. Nadar à superfície. 2. Andar ou mover-se à tona da água; boiar, flutuar.

Sobrenadante – Material que boia, flutua sobre um determinado líquido.

Solubilidade – 1. Qualidade de solúvel. 2. Propriedade de uma substância que forma solução com outra. 3. Medida da capacidade que tem uma substância de se dissolver em outra, expressa pela concentração da solução saturada da primeira na Segunda.

Solubilização – Mesmo que solubilizar, tornar (uma substância solúvel).

Sulco – 1. Rego aberto pelo arado ou pela charrua. 2. Ruga, prega, carquilha.

Tinguaíto – Rocha magmática em geral com forma de diques ou chaminés, e textura granular e porfirítica (designação comum a às rochas extrusivas e aos diques que se apresentam com esta textura).

Titanita – Mineral monoclinico , silicato de titânio e cálcio; esfênio.

Torbenita – Mesmo que uranita, designação comum aos minerais ortorrômnicos do grupo das uranitas, os quais têm como representantes principais a autunita, fosfato de urânio e cálcio hidratado, e a torbenita, fosfato de urânio e cobre hidratado, e a zeurenita, arseniato de cobre e urânio hidratado.

Tufo – 1. Denominação ambígua dada aos calcários com grandes poros, gerados por fontes de águas ricas em bicarbonato de cálcio. 2. Qualquer dos produtos de projeção vulcânica que se hajam consolidado.

Tyuyamunita – Mineral uranífero de fórmula química, $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, é o análogo de cálcio da carnotita e semelhante nas propriedades físicas, com exceção do colorido ligeiramente mais esverdeado e da fluorescência verde-amarela.

“Underflow” – Partículas obtidas por sedimentação

Uranita – Denominação antiga da autunita, sinônimo de uraninita, denominação antiga do urânio, termo geral para os fosfatos arsenatos de urânio do tipo autunita e tobernita.

Uraninita – É um mineral uranífero composto de UO_2 . A uraninita está sempre parcialmente oxidada e por esse motivo a composição verdadeira fica entre UO_2 e U_3O_8 . O tório pode substituir o urânio e uma série completa entre uraninita e torianita, ThO_2 , tem sido observada em preparações artificiais. As análises mostram comumente a presença de pequenas quantidades de chumbo, e os elementos rádio, tório, ítrio, nitrogênio, hélio e argônio.

Uranofona - É um mineral uranífero da família dos silicatos hidratados, com a seguinte fórmula química: $2CaO.2UO_3.2SiO_2.6H_2O$

Uranotorianita – Variedade de torianita com urânio. Membro intermediário da série uraninita-torianita.

Uranotorita - É um mineral uranífero da família dos silicatos, com a seguinte fórmula química: $Th_{(1-x)}U_xSiO_4$, onde x é menor do que 1.

Viscosidade – 1. Qualidade de viscoso. 2. Resistência que todo fluido oferece ao movimento relativo de qualquer de suas partes.

Vortex – Orifício superior para saída de polpa.

Zircão – Silicato de zircônio.

Zirconita – Mineral tetragonal (quadrático), silicato de zircônio, o qual, quando transparente e límpido, é pedra preciosa.

SUMÁRIO

pág.

RESUMO	28
ABSTRACT	32
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	38
Capítulo 2 - CONCEITOS DE TERMODINÂMICA	39
2.1 – LEI DE GOUY-STODOLA.....	39
2.2 – CONCEITO DE EXERGIA.....	44
2.3 – SISTEMAS REATIVOS.....	47
2.4 – ANÁLISE EXERGÉTICA.....	50
2.4.1 - EFICIÊNCIA EXERGÉTICA.....	53
Capítulo 3 - RESERVAS E JAZIDAS URANÍFERAS BRASILEIRAS	57
3.1 - RECURSOS E RESERVAS URANÍFERAS.....	57
3.2 – RESERVAS E PRODUÇÃO BRASILEIRA.....	58
3.3 – CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS JAZIDAS BRASILEIRAS DE URÂNIO.....	59
Capítulo 4 – PROCESSAMENTO DO MINÉRIO URANÍFERO DO PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS, MG	65
4.1 – EXTRAÇÃO.....	68
4.2 – TRATAMENTO FÍSICO.....	69
4.3 – TRATAMENTO QUÍMICO.....	69
4.4 – REJEITOS DA EXTRAÇÃO, TRATAMENTO FÍSICO E QUÍMICO DA MINERAÇÃO DE URÂNIO.....	75

Capítulo 5 – ANÁLISE EXERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE U₃O₈ DE POÇOS DE CALDAS, MG, PARA CONCENTRAÇÃO DE 0,092% DE U₃O₈.....	80
5.1 – EXTRAÇÃO.....	83
5.1.1 – INSUMOS NA ETAPA DE EXTRAÇÃO.....	84
5.2 – TRATAMENTO FÍSICO.....	85
5.2.1 – INSUMOS NA ETAPA DE TRATAMENTO FÍSICO.....	86
5.3 - TRATAMENTO QUÍMICO.....	91
5.3.1– INSUMOS NA ETAPA DE TRATAMENTOQUÍMICO.....	91
5.4 – PRODUTOS E REJEITOS.....	95
5.5 – ESTIMATIVA DAS EXERGIAS.....	103
5.5.1 – ETAPA DE EXTRAÇÃO.....	103
5.5.2 – ETAPA DE TRATAMENTO QUÍMICO.....	104
5.5.3 – ETAPA DE PRODUÇÃO E PERDAS.....	106
5.6 – CÁLCULO DO GRAU CUMULATIVO DE PERFEIÇÃO DA MINERAÇÃO ATÉ A PRODUÇÃO DE CONCENTRADO DE URÂNIO.....	108
Capítulo 6 – ANÁLISE EXERGÉTICA DA MINERAÇÃO ATÉ A PRODUÇÃO DE HEXAFLURETO DE URÂNIO.....	111
6.1 – CÁLCULO DO GRAU CUMULATIVO DE PERFEIÇÃO DA MINERAÇÃO ATÉ A PRODUÇÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO.....	114
Capítulo 7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	116
Capítulo 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	118
REFERÊNCIAS.....	120
ANEXO I – PROCESSAMENTO DO MINÉRIO URANÍFERO.....	126
I.1 - INTRODUÇÃO	126

I.2 - EXTRAÇÃO	127
I.3 – TRATAMENTO FÍSICO	127
I.3.1 - PENEIRAMENTO	128
I.3.2 - COMINUIÇÃO	129
I.3.2.1 – BRITAGEM.....	130
I.3.2.2 – MOAGEM.....	132
I.3.3 – CLASSIFICAÇÃO.....	133
I.4 – TRATAMENTO QUÍMICO.....	135
I.4.1 – ESPESSAMENTO.....	136
I.4.2 – LIXIVIAÇÃO.....	138
I.4.3 – FILTRAGEM.....	141
I.4.4 – CONCENTRAÇÃO E PURIFICAÇÃO.....	144
I.4.5 – PRECIPITAÇÃO.....	146
I.4.6 – FILTRAGEM, SECAGEM E ENTAMBORAMENTO.....	147

RESUMO

O objeto deste trabalho é realizar a análise exergética da etapa inicial do ciclo do combustível nuclear, abrangendo desde a mineração e o tratamento do minério até a produção de concentrado de urânio (“yellow cake”). Ele dá continuidade aos trabalhos desenvolvidos no Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG, na área de concentração Engenharia da Energia e, mais especificamente, na área de análise exergética visando ao planejamento energético.

O presente trabalho faz também o acoplamento de seus resultados com aqueles obtidos da etapa subsequente, de conversão do concentrado de urânio em hexafluoreto de urânio (UF_6), objeto da dissertação “*Análise Exergética do Ciclo do Urânio Combustível - Etapa Intermediária de Obtenção do UF_6* ”, de Carlos Vicente Goulart de Azevedo [21], orientada pelo prof. Omar Campos Ferreira. Nesta dissertação os investimentos exergéticos das etapas de purificação do concentrado de urânio e de conversão do diuranato de urânio (DUA) em hexafluoreto de urânio (UF_6) puderam ser estimados.

Outras dissertações tratarão, no futuro, das demais etapas do “front-end” do ciclo do combustível, incluindo o enriquecimento isotópico, a fabricação dos elementos combustíveis, a geração de energia elétrica num reator nuclear de potência e, mais adiante, as etapas do “back-end” do ciclo do combustível nuclear.

A *exergia* ou *disponibilidade energética* de um sistema termodinâmico, num dado estado, pode ser definida como o trabalho máximo que se pode obter levando-se o sistema ao estado de equilíbrio com o ambiente, por meio de um processo reversível. Em todo processo real (irreversível), há uma quantidade de trabalho não realizável, que dá uma medida da irreversibilidade do processo.

O conceito de *exergia*, decorrente da Primeira e da Segunda Leis da Termodinâmica, foi inicialmente introduzido por G. J. Gouy e A. Z. Stodola [1, 2], que quantificaram o trabalho útil perdido num processo termodinâmico. Z. Rant [3] publicou um artigo utilizando, pela primeira vez, a palavra *exergia* e deu origem a uma série de artigos sobre a aplicação do

conceito de *exergia*, principalmente na Europa. Nas décadas de 70 e 80, J. Szargut [4], T. A. Brzustowski e P. J. Golem [5-7] adotaram o termo *exergia* e aplicaram análises exergéticas em diversos trabalhos.

A análise exergética de um sistema termodinâmico consiste, fundamentalmente, na identificação e quantificação das irreversibilidades do sistema, com a aplicação das exergias de entrada (insumos) e de saída (produto e rejeitos) no sistema, e no cálculo do grau cumulativo de perfeição.

A análise exergética de um sistema possibilita exprimir as limitações energéticas de diferentes processos, tais como tecnológicos, econômicos, ambientais e sociais. R. U. Ayres [8, 9], H. T. Odum [13-15], R. Georgescu [10-12], G. Wall [16, 25] e outros estenderam a aplicação da análise exergética a estas áreas respectivamente.

A metodologia aplicada neste trabalho foi concentrada no processo de mineração e concentração de urânio desenvolvido no Complexo Industrial das Indústrias Nucleares do Brasil S.A (INB), Unidade de Poços de Caldas, MG. Para isto determinou-se os insumos, os produtos e os rejeitos envolvidos na mineração e concentração do urânio dividindo-se o processo em três blocos: *Extração*, *Tratamento Físico* e *Tratamento Químico*. Determinou-se suas respectivas exergias químicas e, em seguida, calculou-se o grau cumulativo de perfeição da etapa de mineração de urânio até a produção de UF_6 .

Neste trabalho verificou-se que o total de insumos exergéticos na etapa de tratamento químico foi cerca de 73,3%, ficando o restante (etapas de extração, tratamento físico, purificação e conversão do DUA em UF_6) com 26,7%. Foram considerados apenas as perdas de energia elétrica, não se tendo dados sobre as perdas de U_3O_8 e dos demais insumos.

Nas etapas de extração e tratamento físico do minério de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG, da quantidade total de insumos exergéticos, 92,3% refere-se ao explosivo nitroglicerina. Juntando os insumos dos principais constituintes do minério de urânio SiO_2 ,

Al_2O_3 e o K_2O com a nitroglicerina e a energia elétrica, obtém-se 97,84% do total de insumos exergéticos consumidos nestas duas etapas.

Na etapa de tratamento químico, do total de insumos exergéticos, 99,63% refere-se à água, devido a grande quantidade deste insumo utilizada em todo processo. A quantidade dos insumos tridecanol (modificante) e alamina-336 (extratante), em kg/kg U, utilizados na extração do molibdênio, podem parecer a princípio muito pequenas, no entanto, ressalta-se que os dados utilizados para a quantificação destes insumos foram tirados do trabalho de J. D. Neto [56].

Na etapa de rejeitos da mineração e concentração de urânio, do total de rejeitos quantificados, 91,72% refere-se ao querosene utilizado como diluente na etapa de extração do urânio e molibdênio no tratamento químico. Nas etapas de purificação e conversão do DUA em UF_6 não foram quantificados os rejeitos, pois estes não foram abordados na dissertação de mestrado de C. V. G de Azevedo [21].

Os valores do grau cumulativo de perfeição da análise exergética da mineração e concentração de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG, até aqui estudados, foram baixíssimos, devido ao elevado investimento de insumos exergéticos nas etapas de extração, tratamento físico, tratamento químico, purificação e conversão do DUA em UF_6 .

Com uma diminuição do o insumo exergético nitroglicerina em 10% e refazendo-se o cálculo do grau cumulativo de perfeição somente para etapa de extração do minério de urânio, o grau cumulativo de perfeição se torna cerca de 17 vezes maior que o grau cumulativo de perfeição da análise exergética da mineração e concentração de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG. Conclui-se que a redução deste insumo exergético implica em um substancial aumento do grau cumulativo de perfeição.

No entanto, diminuindo o insumo exergético água em 10% e refazendo os mesmos cálculos. O grau cumulativo de perfeição para mineração e concentração de urânio passa a ser 1,17 vezes maior do que grau cumulativo de perfeição da análise exergética da

mineração e concentração de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG. Com isto, a diminuição deste insumo exergético não implica no aumento do grau cumulativo de perfeição. O constituinte que está presente em maior quantidade no rejeito, em valores de exergia, é o querosene (91,72 %).

O valor do grau cumulativo de perfeição das etapas iniciais do ciclo de combustível nuclear que vão desde a mineração até a concentração de urânio, não levou em consideração vários insumos, tanto energéticos como de materiais, das etapas de extração, tratamento físico e químico devido à dificuldade de obtenção de dados. Por isso, para obtenção destes dados, em alguns casos, foram utilizados dados de trabalhos não específicos da mineração e da usina de concentração de urânio estudada (Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG).

Houve grande dificuldade na obtenção de exergias químicas de algumas substâncias, que não estão disponíveis na literatura técnica. Por isso, optou-se, quando possível, por calculá-las através de equações e das exergias químicas dos constituintes dessas substâncias. No caso específico do molibdato de cálcio, optou-se por não considerar sua exergia química, devido incerteza em estabelecer qual a espécie química de referência.

ABSTRACT

The *exergy* or *energy availability* of a thermodynamic system, in a given state, is defined as the maximum work that one can obtain by taken the system to its equilibrium state with the environment, in a reversible process. In a real process (irreversible), there is a loss of capability of the realization of work, which gives a measure of the irreversibility of the process.

The concept of *exergy*, originated from the First and Second Laws of the Thermodynamic, was first introduced by G. J. Gouy and A. Z. Stodola which have quantified the useful work lost in a thermodynamic process. Z. Rant published a paper using the word *exergy* for the first time. In the 70's and 80's, J. Szargut, T. A. Brzustowski and P. J. Golem adopted the term *exergy* and applied exergetic analysis in several works.

The exergetic analysis of a thermodynamic system consists, fundamentally, in the identification and quantification of the irreversibilities of the system, through the application of the input exergies and of the exit exergies (products and wastes) in the system and in the calculation of the system exergetic efficiency.

The exergetic analysis of a system allows to express the energetic limitations of different processes, such as technological, economical, environmental and social. R. U. Ayres, H. T. Odum, R. Georgescu, G. Wall and others extended the application of the exergetic analysis to such areas respectively.

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

O conceito de energia, elaborado nos séculos XVI a XVIII com a contribuição de Galileu Galilei, Isaac Newton e diversos outros pesquisadores, surgiu a partir da idéia de trabalho mecânico e, mais tarde, sua extensão foi feita ao calor com base nos conceitos da Termodinâmica [17]. Já no início do século XIX, com a revolução industrial, a imagem que se tinha era a de que a *energia* era um conceito físico associado ao de conversão de energia e acompanhado de uma lógica econômica ligada a máquinas, capital, organização do trabalho, produção e consumo formando a base inicial da reflexão sobre energia.

Os recursos energéticos foram, então, pensados como sendo ilimitados, inesgotáveis, desprovidos de qualquer influência da evolução da sociedade. Entretanto, na visão de Karl Marx, em “*O Capital*”, os processos de produção e de conversão de energia situam-se na junção de um duplo feixe de inter-relações: de um lado, o sistema de relações entre a sociedade e a natureza e, do outro, as relações de produção, que regem as relações sociedade - natureza.

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, tem-se que o aumento da energia de um sistema será a diferença entre o calor que ele recebe e o trabalho que realiza. A Primeira Lei da Termodinâmica indica uma relação entre trabalho, calor e as várias outras formas de energia, e é também chamada de *Lei da Conservação de Energia*, que é uma extensão do Princípio da Conservação de Energia Mecânica [23, 24].

Analisando somente a Primeira Lei da Termodinâmica, poderíamos inferir serem equivalentes várias formas de energia entre si; a equivalência de processos em que haja conversão de energia, de uma forma em outra, podendo ser revertido sem restrições; a não existência de limites da conversão de calor em trabalho; a indiferença nos sentidos das trocas de calor entre dois corpos a temperaturas diferentes.

Entretanto, há significativas diferenças entre as diversas formas de energia e entre os tipos de processo em que uma forma de energia é convertida em outra. Há limites para a conversão de calor em trabalho.

Se todo calor absorvido por uma máquina fosse convertido em trabalho, teríamos o caso ideal de rendimento 100%. Mas, evidências experimentais mostram que isso não é possível, o que constitui a Segunda Lei da Termodinâmica. A Segunda Lei da Termodinâmica pode ser expressa por dois importantes enunciados equivalentes [23, 24]:

- Enunciado de Clausius: “ *É impossível a passagem de calor de um corpo a baixa temperatura para outro a temperatura mais alta, apenas com a troca de calor, sem que outros efeitos sejam observados*”.
- Enunciado de Kelvin-Planck: “ *É impossível construir uma máquina térmica que, operando em um processo cíclico, extraia calor de um único reservatório de calor e o converta integralmente em trabalho*”.

Um ciclo ideal, chamado de ciclo de Carnot, para as máquinas térmicas, proposto pelo engenheiro francês Nicolas Sadi Carnot, constitui-se de duas transformações isotérmicas, intercaladas por duas transformações adiabáticas, recebendo calor (Q_1) de um reservatório¹ quente, em processo isotérmico, a temperatura mais elevada (T_1), e rejeitando calor (Q_2) para um reservatório frio (Q_2), em processo isotérmico, a temperatura mais baixa (T_2). Conforme a convenção, os trabalhos nas expansões do sistema são positivos e os trabalhos nas contrações são negativos.

Como o sistema volta ao seu estado inicial, não há variação de sua energia interna. Deduz-se então, a partir da Primeira Lei da Termodinâmica, que o trabalho útil é igual à diferença entre o calor recebido (Q_1) e o rejeitado (Q_2). Da definição de rendimento (ou eficiência) termodinâmica, tem-se que o rendimento de uma máquina térmica (η) é a razão entre o

¹ Definem-se reservatórios de calor como fontes de calor cujas capacidades caloríficas são suficientemente grandes de tal forma que os mesmos não sofram mudanças perceptíveis de temperatura quando trocam (cedem ou recebem) calor com o sistema.

trabalho útil e a quantidade de calor recebida do reservatório quente: $\eta = 1 - Q_1/Q_2$. Carnot também demonstrou que o máximo rendimento possível entre temperaturas do reservatório quente (T_1) e do reservatório frio (T_2), sendo $T_1 > T_2$, depende exclusivamente dessas temperaturas, isto é: $\eta = 1 - T_2/T_1$ [23, 24].

Há várias limitações na conversão das diferentes formas de energia em trabalho. O principal fator destas limitações são as irreversibilidades, ligadas aos processos irreversíveis², tais como atrito, viscosidade, resistência elétrica, inércia dos fluidos, etc. As irreversibilidades são inevitáveis e transformam parte da energia mecânica em calor. Em particular, a conversão de calor em trabalho sofre limitações ainda mais graves, descritas pela Segunda Lei da Termodinâmica, resultando na assimetria da transmissão de calor

A eficiência da Primeira Lei da Termodinâmica, não leva em consideração as limitações, não nos informa corretamente sobre como comparar diferentes recursos energéticos, cada um com sua própria tecnologia de conversão, dificultando ou até mesmo impedindo a análise do desempenho dos sistemas conversores

Então, quando se utiliza de recursos energéticos para obtenção de energia de outra forma usa-se um conversor de energia como uma usina hidrelétrica, uma usina termelétrica ou um motor de combustão interna. Em todos estes processos a quantidade de energia útil (aproveitável) é sempre inferior à quantidade de energia que entra no conversor. Assim, o rendimento energético é sempre menor do que um.

Da Segunda Lei da Termodinâmica origina-se o conceito de outra propriedade termodinâmica do sistema, que varia com a ocorrência de processos, a entropia (S). Como consequência direta da Segunda Lei da Termodinâmica, tem-se a desigualdade de Clausius, que estabelece limites para a soma dos quocientes entre os calores trocados e as respectivas

² Processo irreversível é aquele que ocorre de tal modo que, na conclusão do processo, tanto o sistema como a vizinhança não podem ser reintegrados aos estados iniciais. Este processo é considerado real e há perda de trabalho útil provocado, por exemplo, por atrito e pela viscosidade.

Processo reversível é aquele que ocorre de tal modo que, na conclusão do processo, tanto o sistema como a vizinhança podem ser reintegrados aos seus estados iniciais, sem produzir qualquer variação no resto do universo. Este processo é considerado ideal e não há perda de trabalho útil.

temperaturas das fontes de calor para um sistema aberto³ operando em um processo cíclico entre várias fontes de calor. O enunciado da Desigualdade de Clausius pode ser formulado como: “*A integral cíclica da razão entre os calores trocados por um sistema, e as respectivas temperaturas das fontes é sempre menor ou igual a zero*”. A igualdade é válida para processos reversíveis e a desigualdade é válida para processos irreversíveis.

Além disto, como estabelecido pela Primeira Lei da Termodinâmica, na conversão de calor em trabalho, o calor recebido de uma fonte quente (positivo) é maior, em módulo, do que o rejeitado para uma fonte fria (negativo). Tem-se, assim, que “*A integral cíclica dos calores trocados por um sistema é sempre maior ou igual a zero*”, sendo, como anteriormente descrito, a igualdade válida para processos reversíveis e a desigualdade válida para processos irreversíveis.

A propriedade termodinâmica, denominada entropia por Clausius, é amplamente utilizada devido a sua estreita relação com a Segunda Lei da Termodinâmica. É importante compreender que, somente uma variação de entropia é definida, e não uma entropia absoluta. A variação da entropia de um sistema em um processo é maior ou igual ao quociente entre quantidade de calor trocada entre o sistema e a vizinhança (meio ambiente) e a temperatura absoluta do sistema ($dS \geq \delta Q/T$). A igualdade é válida para processos reversíveis e a desigualdade é válida para processos irreversíveis.

A “*exergia*” do sistema, conceito que resulta da combinação da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, é definida como o trabalho máximo obtido, levando-se um sistema termodinâmico de um dado estado para o outro estado de equilíbrio com o ambiente, em um processo reversível. Na realidade os processos reais são irreversíveis e há uma quantidade de trabalho não realizável que fornece uma medida das irreversibilidades do sistema. Verifica-se que esta quantidade de trabalho não realizável está diretamente ligada à qualidade da energia e sua análise, isto é, a análise exergética do sistema, oferece

³ Aplica-se igualmente a sistema fechado, como a máquina de vapor.

instrumental para avaliar e comparar diferentes processos de extração, produção e uso dos recursos naturais, em particular, dos recursos energéticos.

A partir da Desigualdade de Clausius conceitua-se o princípio do aumento da entropia: há um sentido único para a ocorrência de processos. A do crescimento da entropia do universo. Pode-se ver que o problema com o qual a humanidade se confronta não é o de conservação da energia, dado o princípio de conservação, mas o de uma certa conservação da qualidade de energia, ou seja, da capacidade de realizar trabalho útil. Com isto, o conceito de exergia, que está associado ao da qualidade da energia, fornece os fundamentos para uma política consistente de planejamento energético e para utilização dos recursos naturais de uma maneira mais racional.

A sociedade vem enfrentando, cada vez mais, o problema de escassez de recursos naturais e, em particular, de recursos energéticos, além dos impactos ambientais ocasionados pela extração, produção e uso desses recursos. Os processos de produção obedecem ao princípio do aumento da entropia, ou seja, utilizam processos irreversíveis, que são alimentados por recursos naturais e/ou energéticos de baixa entropia, devolvendo-os ao meio na forma de produtos e rejeitos, com alta entropia.

Apesar das melhorias na eficiência energética e dos avanços tecnológicos impulsionados pelas crises do petróleo de 1973 e 1979, o consumo de petróleo (principal recurso energético não-renovável) vem aumentando, juntamente com a diminuição da descoberta de novas reservas deste recurso energético. Este problema, relacionado ao de suprimento energético, será mais acentuado nos países subdesenvolvidos, devido às necessidades de evolução em suas estruturas sócio-econômicas, objetivando atingir níveis de energia per-capita (consumo de energia/habitante) próximos daqueles dos países desenvolvidos. As duas crises de petróleo desestabilizaram estruturas sócio-econômicas dependentes de recursos energéticos de origem fóssil (petróleo, carvão e gás mineral) para a produção industrial, transporte, geração de energia elétrica, etc. Especialistas apontam que em menos do que 20 anos a produção de petróleo vai declinar devido à exaustão das reservas. Além do mais, a tendência de destruição do meio ambiente pelo modelo de produção capitalista,

devido ao uso intensivo de combustíveis fósseis, contribui para a elevação das emissões de poluentes atmosféricos, como material particulado, dióxido de enxofre (SO₂), óxido de nitrogênio (NO_x), responsáveis pelas chuvas ácidas, e dióxido de carbono (CO₂), principal causador do efeito estufa. Entretanto, o que é mais aflitivo é o aumento do consumo energético mundial, que contribui, ainda mais, com o processo de entropização do planeta, ou seja, sua degradação ambiental [22].

Há necessidade de transformações energéticas urgentes, tais como a estabilização ou, se possível a diminuição do consumo de petróleo e gás natural, definição das fontes energéticas que irão gradativamente substituir estes recursos energéticos, uma maior participação da utilização da energia solar direta (energia fotovoltaica e termosolar) para a geração de energia elétrica e para aquecimento, ou indireta (hídrica, eólica e biomassa vegetal). É preciso estimular o uso da biomassa energética em substituição a combustíveis de origem fósseis, sem provocar o aumento do desmatamento natural, e uma maior participação de energias renováveis, de acordo com os recursos disponíveis em cada região, principalmente nos países subdesenvolvidos como o Brasil, além da utilização de sistemas híbridos de diversas fontes de energia na geração de energia elétrica como hídrico + eólica, hídrico + solar, etc., utilização de rejeitos agrícolas e florestais, do lixo urbano para produção de combustíveis líquidos, gasosos e para geração de vapor, etc [18–20].

Na verdade, uma coisa é certa: a era solar tenderá a ser mais descentralizada e diversificada. Entretanto, como se sabe, grande parte das tecnologias já se encontram a disposição, mas para que ocorra uma transição no campo da energia será necessário contar com muita vontade política [19].

Portanto, a Análise Exergética, fundamentada no conceito de “*exergia*”, tal como a praticada por J. Szargut, R. U. Ayres, H. T. Odum, G. Wall e vários outros ecologistas, biólogos, engenheiros, economistas, etc. , fornece uma ferramenta poderosa para a análise de processos tecnológicos, ambientais, econômicos, sociais, etc., para a avaliação dos danos

provocados ao meio ambiente proveniente dos rejeitos e para quantificação da eficiência, do ponto de vista exergético, destes processos.

Capítulo 2 – CONCEITOS DE TERMODINÂMICA

2.1 – LEI DE GOUY-STODOLA [5, 21, 22]

A Primeira Lei da Termodinâmica pode ser enunciada como:

“A variação líquida da energia de um sistema fechado¹ é igual à diferença entre o calor que ele recebe e o trabalho que ele realiza”.

Ela pode ser expressa pela equação:

$$\Delta E = Q - W \quad (2.1)$$

em que:

ΔE = variação líquida da energia do sistema;

Q = calor recebido pelo sistema e

W = trabalho realizado pelo sistema.

Levando em conta que a energia total (E) de um sistema inclui a energia cinética, devido ao movimento, a energia potencial gravitacional e a energia interna, tem-se, num processo infinitesimal:

$$dQ = dU + d\left(\frac{mv^2}{2}\right) + d(mgZ) + dW \quad (2.2)$$

onde:

¹ Sistema é uma coleção de elementos (partículas, substâncias, pessoas, etc.) que é o objeto de observação. O sistema distingue-se do restante do universo, ou de sua vizinhança (ou ambiente) por uma fronteira materializada (por exemplo, paredes), ou idealizada. O sistema é isolado, se não troca matéria, nem energia com a vizinhança. O sistema é fechado, se troca apenas energia com a vizinhança. O sistema é aberto, se troca matéria e energia com a vizinhança.

$dU =$ quantidade infinitesimal de energia interna²;

$\delta Q =$ quantidade infinitesimal de calor³;

$d(m \cdot v^2/2) =$ quantidade infinitesimal de energia cinética;

$d(m \cdot g \cdot Z) =$ quantidade infinitesimal de energia potencial gravitacional;

$\delta W =$ quantidade infinitesimal de trabalho;

$m =$ massa;

$v =$ velocidade;

$g =$ aceleração da gravidade.

Desprezando a variação de energia cinética e de energia potencial gravitacional, tem-se:

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (2.3)$$

De acordo com Desigualdade de Clausius, para processos reversíveis, tem-se:

$$dS_0 = \frac{dQ_0}{T_0} = T_0 \cdot dS_0 \quad (2.4)$$

onde:

$dS_0 =$ variação infinitesimal de entropia do ambiente;

$\delta Q_0 =$ variação infinitesimal de calor do ambiente e

$T_0 =$ temperatura ambiente.

² A energia interna (U) só depende do estado do sistema, ou das coordenadas termodinâmicas é, portanto, uma diferencial exata macroscopicamente, mas não atômicamente. Para um gás perfeito, a energia interna só depende da temperatura, que, por sua vez, está diretamente relacionada com a energia cinética das moléculas.

³ É importante lembrar que calor e trabalho não são uma propriedade do sistema e sim uma característica de um processo imposto ao sistema. A quantidade infinitesimal de calor (δQ) e uma quantidade infinitesimal de trabalho (δW), não são, portanto, diferenciais exata.

Do Princípio de Conservação da Energia, tem-se:

$$\delta Q_0 + \delta Q = 0 \therefore \delta Q = -\delta Q_0 \quad (2.5)$$

onde:

δQ_0 = quantidade infinitesimal de calor cedido pelo ambiente (ou vizinhança) e

δQ = quantidade infinitesimal de calor recebido pelo sistema.

Combinando as expressões 2.4 e 2.5, chega-se a:

$$\delta Q = -T_0 \cdot dS_0 \quad (2.6)$$

Consideremos um sistema termodinâmico, à temperatura T , trocando uma quantidade de calor δQ com a vizinhança (o meio ambiente) à temperatura T_0 (por exemplo, $T < T_0$). A entropia do sistema e da vizinhança variam de dS e dS_0 respectivamente; então, a variação da entropia do sistema somada à variação da entropia da vizinhança corresponde a $d\sigma$, a variação total de entropia no processo. Então, tem-se:

$$d\sigma = dS + dS_0 \quad (2.7)$$

Considerando-se que o calor trocado entre o sistema (δQ) e a vizinhança (δQ_0) têm o mesmo valor absoluto e sinais contrários, ou seja, $\delta Q + \delta Q_0 = 0 \therefore \delta Q_0 = -\delta Q$ (Princípio de Conservação da Energia) e lembrando que, por convenção, quando um sistema absorve calor a quantidade de calor é positiva ($\delta Q > 0$) e quando libera calor a quantidade de calor é negativa ($\delta Q < 0$) e, além disso, conforme a Desigualdade de Clausius, a variação de entropia do sistema e do ambiente num processo qualquer podem ser expressas por:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (2.8)$$

$$dS_0 \geq \frac{\delta Q_0}{T_0} \therefore dS_0 \geq \frac{\delta Q}{T_0} \quad (2.9)$$

Então, somando-se a variação de entropia do sistema (dS) com a variação de entropia do ambiente (dS_0), e utilizando a expressão 2.7, tem-se :

$$dS + dS_0 \geq \delta Q_0 \cdot (1/T - 1/T_0) \therefore d\sigma \geq \delta Q_0 \cdot (1/T - 1/T_0) \quad (2.10)$$

Observando-se a expressão 2.10, verifica-se que para $T < T_0$, tanto δQ como $(1/T - 1/T_0)$ são positivos e o produto do segundo membro da desigualdade será positivo; e para $T > T_0$ tanto δQ como $(1/T - 1/T_0)$ são negativos e o produto do segundo membro da desigualdade será positivo. Por isso, pode-se afirmar que, em todo processo, a entropia total ($d\sigma$), isto é, a entropia do sistema mais a da vizinhança, cresce, ou seja:

$$d\sigma \geq 0 \therefore dS + dS_0 \geq 0 \quad (2.11)$$

Disto decorre o Princípio de Aumento da Entropia, que pode ser enunciado como:

“O único sentido possível para a ocorrência dos processos termodinâmicos é o do crescimento da entropia do universo”.

Portanto, um sistema só pode ter a sua entropia reduzida às custas da elevação da entropia da vizinhança (do meio ambiente), pois a variação total é sempre positiva. Em outras palavras, a ordem do sistema é obtida através da desordem do meio ambiente, sendo:

$d\sigma = 0$, se o processo é reversível (ideal) e

$d\sigma > 0$, se o processo é irreversível (real)

Utilizando a expressão 2.3 da Primeira Lei da Termodinâmica, e as expressões 2.5 e 2.6, obtém-se:

$$\delta W = -T_0 \cdot dS_0 - dU = -T_0 \cdot (d\sigma - dS) - dU \quad (2.12)$$

Caso o processo seja reversível ($d\sigma = 0$), tem-se:

$$\delta W_{\text{Rev}} = T_0 \cdot dS - dU \quad (2.13)$$

Caso contrário, se o processo considerado for irreversível ($d\sigma > 0$), obtém-se:

$$\delta W_{\text{Irrev}} = T_0 \cdot dS - T_0 \cdot d\sigma - dU \quad (2.14)$$

Partindo-se das expressões 2.13 e 2.14, chega-se à expressão 2.15, que corresponde à expressão geral da Lei de Gouy-Stodola e que pode ser enunciada como:

“A perda de trabalho em um processo qualquer é igual ao produto da soma algébrica das variações da entropia do sistema e do ambiente pela temperatura do ambiente (ou da vizinhança)”.

$$\delta W_{\text{Rev}} - \delta W_{\text{Irrev}} = T_0 \cdot d\sigma \therefore \delta W_{\text{Rev}} - \delta W_{\text{Irrev}} = T_0 \cdot (dS + dS_0) \quad (2.15)$$

A existência de irreversibilidade interna num sistema, caracterizada por processos irreversíveis internos, tais como o atrito e a viscosidade, e de irreversibilidade externa, caracterizada por processos irreversíveis externos ao sistema, como troca de calor com uma variação de temperatura finita, leva a uma perda da capacidade de realização de trabalho.

Conforme Brzustowki [5], várias são as denominações dadas à perda de trabalho ($\delta W_{\text{Rev}} - \delta W_{\text{Irrev}}$) pelos autores que se dedicaram ao seu estudo, entre eles: Tribus e Dengibh chamaram de *“Dissipação”*; Keenan chamou de *“Irreversibilidade”*; Gaggioli chamou de *“Perda de Disponibilidade”* e Haywood de *“Perda de Trabalho”*.

2.2 – O CONCEITO DE EXERGIA [21, 22, 29]

A Lei de Gouy-Stodola permite afirmar que o trabalho realizado em um processo reversível entre dois estados de equilíbrio (inicial e final) é maior do que o trabalho realizado em um processo irreversível entre os mesmos estados, ou seja, $W_{Rev} > W_{Irrev}$. A diferença entre o trabalho realizado em um processo reversível entre dois estados de equilíbrio (inicial e final) e o trabalho realizado em um processo irreversível entre os mesmos estados, permite quantificar as irreversibilidades do sistema.

Voltando à Primeira Lei da Termodinâmica para um sistema fechado (expressão 2.3), tem-se:

$$dU = \delta Q - \delta W = \delta Q - (\delta W_u + \delta W_{amb}) \quad (2.16)$$

onde:

δW_u = trabalho útil realizado pelo sistema e

δW_{amb} = trabalho realizado sobre a vizinhança (expansões e contrações do sistema).

Para um processo reversível, onde T_0 é a temperatura ambiente e p_0 a pressão ambiente (vizinhança), e lembrando-se que realizado o equilíbrio entre o sistema e a vizinhança, a possibilidade de transformação de calor em trabalho desaparece, visto que a irreversibilidade interna do processo, devido à diferença finita de temperatura, passa a não existir mais, e utilizando as expressões 2.5, 2.6 e 2.16, tem-se:

$$\delta W_u = dW_{u,Rev} = T_0 \cdot dS - dU - d(p_0 \cdot V) = d(T_0 \cdot S - U - p_0 \cdot V) \quad (2.17)$$

Levando-se o sistema reversivelmente de um estado qualquer ao estado de equilíbrio com o ambiente, ou seja, integrando-se a equação 2.17 entre um estado de equilíbrio inicial e um estado de equilíbrio final, chega-se à expressão:

$$\begin{aligned} W_{u,Rev} &= \int_1^0 d(T_0 \cdot S - U - p_0 \cdot V) = (T_0 \cdot S_0 - U_0 - p_0 \cdot V_0) - (T_0 \cdot S_1 - U_1 - p_0 \cdot V_1) \\ W_{u,Rev} &= (U_1 - T_0 \cdot S_1 + p_0 \cdot V_1) - (U_0 - T_0 \cdot S_0 + p_0 \cdot V_0) = -DB \end{aligned} \quad (2.18)$$

A função $B = U - T_0.S + p_0.V$, é chamada de função "disponibilidade energética" ou "exergia", que pode ser definida como:

“Exergia de um sistema termodinâmico fechado, em um dado estado, é o trabalho máximo que se pode extrair deste sistema, conduzindo-o ao estado de equilíbrio com o ambiente, por meio de processos reversíveis”.

Outras definições de exergia incluem:

- Exergia é a parte da energia que pode ser completamente convertida em qualquer outra forma de energia [3, 30].
- Exergia é o padrão de qualidade de energia igual ao máximo trabalho que pode ser obtido de uma dada "forma de energia", utilizando os parâmetros do ambiente (p_0 , T_0 , μ_{i0} ⁴, etc...) como aqueles do estado de referência [30].
- Exergia é a propriedade de um sistema que quantifica o máximo de trabalho útil que pode ser obtido quando, interagindo unicamente com o ambiente (p_0 , T_0 , μ_{i0} , etc...), o sistema passa de seu estado termodinâmico inicial ao estado permanente (de equilíbrio com o ambiente) [30].
- Exergia é o mínimo trabalho técnico necessário para constituir um sistema, a partir do ambiente de referência [30].

Então, com base na definição de exergia, pode-se escrever:

$$W_{u,Rev} = W_{u,máx} = -\Delta B = B_i - B_0 \quad (2.19)$$

Sendo:

⁴ μ_{i0} – Potencial químico da espécie i. Ver seção 2.3

B_i = exergia do estado inicial e

B_0 = exergia do estado final (estado de equilíbrio com o ambiente)

Várias formas de energia apresentam diferentes qualidades. A capacidade de realizar trabalho tem sido aceita, em termodinâmica, como uma medida da qualidade da energia. De modo a encontrar o nível de referência correto dessa função, deve-se levar em consideração o papel da natureza envolvente na realização de processos energéticos. Toda atividade humana e a própria manutenção da existência humana são possíveis graças à utilização dos recursos naturais. Esses recursos naturais são formas de matéria que, em sua composição química e/ou parâmetros de estado, diferem de maneira distinta dos valores médios encontrados na natureza. Os parâmetros de estado e a composição destes componentes comuns na natureza devem, portanto, ser aceitos como o nível de referência zero na avaliação da utilidade prática da energia, tanto dos recursos naturais quanto dos vetores de energia produzidos industrialmente. A capacidade de realizar trabalho, calculada em relação ao nível zero acima dito, é a "*exergia*"

Ao contrário da energia, a *exergia* é isenta da lei de conservação. Todo o fenômeno irreversível provoca perdas de exergia, contribuindo para a redução dos efeitos úteis do processo ou para um aumento do consumo de potência motriz. A exergia é proporcional ao potencial de produção de entropia, mas tem unidades de energia.

2.3 - SISTEMAS REATIVOS

Um sistema termodinâmico que contenha substâncias químicas diferentes, pode ser sede de reações químicas. Se o sistema for fechado, as reações químicas ocorrem até que as substâncias químicas constituintes do sistema atinjam o estado de estabilidade máxima, ou

seja, até que a entropia atinja o valor máximo compatível com a energia interna e o número de partículas contidas no sistema.

As equações desenvolvidas até este ponto não levaram em consideração o aspecto das reações químicas. Portanto, é necessário incluir um termo que descreva a evolução do sistema através das reações químicas para completar a conceito de exergia. J. W. Gibbs propôs a inclusão deste termo na expressão de energia interna que contém as características químicas do sistema [5, 22].

Então, a equação de Conservação de Energia para um processo infinitesimal reversível torna-se:

$$dU = dQ - dW + d\left(\sum_i \mu_i \cdot n_i\right) \text{ ou} \\ dU = dQ - dW + \sum_i \mu_i \cdot dn_i \quad (2.20)$$

onde:

μ_i = parâmetro químico para a espécie i (potencial químico) e

n_i = número de moléculas da espécie i .

Para conduzir o sistema reativo ao estado de equilíbrio com a vizinhança, considera-se a seqüência de processos reversíveis cujo estado final corresponde ao equilíbrio térmico ($T=T_0$), mecânico ($p = p_0$) e químico ($\mu_i = \mu_{i,0}$) com a vizinhança. A seqüência proposta por Brzustowski & Golem [5] é mostrada na Figura 2.1.

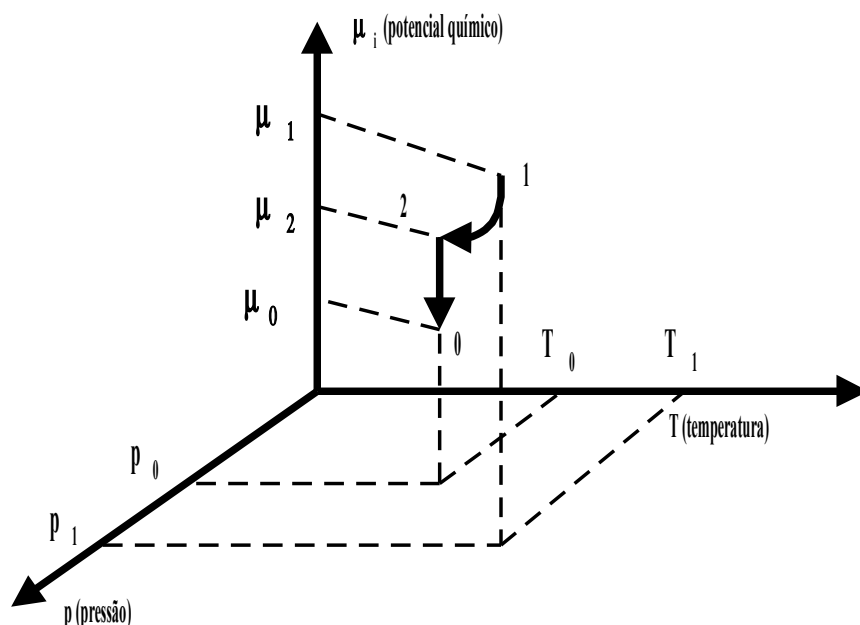


FIGURA 2.1 – Processo Reversível Utilizado para o Cálculo da Exergia – Espaço de Fase μ_i , T e p.

O primeiro processo (1→2) leva o sistema ao equilíbrio térmico ($T = T_0$), mecânico ($p = p_0$) e químico ($\mu_i = \mu_0$) com a vizinhança. Neste caso, supõe-se que a composição do sistema não se altera no processo. Para este processo, vale a equação, já deduzida, 2.18:

$$W_{u,Rev} = (U_1 - T_0 \cdot S_1 + p_0 \cdot V_1) - (U_0 - T_0 \cdot S_0 + p_0 \cdot V_0)$$

O segundo processo (2→0) é isobárico e isotérmico (o sistema já está em equilíbrio térmico ($T_2 = T_0$) e mecânico ($p_2 = p_0$) com a vizinhança). Neste processo as substâncias reagem entre si e com as substâncias reativas da vizinhança. Trata-se, pois de um sistema aberto que realiza sobre a vizinhança o trabalho de difusão, W_{dif} , com diminuição da energia química. Então, a equação de Conservação de Energia para um processo infinitesimal reversível torna-se:

$$dW_{dif} = -d\left(\sum_i m_i \cdot n_i\right) = -\sum_i m_i \cdot dn_i \quad (2.21)$$

Integrando a equação anterior, obtém-se:

$$W_{dif} = - \int_2^0 \sum_i m_i \cdot dn_i = - \sum_i \int_2^0 m_i \cdot dn_i = \sum_i (m_{i,0} - m_{i,2}) \cdot n_i \quad (2.22)$$

O diagrama a Figura 2.2 mostra o modo de se integrar sobre n_i entre os estado 2 e 0 da Figura 2.1.

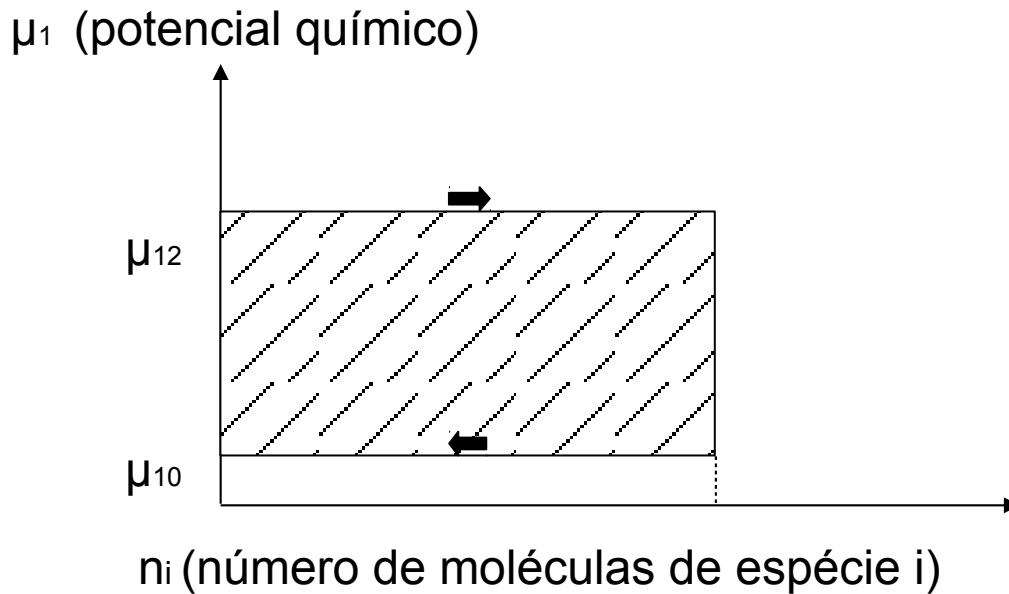


FIGURA 2.2 – Diagrama Mostrando a Integração do Trabalho de Difusão sobre o número de moléculas da espécie i, n_i.

Então, combinando as equações 2.18 e 2.23, obtém-se, para o sistema reativo, a expressão da exergia:

Onde se introduziu o conceito de entalpia: $H_0 = U + p_0 \cdot V$

$$B = H_0 - T_0 \cdot S - \sum_i (m_{i,0} \cdot n_i)$$

$$B = U - T_0 \cdot S + p_0 \cdot V - \sum_i (m_{i,0} \cdot n_i) \text{ ou} \quad (2.23)$$

2.4 – ANÁLISE EXERGÉTICA

A análise exergética de um sistema de produção, que troca matéria e energia com a vizinhança (sistema aberto), consiste em [29]:

- 1) Calcular as exergias de entrada (isto é, dos insumos) e de saída (dos produtos e rejeitos) e em se comparar a variação de exergia com a aquela que resultaria de um processo reversível (ideal), que tenha os mesmos estados extremos que os do processo real (irreversível) e, em seguida,

- 2) Estimar a eficiência exergética do sistema.

A análise exergética, permite também quantificar o grau de irreversibilidade do sistema de produção. Esta irreversibilidade está diretamente associada à dissipação da energia útil ocorrida no sistema, ou ao seu deslocamento de um processo reversível. Portanto, uma das formas de se medir a irreversibilidade de um processo seria pela diferença entre a variação da exergia do sistema e o trabalho efetivamente realizado.

As irreversibilidades dos processos ocorrem, por exemplo, devido a fenômenos de resistência ao movimento (atrito, viscosidade, inércia dos fluidos); são inevitáveis e transformam parte da energia mecânica em calor, sendo isto associado à geração de entropia, que pode permanecer no próprio sistema ou ser transferida para o meio. Ressalta-se que a produção de entropia implica a ocorrência de perda de trabalho útil e, portanto, de perda de *exergia*.

Na análise exergética, as variáveis relevantes são as contidas na expressão da exergia:

$\mathbf{B} = \mathbf{H}_0 - \mathbf{T}_0 \cdot \mathbf{S} + \sum \mu_i \cdot d\mathbf{n}_i$, a partir, do qual se calcula o trabalho útil máximo pela diferença entre a exergia do sistema no estado inicial e a exergia do sistema no estado de equilíbrio com o ambiente, isto é, $\mathbf{W}_{\text{máx}} = - \Delta \mathbf{B} = \mathbf{B}_0 - \mathbf{B}_i$, e o trabalho real (trabalho efetivamente

realizado) $W_{ef} = W_{m\acute{a}x} - I$, onde I representa o efeito das irreversibilidades interna e externa na conversão de entalpia em trabalho e calor [29].

A entalpia (H) e a entropia (S) dos elementos químicos e de diversas substâncias presentes no ambiente estão tabeladas em manuais de físico-química para as condições normais ambientais de temperatura e pressão ($T_0 = 298,15$ K e $p_0 = 101,325$ kPa). Partindo destes dados e da composição da matéria que entra e sai do processo de produção, é possível teoricamente calcular os valores efetivos de H e S , desde que as propriedades das substâncias sejam conhecidas e que se conheça um processo reversível ligando o sistema no estado inicial ao estado final, nas condições normais ambientais de temperatura e pressão.

Um sistema de produção, para os propósitos da análise exergética, é o conjunto de máquinas, equipamentos, instalações, etc., e dos conhecimentos necessários para transformar a matéria prima em produtos.

Este sistema é aberto, trocando matéria e energia com a vizinhança que é, por definição, o universo menos o sistema. Para limitar a extensão da vizinhança, viabilizando a aplicação do modelo, procura-se identificar as variáveis relevantes e tratá-las como condições de fronteira. À primeira vista pareceria adequado considerar apenas o impacto relacionado com a energia rejeitada para o ambiente sob a forma de calor, mas há várias razões que invalidam este modelo:

- Os rejeitos contêm, além de calor, substâncias que podem reagir de diferentes modos com os materiais e organismos da biosfera, acarretando modificações quase sempre danosas ao equilíbrio dinâmico desta.
- Parte da energia mecânica empregada na produção é aplicada na vizinhança (mineração, transporte, etc...). Além disto, a fração efetivamente aplicada sobre a matéria em transformação é convertida parcialmente em calor por fenômenos de resistência passiva (atrito, viscosidade, etc...).

- A biosfera tem certa capacidade de absorver perturbações que, em última análise, dependem da natureza do equilíbrio existente. O equilíbrio estável é restabelecido com o desaparecimento da perturbação. Se o equilíbrio for instável, perturbações além de certa amplitude implicam o afastamento definitivo do equilíbrio. Por exemplo, em um ecossistema em equilíbrio, se uma das espécies concorrentes for especialmente sensível a certa perturbação, a redução da população aquém de um certo patamar compromete sua capacidade de reprodução e, então, o próprio ambiente poderá extinguí-la.

O principal objetivo da análise exérgica é detectar e avaliar quantitativamente o efeito de fenômenos irreversíveis que aumentam a imperfeição termodinâmica dos processos considerados. A análise exérgica fornece informação concernente às possibilidades de aperfeiçoar processos termodinâmicos, mas somente a análise econômica decide se a realização de tais aperfeiçoamentos é razoável ou não.

De posse da eficiência exérgica, podem ser propostas várias modificações do sistema de produção visando a aumentá-la. Como consequência, haverá redução dos insumos, com diminuição da extração de recursos energéticos, levando à diminuição dos rejeitos industriais, minimizando, desta forma, a degradação ambiental e deixando mais recursos naturais e/ou energéticos para aproveitamento das gerações futuras.

Pode-se comparar vários métodos de extração de recursos naturais e/ou energéticos, diversos processos de produção e formas de tratamento de rejeitos, levando em consideração aspectos relacionados à degradação ambiental e à qualidade de vida e, por fim, demonstrar qual o mais eficiente do ponto de vista exérgico.

Como consequência de um aumento procurado da eficiência exérgica, por melhoria do processo, a indústria poderá ter menores gastos com equipamentos de controle de poluentes, menores taxas de poluição ambiental, menor utilização de mão-de-obra, menor

consumo de energia (elétrica e/ou térmica) e menor depreciação de equipamento. Além disto, é possível se obter um produto final com a mesma qualidade ou, até mesmo melhor.

2.4.1 – EFICIÊNCIA EXERGÉTICA [4, 21, 30-31]

Como a exergia é isenta da lei de Conservação de Energia, para se fechar um balanço exergético de um sistema aberto, introduz-se um termo chamado de perda de exergia, δB . Então podemos escrever:

$$B_d = \Delta B_s + B_a + \Sigma \Delta B_q + W + \delta B \quad (2.29)$$

onde:

B_d = exergia dos insumos (matéria fornecidas ao sistema);

B_a = exergia dos produtos (matéria retirada do sistema);

ΔB_s = variação da exergia do sistema;

ΔB_q = variação da fonte de calor em contato com o sistema;

W = trabalho útil realizado pelo sistema e

δB = perda de exergia interna devido às irreversibilidades internas do sistema.

O decréscimo de exergia da fonte de calor pode ser expresso como o trabalho realizado pelo ciclo de Carnot (processo reversível), que utiliza o ambiente como a fonte fria. Então:

$$DB_q = -Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.30)$$

onde:

Q = calor fornecido pela fonte de calor ao sistema;

T = temperatura da fonte de calor e

T_0 = temperatura ambiente.

Para um processo em estado estacionário (regime permanente), na qual os parâmetros térmicos, velocidades de escoamento e composição química permanecem constantes em todos os pontos, não há variação da exergia do sistema, $\Delta B_s = 0$, e o balanço exergético por unidade de tempo é dado por:

$$\mathbf{B_d} = \mathbf{B_a} + \Sigma \mathbf{B_q} + \mathbf{W} + \delta \mathbf{B} \quad (2.31)$$

A exergia dos produtos, B_a , é composta da exergia dos produtos úteis, B_{au} , e da exergia dos rejeitos, B_{aw} , sendo que a exergia dos rejeitos representa a perda de exergia externa, δB_{ex} .

$$\mathbf{B_a} = \mathbf{B_{au}} + \mathbf{B_{aw}} = \mathbf{B_{au}} + \delta \mathbf{B_{ex}} \quad (2.32)$$

No balanço exergético, a exergia dos insumos deve ser alocada em um dos seguintes grupos:

- Exergia dos produtos e co-produtos,
- Perdas exergéticas ou
- Exergia de alimentação.

A razão η_p , denominada *grau cumulativo de perfeição* [4], é definida como a razão entre a exergia dos produtos úteis, que expressa a exergia fornecida ao sistema operando em estado estacionário, e a exergia de alimentação:

$$\eta_p = \frac{\mathbf{Exergia\ dos\ produtos\ \u00fas\ teis}}{\mathbf{Exergia\ de\ alimenta\u00e7\u00e3o}} \quad (2.33)$$

η_p pode, então, ser expresso da seguinte forma:

$$h_p = \frac{B_{au} + \sum DB_{qu} + W_u + B_{seu}}{B_d - \sum DB_{qf} - W_f + B_{sb}} \quad (2.34)$$

Sendo:

B_{au} = exergia dos produtos úteis;

ΔB_{qu} = aumento da exergia da fonte de calor;

W_u = trabalho útil no eixo realizado;

B_{seu} = exergia final do sistema;

$-\Delta B_{qf}$ = decréscimo de exergia da fonte de calor ($-\Delta B_{qf} > 0$);

$-W_f$ = trabalho no eixo empregado ($-W_f > 0$);

B_{sb} = exergia inicial do sistema.

O desempenho de alguns processos, especialmente dos processos térmicos, pode ser medido por η_B , denominado *rendimento*, *eficácia* ou *eficiência exergética*, e definido como:

$$h_B = \frac{\text{Exergia útil produzida}}{\text{Consumo de exergia}} \text{ ou } h_B = 1 - (\text{Perdas exergéticas internas e externas}) \quad (2.35)$$

$$\eta_B = \frac{\sum \text{Exergia de saída}}{\sum \text{Exergia de entrada}} \quad (2.36)$$

Então, η_B pode ser expresso por:

$$h_B = \frac{B_{au} - B_{dn} + \sum DB_{qu} + W_u + DB_{su}}{B_{df} - \sum DB_{qf} - W_f} \quad (2.37)$$

Em que:

B_{dn} = exergia das matérias primas não energéticas empregadas (dos insumos);

B_{df} = exergia dos materiais combustíveis fornecidos;

ΔB_{au} = aumento utilizável da exergia do sistema.

Szargut et tal [4] recomenda, geralmente, o uso de η_p (grau cumulativo de perfeição) para processos químicos. Para processos térmicos a eficiência exergética η_B , correspondente à expressão 2.35, é recomendada para medição da perfeição termodinâmica. Na definição de η_B , a exergia das matérias primas não energéticas empregadas no processo não é considerada como integrante da exergia acionadora (B_{df}) e é subtraída da exergia dos produtos úteis na obtenção do efeito útil do processo (B_{au}).

η_B , correspondente à expressão 2.35, também é recomendado, para processos puramente dissipativos, por exemplo, válvula de expansão ou válvula redutora de pressão, e η_B , correspondente à expressão 2.36, é recomendado para o cálculo da eficiência exergética de máquinas térmicas simples, que interagem com o ambiente, e que pode ser calculado como a razão entre o rendimento energético real (η_{en}) e o ideal (η_{carnot}):

$$h_{ex} = \frac{h_{en}}{h_{carnot}} = \frac{h_{en}}{(h_{en})_{max}} \quad (2.38)$$

Capítulo 3 - RESERVAS E JAZIDAS URANÍFERAS BRASILEIRAS

3.1 – RECURSOS E RESERVAS URANÍFERAS [27, 28]

Recursos são concentrações de materiais sólidos, líquidos ou gasosos encontrados na natureza, seja na crosta terrestre ou sobre ela, cuja extração é atual ou potencialmente econômica. Os recursos podem ser classificados como identificados e não descobertos.

- **Recursos Identificados:** são recursos para os quais a localização, o grau, a qualidade e a quantificação são conhecidos ou estimados a partir de evidência geológica específica.
- **Recursos Não Descobertos:** são recursos cuja existência é apenas postulada, ou seja, que não foi evidenciada nem demonstrada, compreendendo depósitos que estão separados dos recursos identificados.

As reservas são aquela parte da base dos Recursos que pode vir a ser economicamente extraída ou produzida na época de sua determinação. As reservas classificam-se como: Reserva Razoavelmente Assegurada, subdividida em Reserva Medida e Reserva Indicada, e Recursos Adicionais Estimados ou Reserva Inferida

- **Reserva Medida (Provada):** refere-se aos depósitos uraníferos interceptados e pesquisados por furos de sondagem, por galerias e outros processos de amostragem, com espaçamento entre sondagens suficientemente cerrado. Esta reserva é realmente conhecida e tem os principais parâmetros (características geológicas, tamanho, forma, densidade e teores) bem definidos.
- **Reserva Indicada (Possível):** é quantificada através de uma malha de sondagem ou espaçamento de informações que fornecem razoáveis indicações da continuidade, características geológicas, tamanho, forma, densidade e teores do depósito, porém não são suficientes nem adequadas para assegurar a continuidade ou para provar o nível de

confiabilidade exigido para determinação da reserva medida. O depósito pode ter sido pesquisado com baixa densidade de sondagens ou a complexidade do modelo geológico dificulta a precisão.

- **Reserva Inferida:** é aquela reserva adicional medida e indicada a ser eventualmente adicionada a campos conhecidos, por meio de extensões e revisões.

3.2 – RESERVAS E PRODUÇÃO BRASILEIRA [32-39]

A necessidade de depender cada vez menos de fornecedores externos, para suprir as necessidades de energia, explica a decisão do Brasil de comprometer recursos e se dedicar à execução de um programa nuclear que abrange o domínio do ciclo do combustível nuclear. Neste programa foi instalado o Complexo Industrial de Poços de Caldas, MG, hoje, Complexo Industrial da INB (Indústrias Nacionais Brasileiras), Unidade de Poços de Caldas, MG, para mineração e produção de “yellow cake”[55].

O Brasil, hoje, possui a 6ª reserva mundial de urânio na classe Razoavelmente Assegurada (Medida/Indicada) e a 3ª reserva na classe Recursos Adicionais estimados (Inferida). O Brasil possui, atualmente, cerca de 310.000 toneladas de U_3O_8 [32].

As Reservas Brasileiras estão distribuídas, em toneladas de U_3O_8 , conforme a Tabela 3.1. A localização destas reservas é mostrada na Figura 3.1 [32].

TABELA 3.1 – Distribuição das Reservas Uraníferas Brasileiras em toneladas de U_3O_8

Ocorrência	Classificação da Reserva (t U_3O_8)		Total (t U_3O_8)
	Jazida	Medida e Indicada	
POÇOS DE CALDAS (MG)	500 t	4.500 t	4.500 t
ITATAIA (CE)	94.000 t	6.770 t	100.770 t
LAGOA REAL (BA)	83.000 t	59.500 t	142.500 t
OUTRAS*	-	61.600 t	61.600 t
TOTAL	177.500 t	131.870 t	309.370 t

* Rio Cristalino (PA), Amarinópolis (GO), Rio Preto/Campos Belos (TO), Quadrilátero Ferrífero/Gandarela (MG), Figueira (PR) e Espinharas (PB). Fonte: Matos [32]

FIGURA 3.1 – Localização das Reservas Brasileiras de Urânio



3.3 – CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS JAZIDAS BRASILEIRAS DE URÂNIO [32, 33, 34, 38]

- **Jazida do Planalto de Poço de Caldas , MG:**

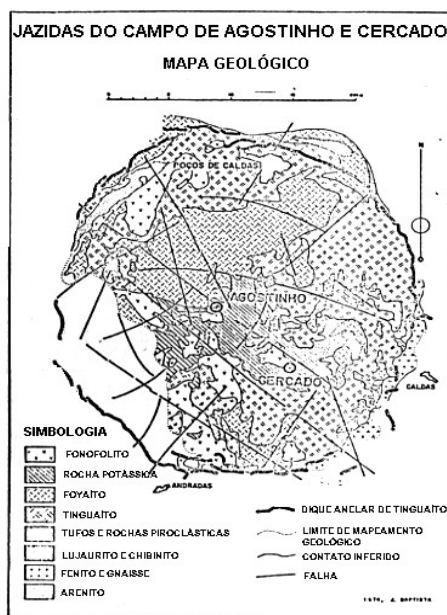
O Planalto de Poços de Caldas é uma estrutura do tipo alcalino, que tem na sua parte central uma depressão com cerca de 32 km de diâmetro. Nela, foram localizados vários depósitos de urânio, entre eles as Jazidas de Cercado e de Agostinho (as principais), como mostra as Figuras 3.2 e 3.3, em que a mineralização de urânio se associa a outros minerais, dentre os quais o molibdênio e o zircônio são os mais importantes.

JAZIDA DO CAMPO DE AGOSTINHO E CERCADO
 MAPA DE LOCALIZAÇÃO



Fonte: Nuclebrás [33, 34]

FIGURA 3.2 – Mapa de Localização das Jazidas do Campo de Agostinho e Cercado



Fonte: Nuclebrás [33, 34]

FIGURA 3.3 – Mapa Geológico das Jazidas do Campo de Agostinho e Cercado

Em 1962 foram descobertos vários indícios de urânio, não vinculados ao zircônio, dos quais o mais importante foi o do Campo do Agostinho. Em 1970, a referida jazida foi considerada sem condição de aproveitamento face aos custos de produção. O indício do Campo do Cercado, trabalhado a partir de 1971, foi o que se revelou ser de maior significação em termos de qualidade e volume.

Os trabalhos de decapagem começaram em junho de 1977, a pré-lavra em maio de 1978 e a lavra do minério em julho de 1981. Na progressão da escavação, feita por degraus, a altura da bancada é de 16m no estéril franco (material improdutivo livre) e de 2, 4 ou 8m nas zonas mineralizadas.

A avaliação geológica dessas duas principais jazidas culminou na implantação industrial de uma unidade mínero-industrial (operação iniciada em maio/1982) chamada de Complexo Industrial de Poços de Caldas (CIPC), hoje denominada, Complexo Industrial da INB (Indústrias Nacionais Brasileiras), Unidade de Poços de Caldas, MG, onde o minério da Jazida do Cercado foi lavrado. Na Mina de Osamu Utsumi (Jazida do Cercado), a mineração foi feita a céu aberto, método de lavra que permite um melhor aproveitamento do minério de urânio. A cava global da qual foram extraídos 55.000.000 m³ de material estéril e minério, ocupa área equivalente a um círculo de 800m de diâmetro e tem a forma aproximada de um tronco de cone invertido com 300m de altura.

O minério da Jazida do Cercado acha-se distribuído em três corpos principais, denominados A, B e E. Os corpos A e E são constituídos de tinguaitos [76-78] e fonolitos [76-78], sendo que o primeiro está cortado por brechas contendo mineralização primária de urânio. Trata-se de uraninita [71] associada a zirconita, badeleyta, jordisita, pirita, esfalerita, galena e fluorita [71, 76-78]. O corpo E exhibe mineralização secundária, com uraninita associada a argilas, pirita e zirconita [71, 76-78]. O Corpo B contém óxidos negros de urânio associados a fluorita, pirita [71] e minerais de molibdênio.

A Jazida de Agostinho é composta de brechas, caracterizando-se pela associação do urânio com o zircônio, seguindo-se, em ordem crescente, cofinita [71], uraninita [71], uranotorianita [71], fluorita [71] irradiada e pirita uranífera.

A Jazida do Cercado, a principal reserva da região, situada no município de Poço de Caldas, foi considerada a melhor possibilidade de, a curto prazo, atender à demanda de U_3O_8 do programa nuclear brasileiro. Esta mina está subdividida em três corpos A, B e E, como mostra a Tabela 3.2 [40].

TABELA 3.2 – Distribuição de Zonas Mineralizadas na Jazida do Cercado.

Corpo	Teor médio de U_3O_8 (%)	% da Reserva
A	0,21	20
B	0,074	65
E	0,117	15

Fonte: E. M. Davi [40]

- **Jazida de Itataia (CE):**

A Jazida de Itataia localiza-se no Município de Santa Quitéria, região central do estado do Ceará, a 45 km da cidade de Santa Quitéria e a 15 km da cidade de Itataia. Sua jazida é composta de migmatitos [76-78] na base, passando a quartizitos [76-78], gnaisses [76-78] e mármore no topo; entre estes dois últimos afloram rochas calcossiláticas [76-78]. A mineralização mais importante ocorre associada a rocha fosfática marrom avermelhada, designada localmente de colofanito [71], composta de apatita [61, 62] microcristalina [61, 62, 76-78] (flúor e hidróxi-apatita) em 80% ou mais do total, calcita, feldspato [76-78] e minerais acessórios como, grafita, zircão, titanita, argilas, sericita, pirita e quartzo [76-78]. A rocha fosfática aparece preenchendo cavidades ou fraturas em mármore ou em brechas, junto com fragmentos de mármore e de rochas feldspáticas, calcossiláticas e gnáissicas. O urânio ocorre disseminado na apatita, preferencialmente.

Teores de colofanito são da ordem de 1.900 ppm de U_3O_8 e 26% de P_2O_5 (fosfato). Em outras partes do depósito, os menores teores são de ≈ 400 ppm de U_3O_8 associados com 5% de P_2O_5 . Geralmente o urânio associado às rochas fosfáticas é obtido como sub-produto.

Ela é a maior reserva do Brasil, com cerca de 142.500 t de U_3O_8 , e uma das mais promissoras em termos de aumento de reserva. Como se trata de uma jazida com características únicas em todo mundo, há necessidade de se definir um processo de extração do urânio para aplicação em escala industrial.

- **Distrito de Lagoa Real (BA):**

O Distrito de Lagoa Real localiza-se no centro sul do Estado da Bahia, a uma distância média de 45 km da cidade de Caetité.

A Província Uranífera de Lagoa Real é constituída por 34 depósitos uraníferos distintos. Doze desses foram pesquisados com diferentes níveis de detalhes, sendo que sete, tiveram suas pesquisas parcialmente concluídas e evoluíram para a categoria de jazidas. É a segunda maior reserva uranífera brasileira. As rochas hospedeiras da mineralização uranífera são piroxênio-albititos [62, 76-78] que ocorrem como corpos fusiformes alongados na direção norte-sul, encaixados em rochas magmáticas de idade pré-Espinhaço. Granitos e granitos gnaissificados [76-78] e cisalhados acham-se localmente modificados mineralógica e quimicamente, dando lugar a corpos tabulares de gnaisses albitizados (albita > 50%), com ou sem uraninita. Cada corpo varia de 50 a 1.200m de comprimento, com espessura média de 6m. Os albititos mineralizados contém aegirina-augita, andratita, magnetita-hematita, quartzo, titanita, apatita, zircão, com ou sem uraninita; anfibólio, calcita e epidoto [76-78] também podem ocorrer. A precipitação de uraninita foi controlada pela redução $U^{+6} \rightarrow U^{+4}$, via interação de fluidos oxidantes/salinos com minerais de Fe^{+2} da mineralogia original dos gnaisses. Os

albitos se apresentam numa faixa de direção N-S, ao longo de aproximadamente 20km.

Os teores podem alcançar 3,5% de U_3O_8 . Os estudos acerca da Província Uranífera de Lagoa Real têm mostrado ser a Jazida de Cachoeira, ao norte do cinturão, a mais promissora economicamente. Como a exploração da reserva de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG, não mais se justifica economicamente, a INB optou por dar prioridade à extração do minério de urânio em Caetité, na Bahia, com a Unidade de Lagoa Real. A exploração, a céu aberto, já foi iniciada; posteriormente, numa segunda fase, será realizada a exploração subterrânea.

- **Jazida de Figueira (PR):**

Esta jazida está localizada na borda oriental da bacia do Paraná, no município de Sapopema, a aproximadamente 5 km do povoado de Figueira, município de Curiúva. Ocorre em uma área de sedimentos depositados entre o carbonífero e o permiano superior. Apresenta mineralização uranífera associada a outros minerais, entre eles o molibdênio, que aparece em quantidades significativas, destacando-se ainda a grande quantidade de pirita nas zonas mineralizadas e carvão. Cerca de 70% do urânio são encontrados em formações de arenito e 30% em arenito e carvão.

Capítulo 4 - PROCESSAMENTO DO MINÉRIO URANÍFERO DO PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS, MG

O processamento de minérios uraníferos é descrito no Anexo I. Neste capítulo são apresentadas as características básicas do processamento do minério uranífero do Planalto de Poços de Caldas, MG.

O Complexo Mineiro-Industrial do Planalto de Poço de Caldas (CIPC), hoje, Complexo Industrial da INB, Unidade Poços de Caldas, MG, compreende [33, 38]:

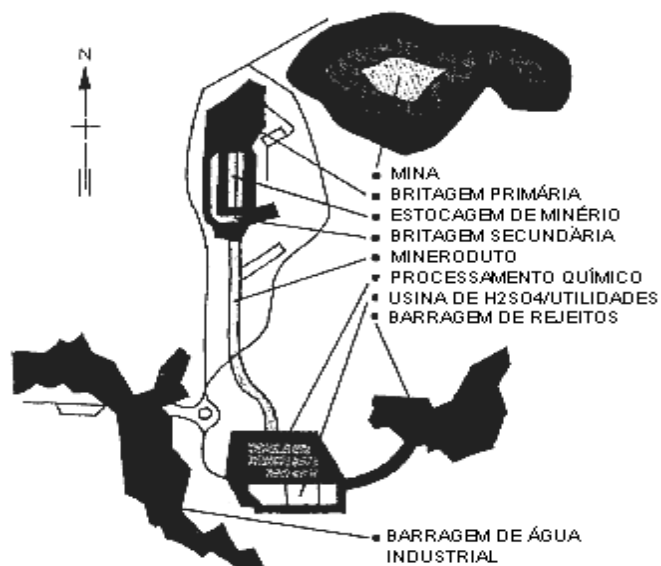
- A mina, o setor de tratamento físico composto da britagem primária, da área de estocagem de minério e do setor de britagem secundária, conforme mostra as Figuras 4.1 e 4.2;
- A usina de tratamento químico;
- A fábrica de ácido sulfúrico;
- O conjunto de instalações auxiliares formado por uma unidade alternativa de geração de vapor, uma central de produção de ar comprimido, uma estação de tratamento de água bruta, uma unidade de desmineralização, uma instalação de moagem de calcário e uma unidade de rejeitos líquidos e sólidos , conforme mostra a Figura 4.3;
- A usina de produção de concentrado de urânio.

Agora que a exploração da reserva de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG, não mais se justifica economicamente, optou-se a dar prioridade à extração do minério de urânio em Caetité, na Bahia, com a Unidade de Lagoa Real. Visando à otimização da utilização das unidades industriais existentes no Planalto de Poços de Caldas, MG, com o aproveitamento de todo capital tecnológico lá existente, estão sendo implantados dois novos projetos:

- **Tratamento Químico da Monazita (TQM):** A monazita é um composto natural que, além de conter urânio e tório, constitui-se a principal fonte de terras raras das reservas brasileiras. Essas, separadas individualmente, sob forma de óxidos com elevados graus de pureza, passarão a ser imprescindíveis para as aplicações em tecnologia de ponta. Em uma primeira etapa, a Unidade de Caldas iniciou sua produção, em 1999, de *hidróxido de cério e cloreto de lantânio*.
- **Tratamento de Minerais Contendo Urânio Como Subproduto:** O aproveitamento econômico do urânio onde ele não é o bem principal, constitui-se uma fonte alternativa bastante atraente de suprimento desse mineral e a qual a INB vem dedicando esforços no sentido de sua viabilização. Dentro desse quadro, em 1999, a INB iniciou o processamento, na Unidade de Caldas, em parceria com o Grupo Paranapanema, do mineral *columbita*, que contém, além do urânio, nióbio e tântalo.

Adicionalmente, a Unidade de Caldas opera uma unidade de produção de ácido sulfúrico com capacidade de 100.000 toneladas/ano. A maior parte é comercializada para terceiros, principalmente produtores da área de fertilizantes.

Para um melhor entendimento, o processamento do minério uranífero no Complexo Industrial da INB, Unidade Poços de Caldas, MG, foi dividido em três etapas: *Extração*, *Tratamento Físico* e *Tratamento Químico*.



Fonte: Nuclebrás [33]

FIGURA 4.1 – Vista Parcial do Complexo Industrial da INB em Poços de Caldas, MG



Fonte: Nuclebrás [33]

FIGURA 4.2 – Vista Parcial da Mina de Osamu Utsumi (Campo do Cercado) em Poços de Caldas, MG



Fonte: Nuclebrás [33]

FIGURA 4.3 – Vista Parcial da Usina de Tratamento Químico, a Fábrica de Ácido Sulfúrico, o Conjunto de Instalações Auxiliares, a Unidade de Rejeitos Líquidos e Sólidos e a Usina de Produção de Concentrado de Urânio do Complexo Industrial da INB em Poços de Caldas, MG

4.1 - EXTRAÇÃO

A extração foi realizada na mina de Osamu Utsumi (Jazida do Cercado), que fica no município de Poço de Caldas, MG, a altitudes de 1.000 a 1.500m, a 30 km da cidade de Poços de Caldas.

O desmonte foi feito com escavação direta por "moto-scrapers" ou trator de esteiras e carregadeiras (caminhões de 35 toneladas), no caso de solos, argilas e materiais facilmente degradáveis, em geral, e com a utilização de explosivos e posterior transporte em carregadeiras, no caso de rochas. Os materiais estéreis eram transportados para a área de bota-fora por meio de caminhões fora-de-estrada e "moto-scrapers", dependendo do tipo de material.

A produção média do minério foi da ordem de 2.500 t /dia e do minério marginal, de 1.500 t/dia. O teor médio de minério lavrado durante toda vida útil do CIPC, hoje, Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, foi de 588 ppm (0,0588%) [79]. O ritmo da produção da lavra foi de 2.500 t de minério/dia para que houvesse a alimentação uniforme da usina. Os minérios com teores entre 200 a 400 ppm foram tratados fora da usina, em pilhas de lixiviação estática [33, 38].

4.2 – TRATAMENTO FÍSICO

O caminho percorrido pelo minério de urânio da mina à usina compreendia o transporte do minério de urânio em caminhões e o controle nas frentes de lavra. Em seguida, passando pelas etapas de britagem primária, o minério é estocado, com uso de um "stacker" (empilhadeira), num parque com capacidade para 200.000 t, em pilhas formadas em função do teor do minério. Do parque de estocagem, o minério era levado para a britagem secundária, com adição de pirolusita, e terciária, para moagem, a úmido; em seguida era enviado à usina, na forma de polpa, por meio de um mineroduto, para as unidades de extração hidrometalúrgica de urânio e molibdênio.

4.3 – TRATAMENTO QUÍMICO

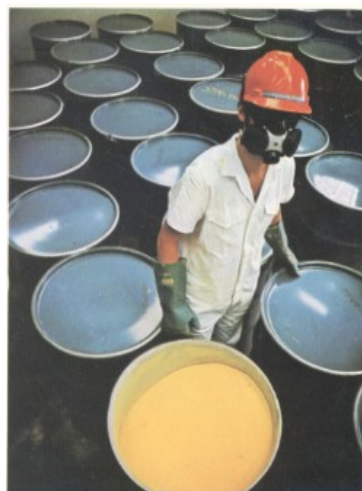
Obtido o minério tratado fisicamente, faz-se nele um ataque químico, a fim de liberar o elemento urânio do mineral em que ele está contido. Dependendo de sua natureza, será um ataque ácido, com utilização por exemplo, de ácido sulfúrico (lixiviação ácida), ou um ataque alcalino (lixiviação alcalina). Na Unidade de Caldas foi utilizado o processo de lixiviação ácida. A partir daí, obtém-se a lixívia (um líquido no qual o urânio está dissolvido), que, em seguida, passa por um processo de purificação para separar o urânio dos demais elementos, aproveitáveis ou não. Depois, faz-se a precipitação e, na fase final

do processo, o “yellow cake” (concentrado de urânio) passa por um filtro antes da secagem (Figura 4.4) e o produto é embalado em tambores apropriados (entamboramento – Figura 4.5). Este tratamento é melhor detalhado a seguir [33, 85].



Fonte: Nuclebrás [33]

FIGURA 4.4 – Concentrado de Urânio Passando pelo Filtro antes da Secagem



Fonte: Nuclebrás [33]

FIGURA 4.5 – Concentrado de Urânio Embalado em Tambores Apropriados

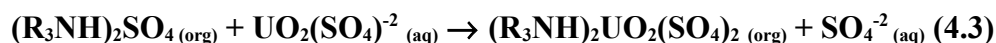
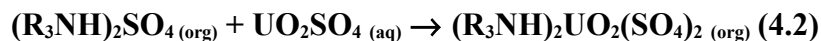
O processo compreende a lixiviação ácida à temperatura da ordem de 70°C, separação sólido-líquido (filtração) e lavagem em filtros do tipo esteira. O licor resultante é oxidado com clorato de sódio (NaClO₃) ou óxido de manganês (MnO₂) e submetido a extração por solvente com “Alamina 336”(tricaprililamina), em tanques do tipo misturador/decantador, com a finalidade de purificar a polpa vinda das lixívia sulfúricas. O processo Amex (“Amine Extraction”), surgiu após longos trabalhos realizados nos laboratórios da ORNL (Oak Ridge National Laboratory, EUA), onde uma variedade de compostos organonitrogenados foram testados. Nesta fase, o U⁺⁶ (urânio hexavalente) apresenta-se na forma de complexos de sulfato de uranilo. A reação entre o íon sulfato e o íon uranilo pode ser representada por:

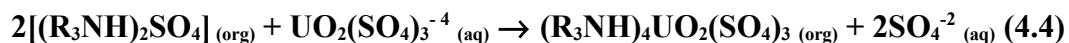


Onde n = 1, 2 ou 3, dependendo da formação de complexos neutro, dianiônico ou tetraaniônico [56].

No caso do molibdênio, geralmente, este está na forma hexavalente ou em estágios de valência inferiores, dependendo do potencial da lixívia. As formas mais prováveis são cátions molibdilais (MoO₂⁺², MoO₂SO₄), ânions molibdatos (MoO₂⁻², Mo₂O₇⁻²) e os íons complexos (MoO₂(SO₄)₃⁻⁴ e MoO₂(SO₄)₂⁻²) [56, 65].

No processo de extração do urânio e molibdênio, é utilizado um solvente que é composto de alamina-336 (amina terciária), querosene (dilúente) e tridecanol (modificante). Os sais da amina terciária (R₃N), vindos da etapa de sulfatação da amina, reagem com o sulfato de uranilo de acordo com as seguintes reações, respectivamente, com a presença do sulfato de uranilo neutro, dianiônico e tetraaniônico [56]:





onde:

org = fase orgânica e

aq = fase aquosa

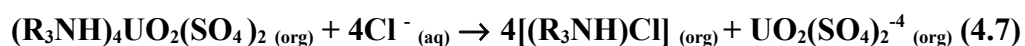
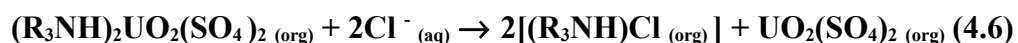
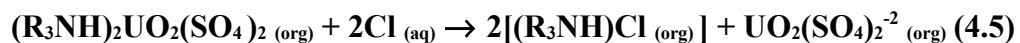
Utiliza-se, geralmente, um diluente no solvente, que afeta bastante a extração do urânio. A compatibilidade da amina com um determinado diluente varia com a classe, estrutura e o peso molecular do diluente. Os principais diluente usados em processos de extração de urânio são o querosene, que foi utilizado no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, e o varsol.

Existem grandes variações no coeficiente de extração do urânio, quando se utiliza diferentes diluentes. Em alguns deles, o bissulfato apresenta baixa solubilidade, podendo, às vezes, ocorrer a sua precipitação, como é o caso da decilamina em querosene. A maioria das aminas, porém, comportam-se adequadamente em querosene. Esse comportamento é melhorado pela adição de pequenas quantidade de modificantes, álcoois de cadeia longa, como o tridecanol ($C_{13}H_{28}O$), que foi utilizado no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, e o isodecanol, geralmente usado para melhorar a separação de fases. Tais modificantes, quando adicionados em concentrações adequadas, acarretam um aumento no coeficiente de extração.

Depois da fase de extração por solventes, tem-se a reextração de urânio e molibdênio, onde depois de carregado, o solvente orgânico é submetido às etapas de reextração. Essas etapas envolvem vários estágios em contracorrente, onde o urânio é primeiramente transferido para uma fase aquosa, continuando o molibdênio em solução orgânica. Após a transferência de todo o urânio, usualmente mais um ou dois estágios são necessários, para remover o molibdênio. Ao mesmo tempo, o solvente orgânico é regenerado para a sua forma livre, R_3N , iniciando um novo ciclo de extração.

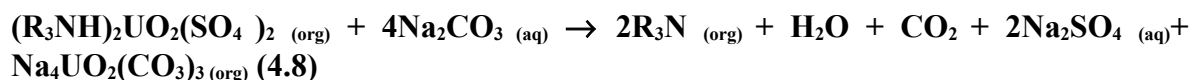
Na reextração de urânio, a remoção de urânio do solvente orgânico pode ser feita por uma variedade de reextratantes. A escolha de um deles depende da composição da lixívia que é submetida à extração, do custo do mesmo e do solvente orgânico (amina + diluente + modificante).

A reextração do urânio contido na fase orgânica é feita com uma solução de cloreto de sódio (NaCl) e, dependendo do teor do molibdênio, é promovida sua extração com uma solução de carbonato de sódio (Na₂CO₃). As soluções de cloreto de sódio (NaCl) acidificadas, bastante utilizadas devido ao seu baixo custo e seletividade para o urânio, foram também utilizadas no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG. As reações que representam a reversão são as seguintes [56]:

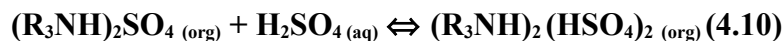
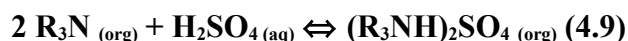


Na reextração do molibdênio, este é removido do solvente orgânico por qualquer solução alcalina com pH maior do que 7. Soluções de carbonato de sódio (Na₂CO₃) são geralmente as mais usadas, como é o caso do Complexo Industrial da INB, unidade de Poços de Caldas, MG; porém, os hidróxidos podem também ser usados eficientemente. É importante que a solução tenha pH elevado para remover o molibdênio. Essa reextração ocorre ao mesmo tempo da etapa de regeneração do solvente orgânico.

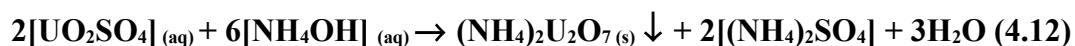
O carbonato de sódio (Na_2CO_3) é eficiente, também, para remover o urânio e outros elementos presentes no solvente orgânico como o molibdênio e o vanádio. O urânio passa para a fase aquosa como um complexo de carbonato, enquanto a amina é regenerada para sua forma livre, conforme a reação abaixo [56, 65]:



Após a fase de regeneração ou vinda da fase de reextração do molibdênio, a amina obtida é enviada para sulfatação da amina, que consiste nas seguintes reações na forma de sulfato de amina ou como bissulfato de amina, respectivamente [65]:



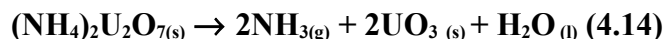
A partir do reextrato uranífero, obtém-se a precipitação do diuranato de amônia, DUA $[(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7]$, por adição de gás de amônia (NH_3) ou com hidróxido de amônia (NH_4OH) [66, 74], conforme as seguintes reações:



Em seguida, o concentrado de urânio (“yellow cake”) é, finalmente, filtrado, secado e entamborado (embalado em tambores) para expedição.

Para a conversão ao U_3O_8 , o diuranato de amônia, DUA - $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$, é aquecido a uma temperatura que varia entre 343°C a 482°C (processo de decomposição térmica chamado

de calcinação) e para a conversão ao UO_3 a temperatura varia de 200°C a 400°C . As reações químicas são representadas, respectivamente, por [21, 68]:



A recuperação do molibdênio de seu reextrato aquoso pode ser efetuada pela precipitação como molibdato de cálcio (CaMoO_4), pela adição de hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] e, subseqüentemente é feita a filtragem, secagem e entamboramento do molibdato de cálcio (CaMoO_4), ficando o mesmo pronto para expedição.

De acordo com a Nuclebrás a usina de concentrado de urânio (“yellow cake”) do Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, tinha uma capacidade nominal de 500 toneladas/ano de concentrado de urânio (“yellow cake”). Como co-produtos (produtos secundários) produzia-se concentrado de molibdênio na forma de molibdato de cálcio (CaMoO_4), trióxido de molibdênio (MoO_3) ou ferro-molibdênio (FeMo) que são utilizados sobretudo na fabricação de aços especiais.

4.4 – REJEITOS DA EXTRAÇÃO, TRATAMENTO FÍSICO E TRATAMENTO QUÍMICO DA MINERAÇÃO DE URÂNIO

Os rejeitos são compostos de rocha escavada com baixo teor de urânio, que não justifica economicamente a sua extração (rejeitos da mina) e de material da usina de concentração (rejeitos de concentração). Os rejeitos de concentração contém material com tamanhos variáveis, de grânulos grandes até pó muito fino, passando por material arenoso. Estes rejeitos são normalmente manuseados como lama, contendo 24 a 40% de sólidos e agentes químicos residuais. A maior parte de minério de urânio contém de 0,05 a 0,2% de urânio, embora alguns minérios mais raros possam apresentar teores de 15% ou maiores, e quase 100% de produtos de decaimento do urânio como o tório e o rádio, e isótopos de vida curta

do decaimento do radônio, tais como bismuto e chumbo. Assim, a recuperação de um quilo de *urânio no minério* pode produzir até 2.000 toneladas de rejeitos. Excetuando-se os agentes químicos adicionais, os rejeitos são inerentemente menos perigosos do que o minério original. Contudo, o processo de moagem e o tratamento químico necessário ao lixiviamento do minério torna provável a liberação de materiais solúveis em água para o meio ambiente.

A composição precisa dos rejeitos de concentração dependerá da mineralogia do corpo do minério. A radioatividade do rejeito é proporcional ao teor de minério. Cerca de 15% da radioatividade contida no minério original é transferida para o concentrado, o produto final da usina de concentração. Os outros 85%, que consistem de produtos de decaimento do urânio, são descartados juntamente com os rejeitos da operação.

Os principais materiais presentes no rejeito de concentração são os mesmos presentes no minério original de urânio e, portanto, não perturbam o equilíbrio ecológico global. Eles são o ^{230}Th (Tório-230), ^{226}Ra (Rádio-226), ^{210}Pb (Chumbo-210) e outros descendentes do radônio, isto é produtos de decaimento radioativo do radônio. O ^{230}Th tem uma longa meia-vida, 80.000 anos, mas, similarmente ao Pb^{210} , cuja meia-vida é de somente 22,3 anos, ele é precipitado em forma de sólido e permanece inerte nas bacias de rejeito. Embora o ^{226}Ra dissolvido reduza-se durante este processo de precipitação, os efluentes da usina de concentração, caso não sejam tratados, podem apresentar concentrações não aceitáveis para uma liberação ao meio ambiente. O ^{226}Ra , com uma meia-vida de 1.622 anos, constitui-se também em um elemento radioativo. Exige-se, portanto, um controle a longo prazo. O ^{222}Rn (Radônio-222), produzido pelo decaimento do ^{226}Ra , é um gás inerte de vida curta, com uma meia-vida de 3,8 dias, e decai em polônio radioativo sólido, bismuto e chumbo, que, eventualmente, poderiam se associar a partículas de poeiras, tornando-se perigosos se inalados. A liberação para a atmosfera deve obedecer a limites máximos e deve ser controlada.

A maior parte dos rejeitos não é altamente radioativa e seria classificada normalmente como rejeito de baixa atividade, embora alguns rejeitos oriundos de minérios de altos teores possam atingir os níveis de rejeitos de atividade média. O risco decorrente de exposição direta à radiação durante a mineração/concentração é pequeno, principalmente, se há um controle das áreas de mineração [73].

A eficiência do processo de lixiviação ácida está em cerca de 91 a 93%; isto significa dizer que, de cada 1,0 kg de urânio que passa pelo processo de lixiviação, 0,91 a 0,93 kg são recuperados; o restante, 7 a 9%, são perdidos para o rejeito. Quase todo o material estéril contido no minério de urânio é rejeitado no beneficiamento. O rejeito consiste de 99,9% do material estéril, incluindo todos os produtos de decaimento [54].

Aproximadamente 10% do ^{238}U e todos os outros radionuclídeos no minério estão no rejeito. Os rejeitos representam a maior e mais longa fonte duradoura de emissão de Rn^{222} do beneficiamento do urânio, por causa da grande área exposta e a significativa concentração de ^{226}Ra presente [54].

Todos os rejeitos são liberados em barragem e/ou tanques de rejeitos. Algumas barragens de rejeitos são construídas abaixo do solo ou em buracos escavados, mas a maioria das usinas de beneficiamento licenciadas usam barragens de rejeito acima do solo, onde a topografia do local dita a forma geral da barragem. A construção das barragens aterradas ou abaixo do solo é o método preferido nas novas usinas de beneficiamento. No complexo Industrial da INB em Poços de Caldas, MG, as barragens de rejeito foram feitas acima do solo [54].

Os rejeitos são tipicamente cobertos com “raffinate” (refinado) que controlam a poeira e reduz a emissão de Rn^{226} durante o beneficiamento do urânio. Com o fechamento da usina de beneficiamento, as barragens de rejeito começam a secar, principalmente devido a

evapotranspiração. Isto resulta novamente em um aumento da liberação de Rn^{222} . Assumindo um período de 5 anos após o fechamento da usina de beneficiamento, o rejeito é estabilizado. A estabilização envolve cobertura a seco da barragem de rejeito com camadas de rocha e, se disponível, topo do solo (permite o crescimento da vegetação). A cobertura dos rejeitos do beneficiamento é feita para retornar a emissão de Rn^{222} aos níveis do “background” (radiação de fundo). A estabilização reduz muito a emissão de Rn^{222} , mas não elimina a emissão [54].

O tratamento de efluentes líquidos e sólidos do rejeito é feito com calcário ($CaCO_3$) e cal (CaO) e, posteriormente, sua emissão à bacia de rejeitos e tratamento do sobrenadante desta com clorato de bário ($BaCl_2$) para eliminação do Rádio-226. Rejeitos da usina passam por uma estação de tratamento onde perdem todos os contaminantes, radioativos ou não, e são despejados na barragem de rejeitos. Do ponto de vista da produção industrial o Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, vem atendendo o suprimento de combustível para Angra I. Entretanto, a mina foi desativada devido à exaustão de suas reservas de minério.

A Figura 4.6, a seguir, mostra o diagrama esquemático do processamento do minério uranífero do Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, desde a mineração e beneficiamento de urânio até a obtenção do produto final (“yellow cake”). Ele está apresentado dois blocos: *Extração + Tratamento Físico* e *Tratamento Químico*.

Capítulo 5 – ANÁLISE EXERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE U_3O_8 DE POÇOS DE CALDAS, MG, PARA CONCENTRAÇÃO DE 0,092% DE U_3O_8

A metodologia aplicada neste trabalho foi concentrada no processo de mineração e concentração de urânio desenvolvido no Complexo Industrial das Indústrias Nucleares do Brasil S.A (INB), Unidade de Poços de Caldas, MG, por se pensar a priori que haveria uma certa facilidade de obtenção de dados, o que não ocorreu, e também devido ao fato de a Unidade de Poços de Caldas, MG, ser pioneira na extração e processamento do minério de urânio no Brasil, em escala industrial.

Futuramente, a mesma metodologia aplicada à Unidade de Poços de Caldas, MG, da INB, poderá ser estendida a outros projetos de mineração e concentração de urânio, como Lagoa Real (BA) em estágio de implantação pela INB, além de poder ser utilizada para processos de mineração de qualquer natureza.

Para a realização da análise exergética da produção do concentrado de urânio, U_3O_8 , há a necessidade de determinar os insumos, os produtos e os rejeitos envolvidos na mineração e concentração do urânio e, também, determinar suas respectivas exergias.

Para facilitar a compreensão da análise exergética, dividiu-se o processo em três blocos: *Extração, Tratamento Físico e Tratamento Químico* de acordo com o diagrama esquemático da Figura 5.1

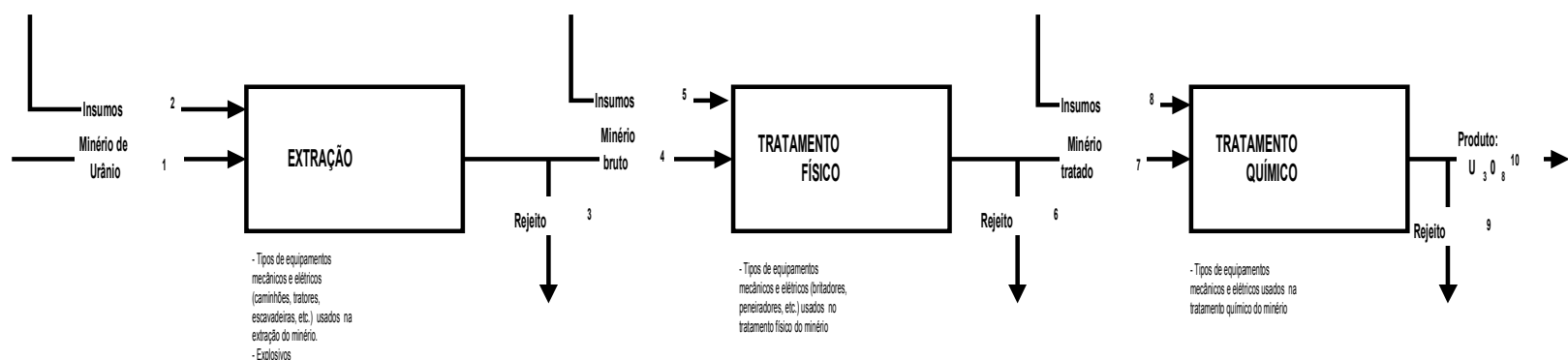


FIGURA 5.1 – Diagrama Esquemático da Análise Exergética da Mineração e Concentração de Urânio do Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG

1 - Composição média do minério, teor médio de urânio, quantidade de minério extraído diariamente ou anualmente e a razão material estéril/minério (S).

2 – Energia elétrica (KWh/tU), combustíveis fósseis (tipos: p. ex. óleo diesel, gasolina, etc. e consumos: p. ex. l/h ou l/a) e outros insumos, como por exemplo explosivos (composições e quantidades por tU).

3 – Perda de urânio (tU), composição e quantidades (por tU) dos demais rejeitos (p. ex. rochas, terras, minerais, etc.) da etapa da extração.

4 – Composição e quantidade de minério extraído (t/a e tU/a) que entra na etapa de tratamento físico.

5 – Energia elétrica (KWh/tU), combustíveis fósseis (tipo e consumo horário ou anual) e outros insumos (composições e quantidades por tU).

6 – Perda de urânio (tU/a), composição e quantidades dos demais rejeitos do tratamento físico (t/a, l/h, m³/h).

7 – Composição e quantidades de minério tratado (T/a e tU/a) que entra para o processamento químico.

8 – Energia elétrica (KWh/tU), combustíveis fósseis (tipo e consumo diário ou anual), produtos químicos e outros insumos das instalações e de processamento químico, como a usina de ácido sulfúrico e os sistemas de água desmineralizada, de vapor, de captação de água, etc. (composições e quantidades por tU).

9 – Perda de urânio (tU/a); rejeitos químicos e demais rejeitos (sólidos, líquidos e gasosos) do processamento químico (t/a, l/h, m³/h).

10 – Composição e quantidades (tU/a) do concentrado de urânio (“yellow cake”): U₃O₈.

A Tabela 5.1 mostra a produção de U₃O₈ e os consumos energéticos no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, de 1986 e 1995. Já a Tabela 5.2 mostra a produção anual de U₃O₈ de 1982 a 1996.

TABELA 5.1 – Produção e Consumos no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, nos anos de 1986 e 1995.

Insumos/Produto	Unidade	1986	1995
Minério Processado	t	97.423	135.396
Produção U ₃ O ₈	t	36,15	121
Gasolina	m ³	70,68	65
Óleo Diesel	m ³	96,53	71,5
Óleo Combustível	t	98,6	198
Querosene	m ³	86,3	237
Energia Elétrica	MWh	14.559	16.586

Fonte: INB

TABELA 5.2 – Minério Processado e Produção de U₃O₈ no Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, nos anos de 1982 a 1995.

Ano	Minério Processado (t)	U₃O₈ Produzido (t)	Ano	Minério Processado (t)	U₃O₈ Produzido (t)
1982	401.130	287,821	1990	2.720	4,486
1983	358.540	229,366	1991	-	0,061
1984	287.560	142,559	1992	-	-
1985	237.430	94,485	1993	54.380	28,359
1986	97.420	36,150	1994	138.700	124,400
1987	286.200	116,741	1995	135.400	124,578
1988	45.660	17,741	Total	2.111.920	1.241.602
1989	66.780	34,815	-	-	-

Fonte: INB

5.1 – EXTRAÇÃO

Esta etapa envolve a extração do minério de urânio (urânio + materiais agregados), as operações de perfuração e detonação da rocha, escavação (movimentação de rocha e material estéril da mina), transporte, carregamento, descarregamento, lançamento e compactação do solo, etc., realizada pelos equipamentos mecânicos conversores de energia química em cinética, baseando-se no consumo de óleo diesel e de gasolina [46].

Não foram consideradas as exergias da mistura do óleo diesel ou da gasolina com o ar utilizada pelos motores de combustão interna e as exergias agregadas no processo de fabricação desses equipamentos mecânicos, pois sua participação é muito pequena na análise exérgica como um todo.

O desgaste e a vida útil dos equipamentos também não foi computado, devido à falta de dados.

O consumo de explosivos utilizados para detonação da rocha nas operações de extração do minério de urânio foi levado em consideração

As operações envolvidas nesta fase foram subdivididas em: Escavação Comum, Escavação de Rocha e Aterro. Além disto, foram determinadas as exergias dos rejeitos (sólidos, líquidos e gasosos) bem como a exergia correspondente à perda de urânio neste processo de extração. Na Tabela 5.3, existem alguns insumos identificados, mas que não foram quantificados, devido à falta de dados [46].

- **Escavação em Rocha:** envolve as operações de perfuração e detonação da rocha, carregamento, transporte e descarregamento. Estas operações são realizadas pelos seguintes equipamentos mecânicos: carreta de perfuração, compressor, trator, carregadeiras e transportador (caminhões fora-de-estrada) .

- **Escavação Comum:** envolve as operações de escavação, carregamento, transporte e descarregamento. A escavação comum utiliza os seguintes equipamentos mecânicos: tratores, carregadeiras e transportadores.
- **Aterro:** envolve as operações de espalhamento e compactação do solo e rocha. Os seguintes equipamentos mecânicos são usados nesta operação: carregadeiras, tratores, rolo compactador, trator agrícola, motoniveladora e caminhão pipa, os três últimos utilizados para umedecer o solo e promover uma boa compactação do mesmo.

A Tabela 5.3 mostra os insumos e suas exergias na etapa de extração do minério de urânio.

5.1.1 – INSUMOS NA ETAPA DE EXTRAÇÃO (Tabela 5.3)

- URÂNIO

Daqui em diante, consideraremos os insumos, produtos e rejeitos por quilograma de urânio contido no minério extraído.

De acordo com os dados da Unidade de Poços de Caldas, referentes ao ano base de 1995, foram processados 135.400 t de minério. Considerando a concentração média de U_3O_8 igual a 0,092% ou 920ppm ($9,2 \times 10^{-4}$ kg de U_3O_8 /kg de minério) ou $2,6 \times 10^{-4}$ kg de U/kg de minério, tem-se aproximadamente 124,578 t de U_3O_8 , que corresponde a 35,214 t de U, contido no minério extraído [79]

- ÓLEO DIESEL

O consumo de óleo diesel foi de 71,5 m³, contabilizando $2,03 \times 10^{-3}$ m³/kg de U ; como a densidade média do óleo diesel é de cerca de 852,0 kg/m³, chega-se a um consumo de 1,730 kg de óleo diesel/kg de U.

- GASOLINA

O consumo de gasolina foi de 65 m³, contabilizando 1,846 x 10⁻³ m³/kg de U; como a densidade média da gasolina é de cerca de 660,0 kg/m³, obtém-se um consumo de 1,218 kg de gasolina/kg de U.

- EXPLOSIVOS DE RUPTURA [46, 82, 83]

Os explosivos de ruptura para uso civil servem para a detonação de rochas pela ação da pressão dos gases produzidos na reação química iniciada pelo processo de combustão (queima).

O tipo de explosivo deve ser escolhido em função de suas características e do tipo de rocha a ser desmontada. Quanto mais dura for a rocha, maior deve ser o percentual de nitroglicerina contida no explosivo. Neste trabalho foi considerada a utilização da dinamite, pois é o explosivo mais utilizado para a detonação e ruptura de rochas.

Devido à falta de dados do consumo de nitroglicerina por quilograma de urânio da Unidade de Poços de Caldas, MG, considerou-se o consumo de 135g de dinamite para detonar 1.000 kg [83]. Admitindo-se que 60% da dinamite seja composta de nitroglicerina [46], tem-se 0,081 kg de nitroglicerina/kg de rocha. Sabendo-se que em geral, na crosta terrestre, a quantidade de urânio por kg de rocha é igual a 7,0 x 10⁻⁶ kg U/kg de rocha [82], obtém-se 11.571,43 kg de nitroglicerina/kg U.

5.2 - TRATAMENTO FÍSICO

O tratamento físico compreende os equipamentos elétricos consumidores de energia elétrica para geração de energia mecânica por meio de motores elétricos como britadores, moinhos, peneiradores, correia transportadoras, empilhadeiras e equipamentos eletro-mecânicos diversos. O desgaste, a vida útil e as exergias agregadas no processo de fabricação desses equipamentos não foram levadas em consideração.

5.2.1 – INSUMOS NA ETAPA DE TRATAMENTO FÍSICO

- ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica foi abordada, neste trabalho, como insumo na etapa de tratamento físico, pois as máquinas mais robustas e que consomem maior quantidade de energia elétrica trabalham nesta etapa. As outras etapas; (de extração e tratamento químico) também possuem máquinas consumidoras de energia elétrica que foram computadas em conjunto com esta, por não ter sido possível obter a discriminação, por etapa, do consumo de energia elétrica. Além disto, considerou-se 10% de perdas de energia elétrica, devido ao fato de que os motores elétricos de grande porte, têm uma eficiência de aproximadamente 90%.

O consumo de energia elétrica, de acordo com a Unidade de Poços de Caldas, ano base de 1995, foi de 16.586 MWh; considerando as perdas de 10% (1.658,6 MWh), tem-se 14.927,4 MWh, que corresponde a 0,424 MWh/kg de U e, como $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^3 \text{ kJ}$, obtém-se o consumo de $1,526 \times 10^6 \text{ kJ/kg}$ de U.

- PIROLUSITA

O consumo de pirolusita (65% de MnO_2), que é utilizado como oxidante, é de 0,01kg/kg de minério. Como a concentração média de U_3O_8 é de 0,092% ($2,6 \times 10^{-4} \text{ kg}$ de U/kg de minério), tem-se 38,462 kg de pirolusita/kg de U ou 25,0 kg de MnO_2 /kg de U [51].

A Tabela 5.3 mostra os insumos na etapa do tratamento físico e suas exergias e a Tabela 5.4 mostra os insumos na etapa do tratamento químico, que serão abordados logo a seguir.

Tabela 5.3 – Insumos da Extração e Tratamento Físico do Minério de Urânio no Complexo Indústria da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, para Concentração de 0,092% de U₃O₈

INSUMO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO s – sólido L– Líquido g – gasoso	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO			EXERGIA	
				Concentração no minério (%)	(kg/kgU)	(mol/kgU)	(kJ/mol)	(kJ/kgU)
Óxido de Silício ^(a) (Quartzo)	SiO ₂	s	60,085	41,0	1.576,923	2,624x10 ⁴	1,9 ^(g)	4,987x10 ⁴
Óxido de Alumínio ^(a)	Al ₂ O ₃	s	101,9612	24,0	923,077	9,053x10 ³	200,4 ^(g)	1,814x10 ⁶
Óxido de Potássio ^(a)	K ₂ O	g	94,203	12,4	476,923	5,063x10 ³	413,1 ^(g)	2,091x10 ⁶
Trióxido de Enxofre ^(a)	SO ₃	s	80,0622	2,5	96,154	1.200,989	249,1 ^(g)	2,992x10 ⁵
Fluoreto de Cálcio ^(a) (Fluorita)	CaF ₂	s	78,077	1,4	53,846	689,655	11,4 ^(g)	7,862x10 ³
Trióxido de Molibdênio ^(a)	MoO ₃	s	143,94	0,06	2,308	16,032	68,2 ^(g)	1.093,404
Óxido de Titânio ^(a) (Rutilo)	TiO ₂	s	79,90	2,0	76,923	962,742	21,4 ^(g)	2,060x10 ⁴
Óxido de Zircônio ^(a) (Zirconita)	ZrO ₂	s	123,2188	0,6	23,077	187,284	-1.038,83 ^(h)	-1,946x10 ⁵
Óxido de Tório ^(a) (Torianita)	ThO ₂	s	264,0368	0,01	0,385	1,4567	*	*

Tabela 5.3 – Insumos da Extração e Tratamento Físico do Minério de Urânio no Complexo Indústria da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, para Concentração de 0,092% de U₃O₈ (continuação)

INSUMO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO s – sólido L – líquido g – gasoso	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO		EXERGIA	
				(kg/kgU)	(mol/kgU)	(kJ/mol)	(kJ/kg U)
Gasolina	C ₈ H ₁₈	L	114,23266	1,218	10,662	5.413,1 ^(g)	5,772x10 ⁴
Óleo Diesel ^(a)	C ₁₆ H ₃₄	L	226,44938	1,730	7,640	10.639,7 ^(g)	8,128x10 ⁴
Nitroglicerina (Explosivo)	C ₃ H ₅ (ONO ₂) ₃	L	213,1121	11.751,43	5,514x10 ⁴	1.625,11 ^(f)	8,961x10 ⁷
Pirolusita (65% MnO ₂) ⁽ⁱ⁾	MnO ₂	s	86,9369	25,0	287,565	21,1 ^(g)	6,067x10 ³
Energia Elétrica							1,526 x 10 ⁶
Total							9,71x10⁷

(a) Dados Específicos da Jazida de Campo do Cercado - Fonte: OLIVEIRA, A. G. ; “Mineração de Urânio e Molibdênio no Planalto de Poços de Caldas, M.G.”; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974 [47].

(b) Dados Específicos da Jazida de Campo do Cercado - Fonte: FUJIMORY, K.. ; “Estudo Mineralógico uma Amostra Proveniente do Campo do Cercado (C-09), Poços de Caldas, MG”; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974 [48].

(c) Dados Específicos da Jazida de Campo do Cercado – Fonte: CORRÊA, H. S; “Estudo de Lixiviação do Setor C-09 (Campo do Cercado) de Poços de Caldas”; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974 [49].

(d) Dados Específicos da Jazida de Campo do Cercado - Fonte: BLATT, V.; “Lixiviação do Minério de Campo do Cercado, Poços de Caldas, MG”; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974 [50].

(e) Dados Específicos da Jazida do Campo do Agostinho - Fonte: OLIVEIRA, A. G. ; “Mineração de Urânio e Molibdênio no Planalto de Poço de Caldas, M.G.”; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974 [47].

(f) Exergia Química Calculada . Ver item 5.6

(g) Fonte: SZARGUT, J. ; MORRIS, D. R. ; STEWARD, F. R. ; "Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Process"; Hemisphere Publishing Corporation, 1988 [4].

(h) Fonte: LIDE, David R., “*Handbook of Chemistry and Physics*”, CRS Press, 77 th edition, EUA, 1996-1997 [67].

(i) Fonte: BRUNO, J. B. & CONCEIÇÃO, E. L. H.; “Recuperação de Molibdênio a partir do Estéreis da Mina Osamu Utsumi”; Nuclebrás, Março/1978 [51].

(*) Valores não encontrados na literatura técnica disponível e sem possibilidades de calcular/estimar devido à falta de dados.

Tabela 5.4 – Insumos de Tratamento Químico do Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, para Concentração de 0,092% de U₃O₈

INSUMO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO s – sólido L – líquido g – gasoso	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO		EXERGIA	
				(kg/kgU)	(mol/kgU)	(kJ/mol)	(kJ/kgU)
Óleo Combustível	*	l	*	5,623	*	*	2,383x10 ⁵ (g)
Ácido Sulfúrico ^(b) (Lixiviante)	H ₂ SO ₄	l	98,077	384,613	3,921,541	163,4 ^(f)	6,408x10 ⁵
Óxido de Manganês ^(b) (Oxidante)	MnO ₂	s	86,9369	19,231	221,2064	21,1 ^(f)	4.667,455
Querosene ^(a) (Diluyente)	C ₈ H ₁₈	L	114,23266	5,454	47,745	5.413,1 ^(f)	2,584x10 ⁵
Alamina – 336 (Extratante de U e Mo)	C ₃₀ H ₆₃ N (Tridecilamina)	L	437,837	9,67x10 ⁻⁶	2,21x10 ⁻⁵	19.976,6 ^(g)	0,441
Tridecanol (Modificante de U e Mo)	C ₁₃ H ₂₈ O	L	200,368	6,70x10 ⁻⁶	3,34x10 ⁻⁵	8.604,72 ^(g)	0,288
Cloreto de Sódio (Rextratante de U)	NaCl	s	58,443	2,79x10 ⁻³	4,776x10 ⁻²	14,3 ^(f)	0,683
Carbonato de Sódio (Reextratante de Mo e Regenerante de Amina)	Na ₂ CO ₃	s	105,9891	6,47x10 ⁻³	0,0610	41,5 ^(f)	2,533
Amônia ^(d) (Precipitante do U)	NH ₃	g	17,0305	0,53	31,156	337,9 ^(f)	1,052x10 ⁴
Hidróxido de Cálcio (Precipitante do Mo)	Ca(OH) ₂	s	74,09	14,51	195,843	53,7 ^(f)	1,052x10 ⁴
Cal ^(e)	CaO	s	56,08	119,614	2.132,917	110,2 ^(f)	2,351x10 ⁵
Calcário ^(e)	CaCO ₃	s	100,09	243,899	2.436,797	1,0 ^(f)	2,437x10 ³
Clorato de Bário ^(e)	BaCl ₂	s	208,25	0,205	0,984	61,3 ^(f)	60,343

Água ^(e)	H ₂ O	L	18,01534	2,692x10 ⁷	1,49x10 ⁹	0,9 ^(f)	1,345x10 ⁹
Total							1,35x10⁹

- (a) Fonte: Dados Específicos da Mineração de Urânio Complexo Industria da INB, Unidade Poços de Caldas, MG Referentes ao Ano Base de 1995.
- (b) Considerando consumo médio de 100kg H₂SO₄/t de minério e 5 kg MnO₂/ t de minério - Fonte: BLATT, V. ; “ *do Minério de Campo do Cercado, Poços de Caldas, MG* ” ; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974 [50].
- (c) Considerando 1.654.113 t de minério processado de 1982 a 1987 com 0,108% de U₃O₈ - Fonte: OLIVEIRA, M. L. M. & BENEDETTO, J. S.; “ *Plano de Monitoração de Efluentes e Ambiental do Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas* ”; Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Nov./1982 [52].
- (d) Fonte: CLEGG, Jonh W. & FOLEY, Dennis D., “ *Uranium Ore Processing* ”, United States Atomic Energy Commission, U.S.A, 1958 [68].
- (e) Insumos utilizados no tratamento de efluentes - Fonte: NUCLEBRÁS; “ *As Necessidades de Energia para a Construção e Operação de Centrais Nucleares* ”; Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento Assessoria de Planejamento; Relatório Juelich 1230/Agosto 1975 [53].
- (f) Fonte: SZARGUT, J. ; MORRIS, D. R. ; STEWARD, F. R. ; “ *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metalurgical Process* ”; Hemisphere Publishing Corporation, 1988 [4].
- (g) Exergia Química Calculada. Ver item 5.6

5.3 – TRATAMENTO QUÍMICO

O tratamento químico compreende o processamento químico do minério tratado fisicamente e o beneficiamento do urânio para obtenção dos produtos finais: Diuranato de Amônia (DUA) e o Molibdato de Cálcio (CaMO_4), conforme pode ser visto na Tabela 5.4. São considerados, também, os principais rejeitos sólidos, líquidos e gasosos.

5.3.1 – INSUMOS NA ETAPA DE TRATAMENTO QUÍMICO (Tabela 5.4)

Os insumos do tratamento químico foram abordados conforme abaixo e incluídos na Tabela 5.4. Existem várias lacunas, pois em alguns casos os insumos foram identificados, mas não quantificados, devido à falta de dados.

- ÓLEO COMBUSTÍVEL

O consumo de óleo combustível foi de 198 t, correspondendo a um consumo total de 5,623 kg de óleo combustível/kg U.

- ÁCIDO SULFÚRICO [50]

O consumo de ácido sulfúrico, com uma concentração de 200g/l no processo de lixiviação ácida é de 0,1 kg de H_2SO_4 /kg de minério, ou seja, considerando uma concentração de U_3O_8 em 0,092% ($9,2 \times 10^{-4}$ kg de U_3O_8 /kg de minério) ou $2,6 \times 10^{-4}$ kg de U/kg de minério, obtém-se um consumo de ácido sulfúrico de 384,615 kg H_2SO_4 /kg de U.

A concentração da lixívia, na saída da etapa de lixiviação, possui cerca de 0,003 kg/l de U_3O_8 e 0,003 kg/l de MoO_3 . [50].

- ÓXIDO DE MANGANÊS (OXIDANTE)

O consumo de óxido de manganês (MnO_2) é de 0,005 kg/kg de minério. Como a concentração média de U_3O_8 é de 0,092% ($2,6 \times 10^{-4}$ kg de U/kg de minério), obtém-se o consumo de 19,231 kg de MnO_2 /kg de U. [50]

- EXTRAÇÃO DE URÂNIO E MOLIBDÊNIO [56, 57]

O consumo de querosene, utilizado como diluente, foi de 237 m³ de acordo com dados específicos da Unidade de Poços de Caldas, no ano de 1995. Então, utilizando-se a entrada de urânio no processo de 35,214 t de U, tem-se o consumo de $6,73 \times 10^{-3}$ m³ de querosene/kg de U. Considerando a densidade média do querosene, de acordo com a Petrobrás (0,8014 g/ml, ou 810,4 kg/m³ [56]), encontra-se o consumo de 5,454 kg de querosene/kg de U.

O extratante utilizado é a alamina-336 (alquil alamina terciária – tricaprililamina, constituída de uma mistura de tri-decilamina – $\text{C}_{30}\text{H}_{63}\text{N}$, principalmente, e tri-octilamina – $\text{C}_{24}\text{H}_{51}\text{N}$) a 5% volume [57, 65, 69] diluída em um diluente, o querosene, a cerca de 91,5 % em volume com um modificante, o tridecanol (tridecil álcool – $\text{C}_{13}\text{H}_{28}\text{O}$) a 3,5 % em volume.

Com isso, a solução para extração por solvente, contém uma concentração de 5% em volume correspondente a 0,05 litros de alamina-336 por 1 litro de solução, ou seja, 0,05 l alamina-336/l. Como a vazão de entrada do solvente de 0,016 l/min¹ [56], tem-se $8,0 \times 10^{-4}$ l de alamina-336/min entrando nesta etapa. Como a densidade da alamina-336 é 0,81 kg/m³ obtém-se a vazão de $8,1 \times 10^{-4}$ kg/l ou $6,48 \times 10^{-7}$ kg alamina-336/min [Ref. 56]. Desta forma, em um ano, tem-se o consumo de 0,3406 kg de alamina-336. Considerando a entrada de 35,214 t de U, chega-se a $9,67 \times 10^{-6}$ kg alamina-336/kg U.

No caso do tridecanol ($\text{C}_{13}\text{H}_{28}\text{O}$ - modificante), a concentração no solvente é de 0,035 l de $\text{C}_{13}\text{H}_{28}\text{O}$ /l. Como a vazão de entrada do solvente é de 0,016 l/min [56], tem-se $5,6 \times 10^{-4}$ l de $\text{C}_{13}\text{H}_{28}\text{O}$ /min entrando nesta etapa. Sendo a densidade do tridecanol 0,8139

¹ Devido a falta de dados da Unidade de Poços de Caldas, utilizou-se dados de uma usina piloto abordada no trabalho de J. D. Neto [56]

kg/m³ [67] ou $8,139 \times 10^{-4}$ kg/l, tem-se a vazão de $4,56 \times 10^{-7}$ kg de C₁₃H₂₈O/min [56]. Então, em um ano, foram consumidos 0,239 kg de C₁₃H₂₈O. Considerando a entrada de 35,214 t de U, o consumo de tridecanol foi de $6,79 \times 10^{-6}$ kg de C₁₃H₂₈O/kg U.

- REEXTRAÇÃO DE URÂNIO

Nesta etapa, o extrato carregado de urânio e molibdênio na fase orgânica contém cerca de 0,00524 kg U₃O₈/l e 0,0024 kg MoO₃/l e a fase aquosa, contendo o reextratante, uma solução de cloreto de sódio (NaCl) a 1M (1 mol/l, ou seja, 0,058443 kg/l), acidulada com H₂SO₄ (pH =1) [56, 57]. A razão entre a fase orgânica e a fase aquosa (O/A) considerada, foi igual a 4 [58], ou seja, 4,0 l de extrato/1,0 l de NaCl acidulada com H₂SO₄. Então, considerando a vazão de NaCl igual a 0,0032 l/min [56], tem-se $1,87 \times 10^{-4}$ kg de NaCl/min entrando no processo. Com isso, em um ano, foram consumidos 98,296 kg de NaCl. Como entram 35,214 t de U neste processo, tem-se $2,791 \times 10^{-3}$ kg de NaCl/kg de U. O reextrato de urânio sai dessa etapa com 0,0206 kg U/l e 0,000054 kg MoO₃/l. [58].

- PRECIPITAÇÃO DE URÂNIO

Nesta etapa, é utilizado um precipitante de hidróxido de amônia (NH₄OH) com uma concentração de 100g/l e um consumo de 0,00076 kg NH₄OH/kg U₃O₈, ou seja, 0,000215 kg de NH₄OH/kg U. [58]. Também pode ser utilizado um outro precipitante, a amônia (NH₃), com um consumo de 0,15 kg de NH₃/kg U₃O₈ ou 0,53 kg NH₃/kg U, conforme dados do processamento químico do minério de urânio em “Salt Lake City”, Utah, E.U.A [68]. Por motivo de falta de dados da Unidade de Poços de Caldas adotou-se o consumo de 0,53 kg de NH₃/kg U neste trabalho.

- REEXTRAÇÃO DE MOLIBDÊNIO

Na fase aquosa, o reextrante utilizado é uma solução aquosa de carbonato de sódio (Na₂CO₃) a 1M (1mol/l) ou seja 0,106 kg Na₂CO₃/l, com uma razão de fase orgânica/aquosa (O/A) igual a 4 [56]. Como a vazão de Na₂CO₃ é 0,004 l/min e sua concentração é 1M, tem-se $4,24 \times 10^{-4}$ kg Na₂CO₃/min [56]. Então, em um ano foram

consumidos 222,854 kg Na_2CO_3 . Considerando a entrada de 34,449 t de U, chega-se ao consumo de $6,470 \times 10^{-3}$ kg de $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{kg}$ de U.

Na fase orgânica, o refinado orgânico chega carregado com $8,4 \times 10^{-5}$ kg $\text{U}_3\text{O}_8/\text{l}$ ($2,375 \times 10^{-5}$ kg U/l) e 0,0023 kg MoO_3/l [57] e com uma vazão de 0,0437 l/min [75]. Então, em um ano entra na etapa de reextração de molibdênio, 0,546 kg U. O reextrato de molibdênio sai com uma concentração de 0,0003 kg $\text{U}_3\text{O}_8/\text{l}$ e 0,0105 kg MoO_3/l [58].

- PRECIPITAÇÃO DE MOLIBDÊNIO [58]

Na fase aquosa, o precipitante utilizado é uma solução aquosa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) com uma concentração de 0,0024 kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{l}$ de solução e a razão volumétrica (O/A) é igual a 2 (2,0 l reextrato orgânico/l de solução aquosa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [65]). Com isso, obtém-se o consumo de 14,51 kg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{kg}$ U.

A fase orgânica chega, nesta etapa, com 0,0003 kg $\text{U}_3\text{O}_8/\text{l}$ ($8,48 \times 10^{-5}$ kg U/l) e 0,0105 kg MoO_3/l . [57]

- TRATAMENTO DE EFLUENTES [59]

Cal (CaO): De 1982 a 1987 o minério processado foi de 1.688.280 t, consumindo um total de 52.505 t de cal, que corresponde a $3,110 \times 10^{-2}$ kg de cal/kg de minério. Considerando a concentração de U_3O_8 de 0,092% ($2,6 \times 10^{-4}$ kg de U/kg de minério), obtém-se a 119,614 kg de cal/kg de U.

Calcário(CaCO_3): De 1982 a 1987, o consumo de calcário foi de 107.060 t, que corresponde a $6,341 \times 10^{-2}$ kg de calcário/kg de minério. Considerando a concentração de U_3O_8 de 0,092% ($2,6 \times 10^{-4}$ kg de U/kg de minério), obtém-se o consumo de 243,899 kg de calcário/kg de U.

Cloreto de Bário (BaCl_2): De 1982 a 1987 o consumo de BaCl_2 foi de 90.000 kg, que corresponde a $5,331 \times 10^{-5}$ kg de BaCl_2/kg de minério. Considerando a concentração de

U_3O_8 de 0,09% ($2,544 \times 10^{-4}$ kg de U/ kg de minério), obtém-se 0,205 kg de $BaCl_2$ / kg de U.

- ÁGUA

De acordo com dados da NUCLEBRÁS [53] o consumo de água por tonelada de minério foi de $7,0 \times 10^3$ kg de H_2O /kg de minério. Considerando, a concentração média do U_3O_8 igual a 0,092% ($2,6 \times 10^{-4}$ kg U/kg de minério), obtém-se o consumo de $2,692 \times 10^7$ kg de H_2O /kg U.

A Tabela 5.4 mostra os insumos da etapa de tratamento químico.

5.4 PRODUTOS, PERDAS E REJEITOS

Os produtos e rejeitos da extração, tratamento físico e do tratamento químico foram incluídos nas Tabelas 5.3 a 5.8. Nestas tabelas existem várias lacunas, pois em alguns casos o produto ou rejeito foram identificados, mas não foram quantificados, nem calculados ou estimadas suas exergias, devido à falta de dados.

- CONCENTRADO DE URÂNIO (“YELLOW CAKE”) – U_3O_8

Utilizando os dados específicos da Unidade de Poços de Caldas, o minério processado foi de 135.400 t em 1995. Considerando uma concentração de U_3O_8 igual 0,092%, tem-se 124,578 t de U_3O_8 (35,214 t de U) e a produção de concentrado de urânio, neste mesmo ano, também, foi igual a 124,578 t de U_3O_8 [79] Então, obtém-se 3,535 kg U_3O_8 /kg U. (Não foram consideradas as perdas de U_3O_8).

- MOLIBDATO DE CÁLCIO ($CaMoO_4$)

Utilizando os dados na Nuclebrás [33], tem-se que a produção nominal é de 625 t de $CaMoO_4$ /ano e, considerando a entrada de 35,214 t de U, conforme já citado, produz-se 17,748 kg $CaMo_4$ /kg U.

- PERDAS DE U_3O_8

De acordo com dados de J. C. Castro [79] o minério processado foi de 135.400 t em 1995 e produção de U_3O_8 , neste mesmo ano, foi de 124,578 t. Então, como o teor do minério processado é de 920 ppm e pode-se considerar uma das duas hipóteses:

- 1) minério processado é a quantidade que entrou na etapa de tratamento físico e, neste caso, não considerou-se haver perdas de U_3O_8 nem no tratamento físico nem no tratamento químico;
- 2) minério processado é a quantidade de minério que entrou no tratamento químico e, neste caso, não se tem a quantidade de minério que entrou no tratamento físico e nem as perdas neste tratamento.

Devido a essas dúvidas optou-se por adotar que não houve perdas de U_3O_8 , pois de acordo com os dados de J. C. Castro [79] a quantidade de U_3O_8 contida no minério processado que entrou, em 1995, foi igual a quantidade de U_3O_8 produzida neste mesmo ano.

- PERDAS DE ENERGIA ELÉTRICA

O consumo de energia elétrica, de acordo com dados da Unidade de Poços de Caldas, no ano base de 1995, foi de 16.586 MWh, considerando as perdas de 10% (1.658,6 MWh), tem-se perdas de energia elétrica igual a 0,047 MWh/kg de U e como 1 kWh = $3,6 \times 10^3$ kJ, obtém-se as perdas de energia elétrica igual a $1,692 \times 10^5$ kJ/kg de U.

Tabela 5.5 – Produtos do Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG, para Concentração de 0,092% de U₃O₈

PRODUTO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO s – sólido l – líquido g – gasoso	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO		EXERGIA	
				(kg/kg U)	(mol/kg U)	(kJ/mol)	(kJ/kg U)
<i>Concentrado de Urânio</i> <i>(“Yellow Cake”)^{(a)(b)}</i>	<i>U₃O₈</i>	s	842,085	3,535 ^{(a)(b)}	4,198	218,5	917,244
<i>Molibdato de Cálcio^{(b)(c)}</i>	<i>CaMoO₄</i>	s	200,0176	17,748 ^(b)	88,732	*	*

(a) Devido a falta de dados na literatura técnica disponível e dados para estimar a exergia química do DUA, o mesmo foi considerado como U₃O₈.

(b) Considerando 124,577 t U₃O₈ e 625 t CaMoO₄ - Fonte: NUCLEBRÁS, "Complexo Mineral Industrial de Poço de Caldas", Maio/1982 [33] e INB [79]

(c) Ver item 5.6.3

(*) Valores não encontrados na literatura técnica disponível e sem possibilidades de calcular/estimar devido à falta de dados.

Tabela 5.6– Rejeitos Proveniente da Extração, Tratamento Físico e Químico do Minério de Urânio

REJEITO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO s – sólido L – líquido g - gasoso	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO		EXERGIA	
				(kg/kg U)	(mol/kg U)	(kJ/mol)	(kJ/kg U)
Sulfato ^(b)	SO ₄	s	96,0616	10,0	104,01	*	*
Nitrato ^(b)	NO ₃	s	62,0049	0,17	2,742	*	*

<i>Alumínio</i>	<i>Al</i>	s	26,9815	*	*	888,4 ^(a)	*
<i>Cálcio</i> ^(b)	<i>Ca</i>	s	40,08	0,0013	0,0318	712,4 ^(a)	22,654
<i>Manganês</i>	<i>Mn</i>	s	54,9381	*	*	482,3 ^(a)	*
<i>Flúor</i> ^(b)	<i>F₂</i>	g	37,9968	0,0013	0,0342	466,3 ^(a)	15,947
<i>Zircônio</i>	<i>Zr</i>	s	91,22	*	*	*	*
<i>Magnésio</i>	<i>Mg</i>	s	24,312	*	*	633,8 ^(a)	*
<i>Potássio</i>	<i>K</i>	s	39,102	*	*	366,6 ^(a)	*
<i>Sódio</i> ^(b)	<i>Na</i>	s	22,9898	0,08	3,48	336,6 ^(a)	1.171,37
<i>Cloro</i> ^(b)	<i>Cl</i>	L	35,453	0,14	3,95	87,1 ^(a)	344,045
<i>Molibdênio</i> ^(b)	<i>Mo</i>	s	95,94	0,0028	0,0292	730,3 ^(a)	21,325
<i>Fósforo</i>	<i>P</i>	s	30,9798	*	*	875,8 ^(a)	*
Arsênio ^(b)	<i>As</i>	s	96,0576	0,0003	0,003	*	*
Bário ^(b)	<i>Ba</i>	s	137,33	0,00006	0,0004	747,70 ^(a)	0,3
Níquel ^(b)	<i>Ni</i>	s	58,59	0,00048	0,0082	*	*

<i>Ferro</i>	<i>Fe</i>	s	55,847	*	*	376,4 ^(a)	*
<i>Ácido Sulfúrico</i>	<i>H₂SO₄</i>	L	98,077	*	*	163,4 ^(a)	*
<i>Fluoridreto</i>	<i>HF</i>	g	20,0064	*	*	80,0 ^(a)	*
<i>Ácido Carbônico</i>	<i>HCO₃</i>	L	61,0173	*	*	*	*
<i>Amônia^(b)</i>	<i>NH₃</i>	g	17,0305	0,14	8,221	337,9 ^(a)	2.777,72
<i>Total</i>							4.353

(a) Fonte: SZARGUT, J. ; MORRIS, D. R. ; STEWARD, F. R. ; "Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metalurgical Process"; Hemisphere Publishing Corporation, 1988 [4].

(b) Fonte: DONES R., GANTNER U. & HIRSCHBERG S. , "Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland", Paul Scherrer Institut, Februari/1996 [59].

(*) Valores não encontrados na literatura técnica disponível e sem possibilidades de calcular/estimar devido a falta de dados.

Tabela 5.7 – Emissões de Rejeitos Eliminados na Atmosfera Proveniente do Tratamento Químico do Minério de Urânio

REJEITO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO s – sólido L – Líquido g – gasoso	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO		EXERGIA	
				(kg/kg U)	(mol/kg U)	(kJ/mol)	(kJ/kg U)
<i>Particulados^(a)</i> (Poeira do Minério + Rejeito)	*	g	*	2,490	*	*	*
<i>Hidrocarbonetos^(a) – Diluente Orgânico (92% Querosene)</i>	C_8H_{18}	L	114,23266	1,527	13,686	5.413,1 ^(c)	7,237x10 ⁴
<i>Trióxido de Enxofre^{(a) (b)}</i>	SO_3	g	80,0622	0,051	0,635	249,1 ^(c)	158,165
<i>Dióxido de Nitrogênio^{(a) (b)}</i>	NO_2	g	46,0055	0,0114	0,248	55,6 ^(c)	13,792
<i>Dióxido de Enxofre^{(a) (b)}</i>	SO_2	g	64,0628	0,00228	0,0356	313,4 ^(c)	11,166
Total							7,26x10⁴

(a) Dados Referentes a produção de 341 tonelada de U_3O_8 /ano (96,390 t de U/ano) para um reator. Fonte: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY AND RESOURCES FOR THE FUTURE ; “Estimating Externalities of Nuclear Fuel Cycles” ; A Study by the U.S. Department of Energy and the Commission of the European Communities [60].

(b) Dados referentes a Queima de Óleo Combustível.

(c) Fonte: SARGUT, J. ; MORRIS, D. R. ; STEWARD, F. R. ; "Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metalurgical Process"; Hemisphere Publishing Corporation, 1988 [4].

Tabela 5.8 – Emissões de Rejeitos Eliminados na Atmosfera Proveniente dos Equipamentos Mecânicos a Gasolina e a Diesel Utilizados na Extração e Tratamento Físico do Minério de Urânio

REJEITO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO s – sólido L – Líquido g – gasoso	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO		EXERGIA	
				(kg/kg U)	(mol/kg U)	(kJ/mol)	(kJ/kg U)
<i>Particulados^(a)</i>	*	g	*	0,0134	*	*	*
<i>Óxido de Carbono^(a)</i>	<i>CO</i>	g	28,0105	0,0654	2,333	282,984	660,313
<i>Hidrocarbonetos^(a)</i> <i>(principalmente, proveniente de óleo diesel)</i>	<i>C₁₆H₃₄</i>	g	226,44938	0,0187	0,0825	10.639,7 ^(b)	877,402
<i>Dióxido de Nitrogênio^(a)</i>	<i>NO₂</i>	g	46,0055	0,268	5,818	55,6 ^(b)	323,484
<i>Dióxido de Enxofre^(a)</i>	<i>SO₂</i>	g	64,0628	0,0187	0,292	313,4 ^(b)	91,335
Total							1.952

(a) Dados Referentes a produção de 340,8 tonelada de U₃O₈/ano (96,390 t de U/ano) para um reator. Fonte: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY AND RESOURCES FOR THE FUTURE ; “*Estimating Externalities of Nuclear Fuel Cycles*” ; A Study by the U.S. Departamnt of Energy and the Commission of the European Communities [60].

(b) Fonte: SARGUT, J. ; MORRIS, D. R. ; STEWARD, F. R. ; “*Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metalurgical Process*”; Hemisphere Publishing Corporation, 1988 [4].

5.5 – ESTIMATIVAS DAS EXERGIAS

5.5.1 – ETAPA DE EXTRAÇÃO

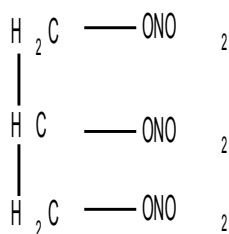
Não foi possível calcular as exergias dos seguintes óxidos: ThO_2 , Nb_2O_5 , Y_2O_3 e Ga_2O_3 , constituintes do minério de urânio, devido à falta das exergias padrão dos mesmos na literatura técnica disponível. Devido à baixa concentração média, cerca de 0,0915%, destes quatro compostos no minério de urânio do Planalto de Poço de Caldas, MG, eles não interferem substancialmente no cálculo da exergia dos insumos da etapa de extração.

- ALIMENTAÇÃO – U_3O_8

Conforme, já obtido anteriormente, tem-se 124,578 t de U_3O_8 , que corresponde a 35,214 t de U, contido no minério extraído e como a exergia química do U_3O_8 é 218,5 kJ/mol [4] e a massa molecular do U_3O_8 é 842,085 g/mol, tem-se a exergia química do U_3O_8 igual a 259,475 kJ/kg U_3O_8 (917,846 kJ/kg U). Então, obtém-se a exergia de urânio que entra no processo igual a $3,232 \times 10^7$ kJ.

- NITROGLICERINA – $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$

A fórmula estrutural da nitroglicerina pode ser representada por [63, 70]:



Utilizando a fórmula estrutural, acima, dividindo-a em vários grupos de compostos orgânicos e utilizando as tabelas de exergias químicas dos grupos de compostos orgânicos de Szargut [4] e somando as exergias químicas dos compostos existentes na nitroglicerina, conforme abaixo:

$$b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{CH}}_2) = 651,46 \text{ KJ/mol}$$

$$b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{CH}}) = 545,27 \text{ KJ/mol}$$

$$b_{\text{ch}}^0(-\text{O}-) = -86,52 \text{ KJ/mol}$$

$$b_{\text{ch}}^0(-\text{NO}_2) = 12,16 \text{ KJ/mol}$$

$$b_{\text{ch}}^0[\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3] = 2 \cdot b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{CH}}_2) + b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{CH}}) + 3 \cdot b_{\text{ch}}^0(-\text{O}-) + 3 \cdot b_{\text{ch}}^0(-\text{NO}_2) = 1.625,11 \text{ KJ/mol}$$

Então obtém-se, a exergia química da nitroglicerina igual a 1.625,11 kJ/mol.

5.5.2 – ETAPA DE TRATAMENTO QUÍMICO

- ÓLEO COMBUSTÍVEL

Considerando a Equação 10 da Tabela 3.3, aplicada a combustíveis líquidos, de SZARGUT [4]:

$$\beta = 1,04011 + 0,1728 \cdot (Z_{\text{H}_2}/Z_{\text{C}}) + 0,0432 \cdot (Z_{\text{O}_2}/Z_{\text{C}}) + 0,2169 \cdot (Z_{\text{S}}/Z_{\text{C}}) \cdot [1 - 2,0628 \cdot (Z_{\text{H}_2}/Z_{\text{C}})] \pm 5\% \quad (5.1)$$

onde:

Z_i/Z_C = fração em massa do constituinte i no combustível líquido e

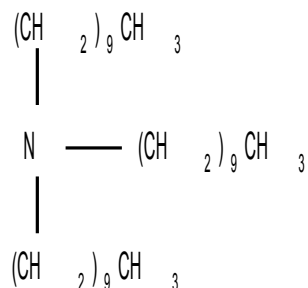
$\beta = b_{\text{ch}}/C_1$ = razão entre a exergia química padrão do combustível líquido e seu poder calorífico inferior.

Considerando, para o óleo combustível, a composição química de carbono, hidrogênio, enxofre e a capacidade calorífica inferior: $Z_C = 84\%$, $Z_{\text{H}_2} = 15\%$, $Z_{\text{S}} = 1\%$ e $C_1 = 39.500 \text{ kJ/kg}$ [4], obtém-se

para exergia química do óleo combustível o valor de 42.383,5 kJ/kg. Como a quantidade de óleo combustível estimada foi de 5,623 kg/kg U, obtém-se: $2,383 \times 10^5$ kJ/kg U.

- ALAMINA-336 (TRIDECILAMINA) – $C_{30}H_{63}N$

A fórmula estrutural da alamina-336 pode ser representada por: [64, 69]



Utilizando a fórmula estrutural acima, dividindo-a em vários grupos de compostos orgânicos e utilizando as tabelas de exergias dos grupos de compostos orgânicos de Szargut [4] e somando as exergias dos vários grupos de compostos orgânicos existentes na alamina-336, conforme abaixo:

$$b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{CH}}_2) = 651,46 \text{ KJ/mol}$$

$$b_{\text{ch}}^0(-\text{CH}_3) = 752,03 \text{ KJ/mol}$$

$$b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{N}}-) = 651,46 \text{ KJ/mol}$$

$$b_{\text{ch}}^0(C_{30}H_{63}N) = 27 \cdot b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{CH}}_2) + 3 \cdot b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{CH}}_3) + 3 \cdot b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{N}}-) = 19.976,6 \text{ KJ/mol}$$

Então obtém-se, a exergia química da alamina-336 de 19.976,6 kJ/mol.

- TRIDECANOL – $C_{13}H_{28}O$

Considerando para o tridecanol a seguinte fórmula estrutural, conforme Lide [67]:



$$b_{\text{ch}}^0(-\overset{|}{\text{CH}}_2) = 651,46 \text{ KJ/mol}$$

$$b_{\text{ch}}^0(-\text{CH}_3) = 752,03 \text{ KJ/mol}$$

$$b^0_{\text{ch}}(-\text{OH}) = 33,97 \text{ KJ/mol}$$

$$b^0_{\text{ch}}[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{OH}] = b^0_{\text{ch}}(-\text{CH}_3) + 12 \cdot b^0_{\text{ch}}(-\overset{1}{\text{CH}_2}) + b^0_{\text{ch}}(-\text{OH})$$

Dividindo-a em vários grupos de compostos orgânicos e utilizando as tabelas de exergias dos grupos de compostos orgânicos de Szargut [4] e somando as exergias químicas de vários compostos orgânicos existentes no tridecanol, obtém-se a exergia química do tridecanol de 8.604,72 kJ/mol.

5.5.3 – ETAPA DE PRODUÇÃO E PERDAS

- CONCENTRADO DE URÂNIO (“YELLOW CAKE”) – U_3O_8

Conforme o cálculo já realizado no item 5.4, tem-se a produção de 3,535 kg U_3O_8 /kg U. Como a exergia química do U_3O_8 é 218,5 kJ/mol [4] e a massa molecular do U_3O_8 é 842,085 g/mol, tem-se a exergia química de 259,475 kJ/kg U_3O_8 . Então, chega-se a 911,24 kJ/kg U.

- MOLIBDATO DE CÁLCIO - CaMoO_4 [4]

A atmosfera pode servir como estado de referência para somente 10 elementos químicos. Espécies de referência para outros elementos poderiam ser as espécies sólidas mais comumente encontradas na superfície terrestre como a dos produtos de intempéries (desgaste provocado pelo tempo) como os óxidos, carbonatos, sulfatos. No entanto, a composição química da superfície terrestre é pouco definida e um cálculo exato das funções termodinâmicas de tais espécies de referência é difícil de ser feito em um caminho que seja consistente.

Portanto, Morris e Steward [80] e Szargut [81] propuseram que os íons ou compostos dissolvidos em água do mar seriam usados como espécies de referência para alguns elementos. Como a teoria das funções termodinâmicas é, contudo, suficientemente exata somente para íons monovalentes e bivalentes as espécies de referência iônica podem ser adotadas somente para tais elementos que aparecem na água do mar na forma de íons monovalentes e/ou bivalentes. Em

certos casos moléculas não ionizadas contendo o elemento químico em consideração existe em concentração suficiente na água do mar de tal forma que esta espécie pode ser usada como referência.

Cálculos mostram que a adoção de espécies de referência dissolvidas em água do mar ocasionalmente conduzem a resultados insatisfatórios. As condições termodinâmicas de uma espécie química pode ser diferente sobre a superfície terrestre daquela em água do mar. Minerais presentes sobre a superfície terrestre podem interagir com a água doce e oxigênio, produzindo produtos de intempéries que não estão em equilíbrio com a água do mar. Os valores de exergia química de alguns elementos calculados através de espécies dissolvidas em água do mar conduzem a valores negativos de alguns produtos de intempéries comuns na superfície terrestre. Tais resultados tem sido obtidos para dolomita $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ e para alguns óxidos (MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4).

Portanto, para elementos como Mg, Mn, Co e P, a suposição de espécies de referência sólidas presentes sobre a superfície terrestre tem sido inevitável. Valores de exergia química de elementos obtidos deste modo são maiores do que os valores obtidos em relação a composição da água do mar. Os valores negativos de exergia química podem e devem ser aceitos somente para os nitratos $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 e NaNO_3 . O nitrato não pode servir como uma espécie de referência, porque outros compostos de Ca, K e Na são consideravelmente mais abundantes na superfície terrestre.

Como a energia livre de Gibbs encontrada no manual de físico-química de Lide [67] é negativa, encontrou-se um resultado negativo, também, ao estimar a exergia química do molibdato de cálcio, supõe-se que este resultado se deve as incertezas mencionadas, anteriormente, por Szargut [4]. Por isso, não se considerou no presente trabalho, a exergia química do molibdato de cálcio

- PERDAS DE U_3O_8

Conforme mencionado, anteriormente, no item 5.4, optou-se por adotar que não houve perdas de U_3O_8 , pois de acordo com os dados de J. C. Castro [79] a quantidade de U_3O_8 contida no minério processado que entrou, em 1995, foi igual a quantidade de U_3O_8 produzida neste mesmo ano.

5.6 – CÁLCULO DO GRAU CUMULATIVO DE PERFEIÇÃO DA MINERAÇÃO ATÉ A PRODUÇÃO DE CONCENTRADO DE URÂNIO

Neste item, através das Tabelas 5.3 a 5.8, obteve-se a exergia de alimentação, o somatório das exergias de entrada (insumos), o somatório das exergias de saída (produto útil), o somatório das exergia das perdas e o somatório das exergias dos rejeitos, conforme mostra a Tabela 5.9.

O produto útil da mineração até a produção de concentração de urânio da Unidade de Caldas era o DUA (Diuranato de Amônia), no entanto, devido a dificuldade de obtenção da exergia química deste composto em literatura técnica disponível e também devido à falta de dados para estimá-la, optou-se por adotar como produto útil, em substituição ao DUA, o U_3O_8 .

Conforme dados de J. C. Castro [79] o minério processado foi de 135.400 t em 1995 e produção de U_3O_8 , neste mesmo ano, foi de 124,578 t. Então, o teor do minério processado é de 920 ppm e pode-se considerar uma das duas hipóteses:

- 3) minério processado é a quantidade que entrou na etapa de tratamento físico e, neste caso, não considerou-se haver perdas de U_3O_8 nem no tratamento físico nem no tratamento químico;
- 4) minério processado é a quantidade de minério que entrou no tratamento químico e, neste caso, não se tem a quantidade de minério que entrou no tratamento físico e nem as perdas neste tratamento.

Devido a essas dúvidas optou-se por adotar que não houve perdas de U_3O_8 , pois de acordo com os dados de J. C. Castro [79] a quantidade de U_3O_8 contida no minério processado que entrou, em 1995, foi igual a quantidade de U_3O_8 produzida neste mesmo ano.

A Tabela 5.9 está subdividida conforme os itens a seguir:

- Exergia de alimentação (U_3O_8);
- Exergia dos insumos nas etapas de extração, tratamento físico e tratamento químico;
- Exergia do produto útil (“yellow cake”);
- Exergia das perdas (U_3O_8 , energia elétrica) e Exergia dos rejeitos.

TABELA 5.9 - Somatório das Exergias Químicas dos Insumos, Produtos, Perdas e Rejeitos.

Etapa	Total (kJ/kg U)
- Alimentação (U_3O_8)	917,846 ^(a)
Insumos	
- Extração + Tratamento Físico	$9,71 \times 10^7$
- Tratamento Químico	$1,35 \times 10^9$
Total de Insumos	$1,45 \times 10^9$
Produtos	
- Concentrado de Urânio (“yellow cake”)	917,24
Total de Produtos	917,24
Perdas	
- U_3O_8	0,0
- Energia Elétrica	$1,692 \times 10^5$
Total de Perdas	$1,692 \times 10^5$
Total de Rejeitos	$7,89 \times 10^4$

(a) Exergia química padrão do U_3O_8 .

Para o cálculo do grau cumulativo de perfeição do processo utilizou-se a razão entre a exergia de saída (produto útil – "yellow cake") e a exergia de entrada (dos insumos) e os dados da Tabela 5.9, conforme a expressão:

$$h_p = \frac{\sum (\text{exergia do produto útil})}{\sum (\text{exergia de entrada})} = \frac{917,24}{917,846 + 1,45 \times 10^9} = 6,0 \times 10^{-7} \text{ ou } 0,00006$$

Capítulo 6 – ANÁLISE EXERGÉTICA DA MINERAÇÃO ATÉ A PRODUÇÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

Nesta etapa, foi feito o acoplamento da análise exergética da mineração e concentração de urânio com a análise exergética da produção de UF_6 e, em seguida, foi estimado o grau cumulativo de perfeição desta etapa do ciclo do combustível nuclear. Para isto foram consideradas as quantidades de insumos necessários para a purificação do urânio e conversão do DUA, abordadas na dissertação de mestrado de C. G. de Azevedo [21].

Todos os valores de insumos foram quantificados em kg por kg de urânio que entra na etapa de extração (35,214 t de U), o que permite realizar o acoplamento das duas etapas, isto é, dos resultados obtidos neste trabalho e aqueles obtidos na dissertação de mestrado de C. G. de Azevedo [21]. As Tabelas 6.1 e 6.2, a seguir, mostram os insumos da etapa de purificação e os insumos da etapa de conversão do DUA em UF_6 .

Tabela 6.1 – Insumos da Etapa de Purificação

INSUMO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO s – sólido l – líquido g - gasoso	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO		EXERGIA	
				(kg/kg U)	(mol/kgU)	(kJ/mol)	(kJ/kgU)
Ácido Nítrico 14,8M	HNO ₃	l	63,0129	1,045	16,576	30,9 ^(b)	512,2
Amônia	NH ₃	g	17,0305	0,22	12,9	337,9 ^(a)	4.359
Carbonato de Sódio	Na ₂ CO ₃	s	105,9891	0,028	0,264	41,5 ^(a)	10,96
Nitrato de amônia	NH ₄ NO ₃	s	80,04348	0,011	0,137	294,8 ^(a)	40,39
Sulfato de sódio	Na ₂ SO ₄	s	142,041	0,2	1,408	21,4 ^(a)	30,13
Hidróxido de sódio	NaOH	s	39,9972	0,12	3,0	74,9 ^(a)	224,7
Água	H ₂ O	l	18,01534	22,0	1.221,2	0,9 ^(a)	1.099
Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	l	170,34012	0,0474	0,279	8.029,4 ^(a)	2.240
Terra de Infusórios	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	s	277,134	0,021	0,076	61,3 ^(a)	4,65
Óleo Diesel	C ₁₆ H ₃₄	l	226,44938	0,323	1,426	10.639,7 ^(a)	15.172
Energia Elétrica							13.032
Total							36.725

(a) Fonte: SARGUT, J. ; MORRIS, D. R. ; STEWARD, F. R. ; "Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Process"; Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

(b) Exergia calculada conforme AZEVEDO, Carlos Vicente Goulart de [21]

Tabela 6.2 – Insumos da Etapa de Conversão do DUA em UF₆

INSUMO	FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO	MASSA MOLECULAR (g)	INSUMO		EXERGIA	
				(kg/kgU)	(mol/kgU)	(kJ/mol)	(kJ/kgU)
Amônia	NH ₃	g	17,0305	0,055	3,23	337,9 ^(a)	1.091,4
Fluoridreto	HF	g	20,00064	0,370	18,49	80,0 ^(a)	1.479,2
Flúor	F ₂	g	37,9968	0,176	4,63	466,3 ^(a)	2.159,9
Nitrogênio	N ₂	g	28,0134	0,250	8,92	0,72 ^(a)	6,4
Energia Elétrica							46.341
Total							51.078

(a) Fonte: SZARGUT, J. ; MORRIS, D. R. ; STEWARD, F. R. ; "Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Process"; Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

6.1 – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA DA MINERAÇÃO ATÉ A PRODUÇÃO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO

Conforme as Tabelas 5.3 a 5.8 e 6.1 e 6.2, obteve-se a exergia de alimentação, o somatório das exergias de entrada (insumos), o somatório das exergias de saída (produto útil), o somatório das exergia das perdas e o somatório das exergias dos rejeitos, conforme mostra a Tabela 5.9. A Tabela 6.3, a seguir, está subdividida conforme esta discriminação.

- Exergia de alimentação (U_3O_8);
- Exergia dos insumos nas etapas de extração, tratamento físico e tratamento químico;
- Exergia dos insumos na purificação e na conversão de DUA em UF_6 ;
- Exergia do produto útil (UF_6);
- Exergia das perdas (U_3O_8 , energia elétrica) e
- Exergia dos rejeitos.

TABELA 6.3 - Somatório das Exergias Químicas dos Insumos, Produtos, Perdas e Rejeitos.

Etapa	Total (kJ/kg U)
- Alimentação (U_3O_8),	917,846 ^(a)
Insumos	
- Extração + Tratamento Físico	$9,71 \times 10^7$
- Tratamento Químico	$1,35 \times 10^9$
- Purificação	36.725
- Conversão do DUA em UF_6	51.078
Total de Insumos	$1,45 \times 10^9$
Produtos	
- Hexafluoreto de Urânio (UF_6)	615,72 ^(b)
Total de Produtos	615,72 ^(b)
Perdas	
- U_3O_8	0,0
- Energia Elétrica	$1,692 \times 10^5$

Total de Perdas	1,692 x 10 ⁵ (c)
<i>Total de Rejeitos</i>	7,89 x 10 ⁴

- (a) Exergia química padrão do U₃O₈
- (b) Considerando 0,418 kg UF₆/kg U [85] e a exergia química padrão do UF₆ igual a 518,5 kJ/mol ou 1.473,01 kJ/kg UF₆ [21].
- (c) Não foram considerados os rejeitos da etapas de purificação e conversão do DUA em UF₆.

A partir da Tabela 6.3 pode se efetuar o cálculo do grau cumulativo de perfeição da etapa do ciclo de combustível nuclear que vai desde a mineração de urânio até a produção de UF₆. Para isto, utilizou-se a razão entre a exergia de saída (produto útil – UF₆) e a exergia de entrada (dos insumos), conforme a expressão e os dados da Tabela 6.3:

$$h_p = \frac{\sum (\text{exergia do produto útil})}{\sum (\text{exergia de entrada})} = \frac{615,72}{917,846 + 1,45 \times 10^9} = 4,2 \times 10^{-7} \text{ ou } 0,00004$$

Capítulo 7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com os dados das tabelas 5.3 a 5.8 e 6.1 e 6.2 verifica-se que o total de insumos exergéticos nas etapas de extração, tratamento físico e tratamento químico do minério de urânio, purificação e conversão do DUA em UF_6 foi de $1,45 \times 10^9$ kJ/kg U, sendo que a etapa de tratamento químico contribui com cerca de 73,3%, ficando o restante (etapas de extração, tratamento físico, purificação e conversão do DUA em UF_6) com 26,7%.

O produto útil na análise exergética da produção de U_3O_8 do Planalto de Poços de Caldas, MG, foi o concentrado de urânio (DUA). Entretanto, devido à dificuldade em encontrar a exergia química padrão do DUA na literatura técnica disponível e também devido a falta de dados para estimá-la, ela foi adotada como sendo a exergia química do U_3O_8 .

O total de perdas considerado foi de $1,692 \times 10^5$ kJ/kg U, sendo referente somente às perdas de energia elétrica, não se tendo dados sobre as perdas de U_3O_8 e dos demais insumos. As perdas de U_3O_8 no processo de mineração e concentração de urânio não foram consideradas, pois de acordo com dados de J. C. Castro [79], a mesma quantidade de U_3O_8 contida no minério processado, em 1995, que entrou no processo foi igual a que saiu, neste mesmo ano.

Nas etapas de extração e tratamento físico do minério de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG, do total de insumos exergéticos de $9,71 \times 10^7$ kJ/kg U, 92,3% refere-se ao explosivo nitroglicerina ($8,961 \times 10^7$ kJ/kg U). Juntando os insumos dos principais constituintes do minério de urânio SiO_2 , Al_2O_3 e o K_2O com a nitroglicerina e a energia elétrica, obtém-se 97,84% do total de insumos exergéticos consumidos nestas duas etapas.

Na etapa de tratamento químico, do total de insumos exergéticos de $1,35 \times 10^9$ kJ/kg U, 99,63% ($1,345 \times 10^9$ kJ/kg U) refere-se à água, devido a grande quantidade deste insumo utilizada em todo processo. A quantidade dos insumos tridecanol (modificante) e alamina-336 (extratante), em kg/kg U, utilizados na extração do molibdênio, podem parecer a princípio muito pequenas, no entanto, ressalta-se que os dados utilizados para a quantificação destes insumos foram tirados do trabalho de J. D. Neto [56].

Na etapa de rejeitos da mineração e concentração de urânio, do total de rejeitos quantificados de $7,89 \times 10^4$ kJ/kg U, 91,72% ($7,237 \times 10^4$ kJ/kg U) referente ao querosene utilizado como diluente na etapa de extração do urânio e molibdênio no tratamento químico. Nas etapas de purificação e conversão do DUA em UF_6 não foram quantificados os rejeitos, pois estes não foram abordados na dissertação de mestrado de C. V. G de Azevedo [21].

O grau cumulativo de perfeição da análise exergética da mineração e concentração de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG, aqui estudada resultou no valor de 0,00006% e o grau cumulativo de perfeição da análise exergética da mineração até a produção de UF_6 foi de 0,00004%. Estes valores, baixíssimos, devem-se ao elevado investimento de insumos exergéticos nas etapas de extração, tratamento físico, tratamento químico, purificação e conversão do DUA em UF_6 . A eficiência exergética será recuperada com a irradiação do combustível nuclear (exergia da fissão nuclear), o que se dará em outra etapa do ciclo do combustível nuclear: irradiação do reator para geração de energia elétrica.

Portanto, deve haver uma linha de separação entre a análise exergética associada ao composto de urânio entre etapas anteriores à queima do combustível nuclear no reator e as etapas posteriores à queima do combustível nuclear no reator.

A análise exergética das etapas posteriores do ciclo combustível nuclear (enriquecimento isotópico, produção de dióxido de urânio, fabricação de pastilhas, vareta e do elemento combustível, carregamento nuclear, irradiação do combustível nuclear, reprocessamento) não foram ainda estudadas. No entanto, pretende-se fazê-las em futuras dissertações, para que se estime o grau cumulativo de perfeição de todo o ciclo do combustível nuclear.

Capítulo 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O grau cumulativo de perfeição da análise exergética da mineração e concentração de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG, aqui estudada resultou no valor de 0,00006% e o grau cumulativo de perfeição da análise exergética da mineração até a produção de UF₆ foi de 0,00004%. Estes valores, baixíssimos, devem-se ao elevado investimento de insumos exergéticos nas etapas de extração, tratamento físico, tratamento químico, purificação e conversão do DUA em UF₆. O grau cumulativo de perfeição será recuperado com a irradiação do combustível nuclear (exergia da fissão nuclear), o que se dará em outra etapa do ciclo do combustível nuclear: irradiação do reator para geração de energia elétrica.

Diminuindo o insumo exergético nitroglicerina em 10%, chega-se a $8,74 \times 10^7$ kJ/kg U, e refazendo o cálculo do grau cumulativo de perfeição somente para etapa de extração do minério de urânio, obtém-se um grau cumulativo de perfeição igual a 0,001%, cerca de 17 vezes maior que o grau cumulativo de perfeição da análise exergética da mineração e concentração de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG, já calculado (0,00006%). Então, conclui-se que a redução deste insumo exergético implica em um substancial aumento do grau cumulativo de perfeição.

No entanto, diminuindo o insumo exergético água em 10%, obtém-se $1,216 \times 10^9$ kJ/kg U, e refazendo o cálculo do grau cumulativo de perfeição para mineração e concentração de urânio, obtém-se 0,00007% que é cerca de 1,17 vezes maior do que grau cumulativo de perfeição da análise exergética da mineração e concentração de urânio do Planalto de Poços de Caldas, MG. Com isto, a diminuição deste insumo exergético não implica no aumento do grau cumulativo de perfeição.

Como já dito, anteriormente, no capítulo de análise de resultados, o constituinte que está presente em maior quantidade no rejeito, em valores de exergia, é o querosene (91,72%). Por isto, uma proposta de melhoria do processo é a diminuição das perdas de querosene que implicaria no aumento do grau cumulativo de perfeição do processo.

Portanto, deve haver uma linha de separação entre a análise exergética associada ao composto de urânio entre etapas anteriores à queima do combustível nuclear no reator e as etapas posteriores à queima do combustível nuclear no reator.

O valor do grau cumulativo de perfeição das etapas iniciais do ciclo de combustível nuclear que vão desde a mineração até a concentração de urânio, não levou em consideração vários insumos, tanto energéticos como de materiais, das etapas de extração, tratamento físico e químico devido à dificuldade de obtenção de dados. Por isso, para obtenção destes dados, em alguns casos, foram utilizados dados de trabalhos não específicos da mineração e da usina de concentração de urânio estudada (Complexo Industrial da INB, Unidade de Poços de Caldas, MG).

Houve, também, um grande dificuldade na obtenção de exergias químicas de algumas substâncias, que não estão disponíveis na literatura técnica. Por isso, optou-se, quando possível, por calculá-las através de equações e das exergias químicas dos constituintes dessas substâncias. No caso específico do molibdato de cálcio, optou-se por não considerar sua exergia química, devido incerteza em estabelecer qual a espécie química de referência.

A metodologia adotada neste trabalho poderá ser aplicada na mineração de urânio da Unidade de Lagoa Real, BA, em fase inicial de exploração.

Esta mesma análise poderá ser realizada para outros tipos de mineração vindo a ser uma ferramenta valiosa para estabelecer parâmetros que levem a tomadas de decisões para a melhor utilização possível dos recursos naturais esgotáveis.

Deve haver uma maior interação entre a indústria e a Universidade, para que trabalhos como este e outros, que virão a seguir na mesma linha, tenham uma maior credibilidade e venham a contribuir com a avaliação de problemas ambientais e de escassez de recursos naturais, principalmente de recursos energéticos, visto que estes são problemas que desafiam a sobrevivência da humanidade.

REFERÊNCIAS

- [1]. GOUY, G. J. , “*Physique 2ème série*”, vol. 8, pág. 501, 1889.
- [2]. STODOLA, A. Z., d. V.D.I, vol. 32, pág. 1086, 1898.
- [3]. RANT , Z. , “*Forsch Ing.-Wies.*”, vol. 22, No. 1, pág. 36, 1956.
- [4]. SZARGUT, J. ; MORRIS, D. R. & STEWARD, F. R. ; “*Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*”; Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [5]. BRZUSTOWSKI, T.A. & GOLEM, P.J., “*Second Law Analysis of Energy Process – Part I: Exergy, an Introduction*”, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol.4, no.4, p. 208-218, 1976/77.
- [6]. _____, T.A. & _____, P.J., “*Second Law Analysis of Energy Process – Part II: The Performance of Simple Heat Exchangers*”. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol.4, no. 4, pp.219-226, 1976/77.
- [7]. _____, T. A., “*Toward a Second-Law Taxonomy of Combustion Processes*”. Energy, vol.5, Pergamon Press, p. 743-755, 1980.
- [8]. AYRES, Robert U., L.W. AYRES, M. Martins, “Eco-Thermodynamics: Exergy and Life Cycle Analysis”, INSEAD, 1996.
- [9]. _____. R. U., “*Resources, Environment and Economics*”. John Wiley, 1978.
- [10]. GEORGESCU, Roegen., “*N. The Steady State and Ecological Salvation: The Thermodynamical Analyses*, BioScience, vol. 27 , no. 4, p. 266-270, April 1977.
- [11]. _____. “*Alguns Problemas de Orientação em Economia – Parte II*”, Trad. Hegenberg, Leonidas & Motta, Octanny S., Edições Multiplic, Vol1, no. 5, Agosto 1981.
- [12]. _____. “*Entropy, Value and Development. In: The Entropy Law and The Economic Process*”, Harvard University Press, 1971.
- [13]. ODUM, Howard T. et ali., “*Energy Analysis and Coupling of Man Estuaries*”, Environment Management, voll , no. 4, p. 297-315, 1977.
- [14]. _____., “*Ambiente Energia y Sociedad*”, Barcelona, Editorial Blume, 1980.
- [15]. _____.,& E. C. Odum., “*Energy Analysis Overview of Nations. Working paper of the International Institute for Aplied Systems Analysis*”, Luxemburg, Áustria, 1983.
- [16]. WALL, Göran., “*Exergy – A Useful Concept*”, Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, Sweden, 1986.

- [17]. HÉMERY, Daniel; DEBIER, Jean Claude & DELÉAGE, Jean Paul. “*Uma História da Energia*”, Brasília, Edunb, 1993.
- [18]. FREEMAN, S. David; “*Evolução para o Poder Orgânico*”. Bio-Energy’80 – World Congress and Exposition – Proceedings, edição The Bio-Energy Council, Washington, USA, 1980.
- [19]. FLAVIN, Chistopher & LENSSEN, Nicholas; “*Um Sistema Energético Sustentável*”
- [20]. URBAN, C. W.; MELLO, J. C.; RIBEIRO, L. M. V. & FERREIRA, O. C., “*Proposta para a Reformulação da Política Energética na Área Nuclear*”, Depto Eng. Nuclear – EEUFMG (Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais), B. Hte/MG.
- [21]. AZEVEDO, Carlos Vicente Goulart de, “*Análise Exergética do Ciclo do Urânio Combustível – Etapa Intermediária de Obtenção do UF₆*”, dissertação de mestrado CCTN/UFMG (Curso de Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG), Belo Horizonte, 1996.
- [22]. ESTEVES, Otávio de Avelar, “*Análise Exergética da Produção do Etanol da Cana-de-Açúcar*”, dissertação de mestrado CCTN/UFMG (Curso de Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG), Belo Horizonte, 1996.
- [23]. WYLEN, Gordon J. Van & SONNTAG, Richard E., “*Fundamentos da Termodinâmica Clássica*”, Ed. Blücher, 2º ed., São Paulo, S.P -1976.
- [24]. ZEMANSKY, Mark W., “*Calor e Termodinâmica*”, Ed. Guanabara Dois, 5º ed., Rio de Janeiro, RJ – 1978.
- [25]. WALL, Göran, “*Exergetics – Exergy, Ecology and Democracy*”, Swenden, 1998
- [26]. STULTZ, S. C. & J. B. KITTO, “*Steam, its Generation and Use*”, 40º ed., The Babcock and Wicox Company, Barbeton, Ohio, EUA, 1992.
- [27]. “*US Geological Survey and Bureau of Mines*”, 1980.
- [28]. MATOS, Evandro Carele de , “*Prospecção, Pesquisa e Beneficiamento de Urânio no Brasil*”, INB – Indútrias Nucleares do Brasil, Poços de Calda, MG.
- [29]. FERREIRA, Omar Campos, “*Energia e Meio-Ambiente Explorando Novos Caminhos Metodológicos*”, Projeto da Eco-Termodinâmica ao Desenvolvimento de Tecnologia de Gestão Integrada Econômico-Ambiental – estudo de Caso: Gerenciamento de Bacia Hidrográfica, B.Hte, Abril 1998.
- [30]. OLIVEIRA JÚNIOR, Sílvio de Oliveira, “*Uso da energia na Indústria: Racionalização e Otimização. Análise Termoeconômica de Processos de Conversão de Energia*”, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, 1996.

- [31]. WALL, Göran, “*On Exergetics and Optimization of Technical Process to Meet Environmental Conditions*”, International Conference on Thermodynamics Analysis and Improvement of Energy Systems, Beijing, China, June, 10-13, 1997.
- [32]. MATOS, Evandro Carele de, “*Prospecção, Pesquisa e Beneficiamento de Urânio no Brasil*”, INB-Indústrias Nucleares do Brasil S.A, Poços de Caldas, MG
- [33]. NUCLEBRÁS (Empresas Nucleares Brasileiras S.A), “*Complexo Mineiro-Industrial de Poço de Caldas*”, Assessoria de Comunicação Social, Maio/1982.
- [34]. NUCLEBRÁS (Empresas Nucleares Brasileiras S.A), “*Prospecção e Pesquisa de Urânio no Brasil*”, Assessoria de Comunicação Social, 1982.
- [35]. CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA, “*Reservas Brasileiras de Urânio*”, Boletim Anual do Comitê Nacional Brasileiro (CNB), Ano XVI, N° 26, 1980.
- [36]. NUCLEBRÁS (Empresas Nucleares Brasileiras S.A), “*A Jazida de Urânio de Itataia (CE)*”, Assessoria de Comunicação Social, 1982.
- [37]. NUCLEBRÁS (Empresas Nucleares Brasileiras S.A), “*Reservas de Urânio do País passam de 266.300 para 301.490 toneladas*”, Assessoria de Comunicação Social, 1982.
- [38]. RUBINI, Luiz Antônio; LOBATO, Maria Lydia; FERNANDES, Maurílio Dias, “*Urânio*”, IBRAM (Instituto Brasileiro de mineração)
- [39]. “*XVII Simpósio de Geologia do Nordeste*”, Fortaleza, Ceará, 16 a 19 de novembro de 1997.
- [40]. DAVI, Euler Matos, “*Estudo do Balanço Energético no Ciclo do Urânio Combustível*”, Dissertação de Mestrado do CCTN/UFMG (Curso de Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG), B.Hte/MG, 1982.
- [41]. AZEVEDO, Júlio César Sanches de & LISBÔA, Rodrigo César de Oliveira, “*Lavra de Minas a Céu aberto*”, Departamento de Engenharia de Minas, EEUFMG (Escola de Engenharia da UFMG), B.Hte/MG, Agosto/1995.
- [42]. VALADÃO, George E. S., GALÉRY, Roberto, PERES, Antônio E. C., “*Tratamento de Minérios*”, Departamento de Engenharia de Minas, EEUFMG, B.Hte/MG, 1998.
- [43]. CIPRIANI, Moacir, “*Extração Contínua de Urânio e Molibdênio por Lixiviação com Ácido Sulfúrico*”, Nuclebrás, Divisão de Processos/DETM.PD, Julho/1980
- [44]. COELHO, M. Elcio, SALUM, Maria José G. & ASSIS, Sônia M. de, “*Notas de Aula Prática – Disciplina Tratamento de Minérios*”, Departamento de Engenharia de Minas, EEUFMG, B.Hte/MG, Outubro/1998.

- [45]. FIGUEIREDO, Célia de Araújo, “*Tratamento da Solução Fosfóro-Uranífera Extração por Solvente*”, Dissertação de Mestrado do CCTN/UFMG, B.Hte/MG, Março, 1985.
- [46]. DUFLOTH, Simone Cristina, “*Estudo da Construção de Uma Usina Hidrelétrica de Grande Porte – Análise dos Aspectos Energéticos – Usina Hidrelétrica de Nova Ponte*”, Dissertação de Mestrado do CCTN/UFMG, B.Hte/MG, Janeiro,1994.
- [47]. OLIVEIRA, A. G. ,“*Mineração de Urânio e Molibdênio no Planalto de Poço de Caldas, M.G*” ; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974.
- [48]. FUJIMORY, K. , “*Estudo Mineralógico uma Amostra Proveniente do Campo do Cercado (C-09), Poços de Caldas, MG*”; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974.
- [49]. CORRÊA, H. S. , “*Estudo de Lixiviação do Setor C-09 (Campo do Cercado) de Poços de Caldas*”; 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974.
- [50]. BLATT, Victória , “*Lixiviação do Minério de Campo do Cercado, Poços de Caldas, MG, Visando a solubilização do Urânio e do Molibdênio*”, 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974.
- [51]. BRUNO, J. B. & CONCEIÇÃO, E. L. H. ,“*Recuperação de Molibdênio a partir do Estéreis da Mina Osamu Utsumi*”; Nuclebrás, Março/1978.
- [52]. OLIVEIRA, M. L. M. & BENEDETTO, J. S. , “*Plano de Monitoração de Efluentes e Ambiental do Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas*”; Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Nov./1982.
- [53]. NUCLEBRÁS, “*As Necessidades de Energia para a Construção e Operação de Centrais Nucleares*”; Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento Assessoria de Planejamento; Relatório Juelich 1230/Agosto 1975.
- [54]. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY AND RESOURCES FOR THE FUTURE , “*Estimating Externalities of Nuclear Fuel Cycles*” ; A Study by the U.S. Department of Energy and the Commission of the European Communities.
- [55]. ALBUQUERQUE, John Mine, NUCLEBRÁS – Empresa Nucleares Brasileira S.A, “*Urânio no Brasil – sua Busca e Resultados*”, Congresso Brasileiro de Geologia, Novembro/1978.
- [56]. DUARTE NETO, João, “*Extração por Solvente de Urânio e Molibdênio em Meio Sulfúrico*”, Dissertação de Mestrado do CCTN/UFMG, Março/1980.
- [57]. AMORIM, Augusto Lopes de & BLATT, Victória, “*Separação Urânio-Molibdênio a partir das lixívias do Minérios de Poços de Caldas, MG, por Extração com Solventes*”, 1º Reunião sobre Minérios Brasileiros de Urânio (RSMBU), Rio de Janeiro, 1974.

- [58]. BRITO, João de & JÚNIOR, Vicente Chilelli, “*Concentração Química e Purificação de Urânio e Molibdênio Contidos em Lixívias Mineraias Sulfúricas*”, Laboratório de Poços de Caldas, MG, Seção de Processos, Set./1980.
- [59] DONES R., GANTNER U. & HIRSCHBERG S. , “*Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland*”, Paul Scherrer Institut, Februari/1996.
- [60]. ROTTY, R. M. ; PERRY, A. M. ; REISTER, D. B. , “*Mining and Milling. In: Net energy from nuclear Power*”, Oak Ridge, Tennessee, Institute for energy Analysis, 1975. P.45 – 60. (IEA 75-3).
- [61]. PARENTE, Roberto Cruz, “*Perfil Analítico do Urânio*”, boletim N° 27, Ministério das Minas e Energia, DNPM, Brasília, 1987.
- [62]. HURLBUT, Dana, “*Manual de Mineralogia*”, Vol. I e II, Ed. da Universidade de São Paulo, Rio de Janeiro, 1969.
- [63]. KENT, James A., “*Riegel’s Handbook of Industrial Chemistry*”, 8° Ed., 1983.
- [64]. PERRY, Robert H. & CHILTON, Cecil H., “*Manual de Engenharia Química*”, Ed. Guanabara Dois S.A, Rio de Janeiro, R.J, 1980.
- [65]. FLOH, Bertha, “*Separação de Urânio, Molibdênio e Vanádio, em Meio Sulfúrico, por Extração com Alamina 336*”, Dissertação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, S.P, São Paulo, 1970.
- [66]. IAEA, International Atomic Energy Agency, “*Uranium Extraction Technology*”, Vienna, 1993.
- [67]. LIDE, David R., “*Handbook of Chemistry and Physics*”, CRS Press, 77 th edition, USA,1996-1997.
- [68]. CLEGG, Jonh W. & FOLEY, Dennis D., “*Uranium Ore Processing*”, United States Atomic Energy Commission, Massachusetts, U.S.A, 1958.
- [69]. RITCEY, G. M & ASHBROOK, A. W., “*Solvent Extraction Principles and Applications to Process Metallurgy*” - Part I - Ed. Elsevier, 1984.
- [70]. DEAN, John A., “*Lange’s Handbook of Chemistry*”, 20° Edition, Ed. McGraw-Hill, 1979.
- [71]. BRANCO, Pércio de Moraes, “*Dicionário de Mineralogia*”, 2° Ed., Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.
- [72] MERRIT, Robert C. & PINGS, W. B., “*Processing of Uranium Ores – Part II*”, Mineral Industries bulletin, vol.12, N° 06, November, 1969.

- [73]. SOUZA, Jair Albo Marques, “ *Os Rejeitos Provenientes de Aplicações Pacíficas da Energia Nuclear e o seu Gerenciamento*”, Eletrobrás, Centrais Elétricas Brasileiras S.A, Nuclen Engenharia e Serviços S.A, Maio, 1997.
- [74]. KATZ & RABINOWICH, “*The Chemistry of Uranium*”, National Nuclear Energy Series, Ed. McGraw-Hill Book Company, Vol.5, 1951.
- [75]. COELHO, Solange Vaz, “*Projeto Itataia – Desenvolvimento de Processo*”, Empresas Nucleares Brasileiras S.A – NUCLEBRÁS, Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), B.Hte, M.G.
- [76]. LEINZ, Victor & LEONARDOS, Othon Henrey, “*Glossário Geológico*”, Ed. Nacional, São Paulo, S.P, 1977.
- [77]. GUERRA, Antônio Teixeira, “*Dicionário Geológico-Geomorfológico*”, 6° edição, Rio de Janeiro, R.J, IBGE, 1978.
- [78]. FERREIRA, Jardel Borges, “*Dicionário de Geociências*”, Fundação Gorceix, Ouro Preto, M.G, 1980.
- [79]. CASTRO, J. C, “*Informação Pessoal*”, INB - Indústrias Nucleares do Brasil, Poços de Caldas, MG, 1999.
- [80]. D. R. Morris & F. R. Sterward, “*Exergy Analysis of Chemical Metallurgical Process*”, Vol. 15 B, pp 645-654
- [81]. J. Szargut & C. Dzedziniewicz, “*Avaiable Energy of Inorganic Chemical Substances*”, Entropie, nº 40, pp 14-23, July-Aug. 1971.
- [82]. COCHRAN, Robert G. & Tsoufanidis, Nicholas, “*The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management*”, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois USA, 1990.
- [83]. “*Curso Intensivo de Explosivos Civis*”, Ministério do Exército, São Paulo, S.P, Fábrica Presidente Vargas, 1981
- [84]. FRANÇA Jr, J. M, “*Usina de Purificação de Urânio pelo Processo de Colunas Pulsadas em operação no Instituto de energia Atômica*”, São Paulo, SP, Instituto de energia Atômica, 1972, (IEA-277).
- [85]. LAMARSH, J. R, “*Introduction to Nuclear Engeneering*”, New York, NY, Addison-Wesley, 1975

ANEXO I – PROCESSAMENTO DE MINÉRIO URANÍFERO

I.1 - INTRODUÇÃO

O urânio é recuperado de seus minérios por processos essencialmente físicos e químicos. Uma combinação de técnicas hidrometalúrgicas e métodos químicos de concentração conduzem a um produto pré-refinado, freqüentemente denominado “yellow cake”. As principais operações envolvidas no tratamento do minério são: extração, cominuição (britagem e moagem), separação por tamanho (peneiramento e classificação), separação sólido/líquido (espessamento, filtração), lixiviação, concentração, purificação, precipitação e expedição. A Figura I.1 mostra um fluxograma simplificado do processamento do minério de urânio.

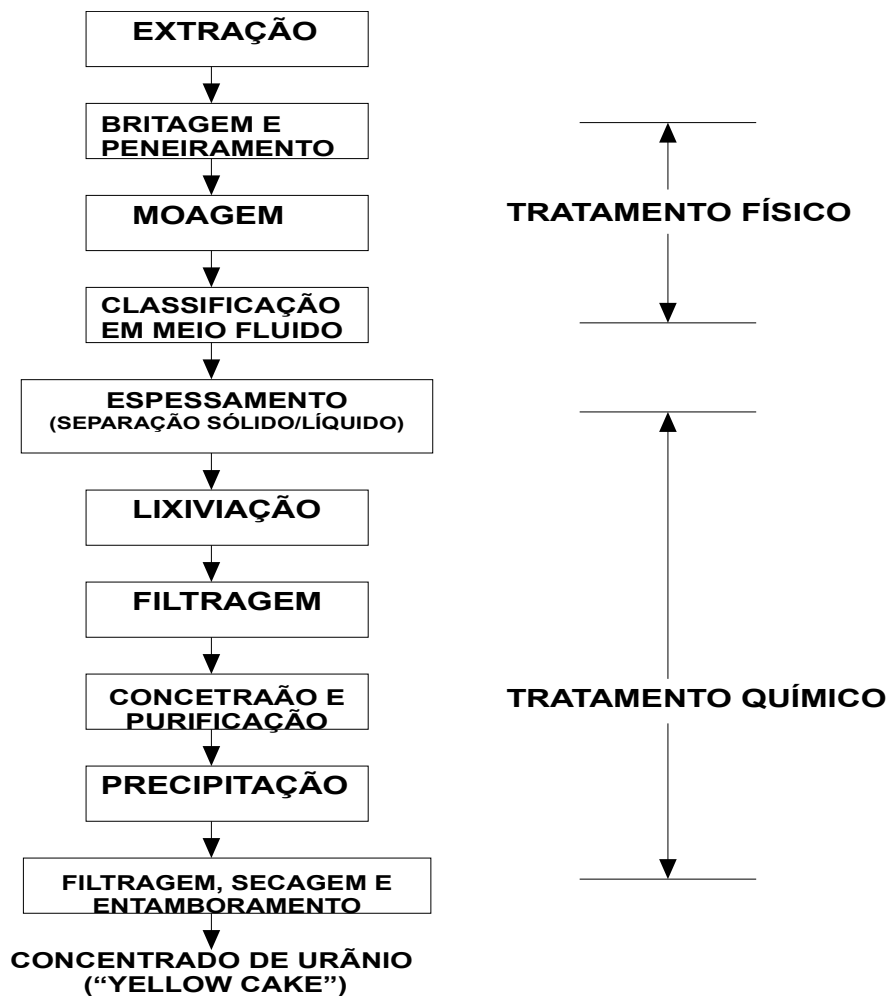


FIGURA I.1 – Fluxograma do Processamento do Minério de Urânio

I.2 - EXTRAÇÃO [41]

Durante os estágios de desenvolvimento e exploração de todas as minerações quando os materiais naturais (rocha ou solo, minério ou estéril) são extraídos da terra, diversas operações unitárias são empregadas, sendo estas, as operações denominadas de extração.

Os ciclos das operações de extração empregam operações unitárias as quais são normalmente agrupadas em duas funções: Fragmentação de rocha e Manuseio dos materiais. Estes ciclos básicos das operações de extração em mineração consistem das operações unitárias de perfuração, detonação, carregamento e transporte.

- Fragmentação de Rochas: inclui a quebra por uma variedade de mecanismos. Em rochas, essa quebra, é usualmente acompanhada pela perfuração e detonação.
- Manuseio de Materiais: inclui, geralmente, escavação, carregamento e transporte podendo ser transporte horizontal ou com elevações opcionais (verticais ou inclinadas).

Em minerações na superfície, os furos na mina são realizados por perfuratrizes rotativas ou percussivas versáteis para a colocação de explosivos, quando as rochas consolidadas devem ser escavadas. Os explosivos são então inseridos e detonados para reduzir os minérios ou estéreis em fragmentos. Em seguida, o material quebrado é carregado por poderosas escavadeiras e por unidades de transporte (caminhões fora-de-estrada) e/ou correias transportadoras.

I. 3 – TRATAMENTO FÍSICO [38, 41, 42]

Processos de tratamento físico de minérios uraníferos são aplicados com objetivos principais de:

- Descartar minerais indesejáveis ou prejudiciais nas etapas de tratamento químico,
- Realizar uma pré-concentração (relativamente pouco empregado) e
- Melhorar o teor do minério, com vistas à redução dos custos operacionais ou ao aumento de produção.

Quando aplicável, pode melhorar significativamente o desempenho econômico dos processos, mas, em geral, sua aplicação tem sido dispensada para a viabilização econômica dos projetos. A principal razão disto está relacionada às perdas de urânio na fase de processamentos físico.

Os métodos usados no tratamento de minérios uraníferos são baseados em diferenças de propriedades das diversas frações do minério, tais como radioatividade, densidade, forma, cor, características de superfície, consistência/dureza, etc.

I.3.1 – PENEIRAMENTO [42, 44]

O peneiramento (classificação em meio sólido) é conceituado como a operação de separação por tamanho, realizada industrialmente, utilizando superfícies que contém aberturas geométricas de formas variadas separando os dois produtos gerados em material retido (“oversize”) e material passante (“undersize”). A faixa granulométrica de aplicação vai desde os maiores até cerca de 250 μ m (exceto a peneira DSM) sendo que, para tamanhos menores, a classificação em meio fluido é mais usualmente empregada. As peneiras industriais mais utilizadas são:

- **Peneira de Grelhas:** são utilizadas a grelha fixa e a vibratória. A grelha fixa é composta por barras fixas dispostas paralelamente tendo inclinação de 35 a 45 graus sendo utilizada para separação de blocos entre 76,2mm (3”) e 203mm (8”). A grelha vibratória dispõe de mecanismo de vibração e é usada em separações entre 50,8mm (2”) e 152,4mm (6”);
- **Peneira DSM:** é um tipo de peneira constituída de barras dispostas horizontalmente formando uma superfície curva. A alimentação é realizada de tal forma que o minério atinge tangencial e perpendicularmente a superfície de peneiramento. A faixa de atuação, dependendo do material, está compreendida entre 0,3mm e 40 μ m;
- **Peneiras Rotativas:** conhecidas também como “trommel”, caracterizam-se por apresentar superfície cilíndrica de peneiramento (às vezes ligeiramente cônica) que gira em torno de seu eixo longitudinal. Opera com inclinações da ordem de 4 a 10 graus.

- **Peneiras Vibratórias:** existem basicamente três tipos: horizontais, inclinadas e de alta frequência. As horizontais dispõem de um sistema de vibração que atua numa direção paralela ao fluxo de tal maneira a realizar o transporte do material numa razão entre 12 a 18 m/min. As peneiras inclinadas operam normalmente com ângulos que variam entre 15 e 35 graus transportando material a uma velocidade de 18 a 36 m/min. Tanto as peneiras horizontais como as inclinadas podem operar com frequências da ordem de 25 a 2500rpm e amplitudes de 5 a 30mm. As peneiras de alta frequência caracterizam-se pela vibração eletromagnética que atua diretamente sobre a superfície de peneiramento.

As superfícies de peneiramento podem ser produzidas com barras, chapa perfuradas e fios trançados. As últimas são de maior uso nas aplicações industriais. Os materiais mais utilizados são aço cromo, aço manganês e o poliuretano (mais recente).

I.3.2 – COMINUIÇÃO [42, 44]

A cominuição ou fragmentação é a operação ou conjunto de operações que tem, como objetivo, a redução das dimensões físicas de um conjunto de blocos ou partículas por meio do rompimento de sua coesão interna (resultante da ação de forças atrativas existentes entre partículas constituídas de um corpo).

Tem como objetivos específicos:

- Attingir o grau de liberação necessário para que se possa efetuar a concentração e
- Attingir as especificações granulométricas exigidas pelo mercado.

As operações de cominuição geralmente são divididas em britagem e moagem.

I.3.2.1 – BRITAGEM [42, 44]

A britagem atua na faixa dos tamanhos maiores. Pode ser dividida em primária, secundária, terciária e até mesmo quaternária.

A britagem primária é a primeira a ser realizada nas usinas de tratamento. Neste processo, o material proveniente da mina (“Rom of Mine – Rom”) é despejado por caminhões ou outros tipo de equipamentos mecânicos no silo (depósito de estocagem) e conduzido por meio de grelhas vibratórias até o britador primário. De maneira geral, os britadores primários trabalham em circuito aberto recebendo o “Rom of Mine”, muitas vezes dentro da própria mina, e os britadores secundários se acham normalmente em circuito fechado com peneiras vibratórias.

Os principais britadores primários são: os britadores de mandíbulas, britadores giratórios, britadores cônicos, britadores de impacto e britadores de rolo.

- **Britadores de Mandíbulas:** caracterizam-se pela existência de uma superfície fixa e outra móvel. O material é fragmentado pela aproximação e afastamento da placa móvel sendo o material escoado por gravidade. Pode ser de um ou dois eixos. No caso de um eixo, o equipamento sofre uma solitação mecânica maior, maior desgaste das placas e maior geração de materiais finos. Já, no caso de dois eixos, o britador é normalmente mais pesado, tem capacidade um pouco menor e é mais caro.
- **Britadores Giratórios:** são constituídos de uma superfície externa, em forma de tronco de cone com vértice para baixo, e uma superfície interna, com vértice para cima. A superfície interna descreve um movimento circular de tal maneira que, considerando-se um ponto fixo na superfície externa, verifica-se a aproximação e afastamento dessa superfície em relação à fixa.
- **Britadores de Impacto:** são caracterizados por um rotor que faz girar a uma grande velocidade um conjunto de peças (martelos), que realiza a fragmentação dentro de uma câmara.

- **Britadores de Rolo:** a compressão de blocos é realizada por um rolo dentado que gira de encontro a uma placa fixa.

A britagem secundária pode ser na verdade desmembrada em secundária, terciária e quaternária. Os principais tipos de britadores utilizados atualmente são britadores de mandíbulas, britadores giratórios, britadores cônicos, britadores de impacto e de rolos lisos.

- **Britadores de Mandíbulas:** neste caso, a relação largura das placas de fragmentação/abertura da boca é muito maior do que a dos britadores primários.
- **Britadores Giratórios:** apresentam uma relação diâmetro da base do cone/abertura da boca bem maior do que a dos britadores primários.
- **Britadores de Impacto:** funcionam de maneira semelhante aos primários, em razão de suas próprias características.
- **Britadores Cônicos:** são mais utilizados para a britagem secundária. Sua concepção é semelhante à dos giratórios, diferenciando-se pela superfície externa de fragmentação. Apresentam também superfícies de fragmentação com menor inclinação (em relação a horizontal).
- **Britadores de Rolos Lisos:** consistem de dois rolos lisos, que giram um contra o outro fragmentando as partículas colocadas entre eles.

I.3.2.2 – MOAGEM [42]

A moagem é o último estágio da cominuição (fragmentação), operando normalmente na faixa de centímetros (cm) a micrômetros (μm).

Os *moinhos revolventes* são os equipamentos mais utilizados atualmente. Esses moinhos constituem-se de cilindros rotativos onde a fragmentação dos materiais é realizada em seu interior pela ação dos chamados corpos moedores que podem ser barras cilíndricas ou bolas

- **Moinhos de Barras:** utilizam barras de aço cilíndricas como carga moedora.
- **Moinhos de Bolas:** utilizam, como carga moedora, bolas de aço ou ferro fundido. Podem ser incluídos até outros tipos de corpos com formas geométricas diferentes, como a cilíndrica por exemplo. Têm aplicação na moagem fina e, normalmente, operam em circuito fechado em conjunto com ciclones ou classificadores.

Quando o moinho tem cerca de 50% de seu volume interno ocupado por corpos moedores e 50% de material a ser fragmentado, isto é, o minério (a carga), a moagem é chamada semi-autógena, aplicável a certos tipos de minérios, com características adequadas de consistência e homogeneidade. Se ele possui apenas fragmentos do próprio minério a moagem é dita autógena. O processo de fragmentação no moinho se dá através da movimentação da carga e dos corpos moedores. As barras de bolas, por exemplo, tendem a girar umas em contato com as outras prendendo as partículas do material, arrastando-as no sentido do movimento circular e lançadas a uma altura que será maior ou menor dependendo da rotação do moinho. Os moinhos de bolas podem operar em duas velocidades distintas, sendo a menor em regime de *cascata* e a maior em regime de *catarata*.

I.3.3 – CLASSIFICAÇÃO [44]

Os critérios que podem ser utilizados para classificação são:

- Volume,
- Massa,
- Superfície,
- Dimensões,
- Área de projeção e
- Outros.

No entanto, quando estão sendo considerados objetos irregulares, como partículas minerais originadas da fragmentação, torna-se necessário a utilização de um critério mais adequado.

Para a definição de tamanho em tratamento de minério, utiliza-se dois critérios:

- **Classificação em Meio Sólido:** é o peneiramento que consiste da relação passagem/retenção em abertura geométrica (a definição de maior ou menor, passa ser a condição de passar ou não pela abertura geométrica).
- **Classificação em Meio Fluido:** como, por exemplo, em água ou ar, e para a qual a definição de maior ou menor, passa ser dada pelo comportamento distinto que as diversas partículas possam ter num meio fluido, em função de seu tamanho e em presença de uma combinação de forças naturais e/ou introdução no sistema.

Os principais equipamentos utilizados industrialmente para a classificação em meio fluido são:

- Classificador mecânico (espiral é o mais comum) e
- Hidrociclone (ciclone).
- **Classificador Espiral ou de Parafuso:** é constituído de um tanque com uma porção inclinada contendo um parafuso sem fim, que gira em torno de seu eixo central. A

alimentação é feita na forma de polpa e realizada transversalmente. As partículas maiores tendem a se sedimentar dentro desse tanque (“underflow”) e são transportadas pelo parafuso. As partículas menores, que não se sedimentam, saem por transbordo (“overflow”). O “overflow” é descarregado para dentro de uma calha e o “underflow” pode ser transportado em correias transportadoras, e geralmente, é o que se faz, dirigindo-se a ela por meio de uma calha. São amplamente utilizados nas usinas de processamento mineral, extremamente simples e robustos e utilizados para separações granulométrica na faixa de 0,8mm a 44 μ m. Os regimes de operação são de *classificação* (mais comum) e o regime de *corrente*, utilizado principalmente para classificações mais finas que 44 μ m.

- **Hidrociclone:** ou ciclone, é um aparelho que se caracteriza por usar o efeito de centrifugação como principal agente de classificação de partículas minerais e constitui basicamente por uma parte cilíndrica e uma cônica. Possui ainda orifício para o chamado injetor, e dois para saída de polpa: ápex (orifícios inferiores) e vortex (orifícios superiores). Este equipamento não possui partes móveis. A alimentação da polpa é realizada sob pressão criando um fluxo descendente em espiral ao longo das paredes internas. Um outro fluxo ascendente é criado na região central do equipamento. As partículas maiores (com maior massa) têm tendência a seguir o fluxo descendente dirigindo-se ao ápex e as partículas menores (com menor massa) dirigem-se para o vortex, devido ao predomínio do fluxo de arraste sobre a força centrífuga.

I.4 - TRATAMENTO QUÍMICO

A Figura I.2 mostra o diagrama esquemático do tratamento químico no processamento do minério de urânio.



FIGURA I.2 – Diagrama Esquemático do Tratamento Químico no Processamento do Minério de Urânio

I.4.1 – ESPESSAMENTO [38, 42, 44]

O espessamento é a separação sólido/líquido baseada na sedimentação. O espessamento é utilizado para aumentar a densidade de polpas formando uma camada de sólidos em decantação e um líquido sobrenadante (flutuante) clarificado, livre de sólidos em suspensão. Em geral, polpas com menos de 1% de sólidos até 50% de sólidos são espessados para valores entre 10 a 75%. A fase clarificada pode conter desde alguns ppm de sólidos até cerca de 1.000 ppm. O espessamento é utilizado com os seguintes objetivos:

- Recuperação de água de polpa contendo rejeitos ou concentrados,
- Preparar polpas com densidades para descarte com percentagem de sólidos mais elevada e com densidades mais adequadas para operações subseqüentes (filtração, moagem, lixiviação entre outras) e
- Separar as espécies dissolvidas dos resíduos lixiviados em instalações hidrometalúrgicas

A movimentação de uma partícula sólida dentro de uma polpa é afetado, pelas forças da gravidade, pelo empuxo do líquido deslocado e pelas forças de atrito entre líquido e partícula. Estas forças são influenciadas por fatores como a propriedade da polpa (densidade e viscosidade), propriedade da partícula (tamanho, forma, densidade e rugosidade da superfície) propriedade do sistema (percentagem de sólidos e estado de dispersão das partículas, pH, presença de coagulantes e floculantes) e geometria do equipamento.

Estudos de espessamento envolvem testes para seleção de reagentes químicos que favorecem a sedimentação das partículas (coagulantes e floculantes). A coagulação é obtida através da adição de eletrólitos inorgânicos cuja função é reduzir a repulsão eletrostática existente entre as partículas em dispersão. No caso da floculação, os polieletrólitos (polímeros de cadeia longa e elevado peso molecular) adsorvidos na interface mineral/água podem ser de pontes para unir partículas.

A sedimentação das partículas durante o espessamento acontece segundo três regimes distintos, denominados de: clarificação, sedimentação por fase e compactação.

- Regime de Clarificação: neste regime é predominante situações de altíssima diluição de polpa onde, após a colisão, as duas partículas continuam seu movimento individual, sem interferências mútuas. Pode haver, também, o caso em que uma partícula maior afunde mais rapidamente, colidindo com uma outra partícula e, se há tendência para a formação de flóculos (agregados), as duas se agregam e passam a sedimentar (processo de deposição no fundo) com velocidade ainda maior.
- Regime de Sedimentação por Fase: este processo ocorre quando a concentração de partículas na polpa aumenta, atinge uma condição em que cada partícula fica em contato com as vizinhas e descem em conjunto, englobando as demais nessa estrutura e fazendo-as afundar com a mesma velocidade. Este tipo de regime ocorre em partículas que tendem a flocular (se agregar).
- Regime de Compactação: ocorre quando as partículas se encontram tão adensadas (pesadas) que uma está em contato com as outras e a sedimentação só pode ocorrer pela compactação do conjunto devido ao peso das partículas suprajacentes (que estão nas proximidades).

O espessador é o equipamento utilizado no espessamento constituído de uma bacia de sedimentação (geralmente cilindro-cônica) provida de um mecanismo de arraste para conduzir os sólidos decantados no fundo (“overflow”) para um ponto de descarga. O “overflow” é retirado por transbordamento e recolhido por calhas periféricas.

Os equipamentos utilizados industrialmente como espessadores podem ser classificados em: *convencionais, alta capacidade, de lamela e cones de sedimentação.*

- Espessadores Convencionais: os constituintes principais são, parte superior cilíndrica, que apresenta diâmetro maior do que a altura; parte inferior representada por um cone raso com ápex voltado para baixo; calha interna ou externa ao tanque, em forma de anel para coleta de “overflow”; calha de alimentação; e passarela para o mecanismo de giro de pás e cone ou sulcos de remoção do “underflow”.

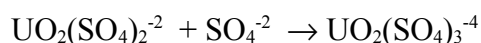
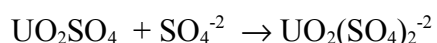
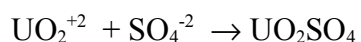
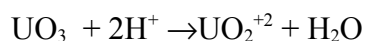
- Espessadores de Alta Capacidade: a principal característica é a maior produção quando comparados com os convencionais de mesmo tamanho, devido ao sistema de adição de agregantes.
- Espessadores de Lamelas: são caracterizados por uma série de placas inclinadas, dispostas em paralelo, e colocadas na região de sedimentação de tal forma a reduzir a altura de sedimentação. A partícula sedimenta até encontrar a superfície de uma placa e a partir daí, passa a escorregar sobre ela. Este tipos de espessadores estão em recente desenvolvimento.
- Espessadores com Cones de Sedimentação: são utilizados principalmente para rejeitos. Apresentam, devido a sua forma geométrica, uma baixa capacidade.

I.4.2 – LIXIVIAÇÃO [38, 43]

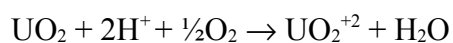
Esta é considerada, na maioria das vezes, como a primeira etapa de processamento químico e tem por objetivo a obtenção de solução contendo a maior quantidade possível de urânio (dissolvido). A técnica mais usada para este fim é a lixiviação agitada. As condições operacionais variam de acordo com os tipos e com as concentrações dos minerais de urânio e dos minerais da ganga (material inútil no minério).

A lixiviação ácida, em geral utilizando o ácido sulfúrico como reagente ácido, é normalmente aplicada em minérios silicatados, do tipo arenito, onde o urânio pode estar sob forma de minerais oxidados secundários (carnotita, tyuyamunita, torbenita, autunita e uranofana). Esses minerais, assim como a uraninita, a pechblenda e a cofonita, são solúveis em soluções ácidas, em presença de agentes oxidantes, proporcionando a oxidação do U^{+4} para U^{+6} . Dificuldades maiores de solubilização do urânio verificam-se para minerais tipo “óxidos múltiplos” (branerita e davidita) e minerais refratários (euxenita, betafita e pirocloro), que requerem as condições de ataque mais drásticas (altas temperaturas e altas concentrações de ácido). Nesta etapa, o consumo de ácido sulfúrico é um fator preponderante na economicidade do processo, sendo devido principalmente aos minerais da ganga.

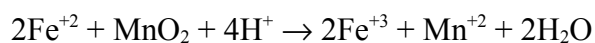
A reação do ácido sulfúrico com o urânio U^{+6} (hexavalente) dissolve o urânio como UO_2^{+2} , produzindo o sulfato de urânio (UO_2SO_4) e íons complexos, conforme esquema abaixo [Ref.: 43]



Estando o urânio no estado U^{+4} (tetravalente) como UO_2 , a solubilidade em ácido sulfúrico é baixa, exigindo oxidação ao estado hexavalente conforme a reação:



Uma oxidação rápida em meio ácido é conseguida, na prática, usando-se íons de Fe^{+3}/Fe^{+2} suficientemente alta, pelo que se adicione um agente oxidante. Usando-se MnO_2 (óxido de manganês) como agente oxidante tem-se:



A principal exigência na lixiviação ácida é a de se manter uma concentração de ácido livre suficiente para atacar o mineral de urânio sem dissolver uma quantidade excessiva de ganga associada. Esta ganga, principalmente a de carbonato, é responsável pelo alto consumo de ácido, o que deve ser minimizado sem, entretanto, diminuir muito o rendimento da extração do urânio. É desejável que, considerando-se o vínculo existente entre a etapa de lixiviação e a de purificação por extração por solvente, normalmente feita em $pH \cong 1,2$, seja evitada lixívia com elevada acidez livre, minimizando-se os custos de neutralização até o pH indicado.

A necessidade de manutenção de condições apropriadas à oxidação, vem no segundo lugar em importância, pois além de concorrer para uma maior solubilização do urânio, relaciona-se com a etapa de purificação, onde se utiliza uma lixívia com $Fem > 400$ mV para evitar problemas de extração por solvente.

A formação do ânion solúvel de tricarbonato de uranila $[UO_2(CO_3)_3]^{-4}$ permite o uso de soluções alcalinas (carbonato e bicarbonato de sódio ou amônia) para a dissolução seletiva do urânio em certos tipos de minério, e tornam-se particularmente vantajosos, no tratamento de minérios com elevadas proporções de minerais carbonários, compostos de ferro, alumínio e titânio, devido a sua insolubilidade em soluções alcalinas. As principais limitações ao uso da lixiviação alcalina requer condições operacionais mais drásticas no que diz respeito a temperaturas, tempos de residência, oxidação e granulometria.

Recentemente, o uso das lixiviações sob pressão tem-se ampliado, visando atingir maiores taxas de recuperação/solubilização em menor tempo. Por outro lado, as taxas de recuperação admissíveis para o urânio têm se elevado, em particular para minérios de alto teor (0,5 a 2,5% em U_3O_8), onde se estabelecem níveis de 99% ao invés de 90-95% aceitas para minérios contendo 0,1% - 0,2% de U_3O_8 .

Além das técnicas de lixiviação convencional, em tanques agitados, são ainda usados outros métodos para solubilização de urânio, valendo mencionar:

- Cura Ácida: onde o minério sofre maceração com ácido sulfúrico, um aquecimento estático e posterior retomada em água, em tanques agitados,
- Percolação / Lixiviação em Pilhas: onde a solução lixivante é feita passar através de um leito estático do minério disposto em tanques especiais, em colunas ou em pilhas dispostas em terrenos impermeabilizados,
- Lixiviação “in situ”: onde as soluções lixiviantes são introduzidas no terreno natural, com posterior recolhimento da solução “enriquecida” para tratamento posterior e

- Lixiviação bacteriológica: geralmente combinada com lixiviação em pilha, onde a ação de certas bactérias, especialmente desenvolvidas, promove a geração de ácido sulfúrico, aumentando a solubilização do urânio.

I.4.3 – FILTRAGEM [38, 42, 44]

A filtragem (filtração) é uma operação de separação sólido/líquido, empregada em muitas usinas de processamento mineral caracterizada pela passagem de uma polpa através de um meio poroso, de tal forma que haja retenção do sólido e a passagem do líquido. É utilizada com o objetivo de retirada de água em concentrados e rejeitos e maximização da recuperação de espécies dissolvidas em processo hidrometalúrgicos. É necessário a existência de uma diferença de pressão, através do meio, podendo ser conseguida através de gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação.

A filtragem pode ser realizada de quatro maneiras: *com formação de torta, sem formatação de torta, em leitos profundos e filtragem contínua a vácuo, com formação de torta.*

- Filtragem com Formatação de Torta: é caracterizado pela deposição de uma camada de sólido sobre a superfície filtrante, sendo os poros do meio filtrante menores ou iguais ao tamanho da maioria das partículas. É o tipo utilizado em tecnologia mineral.
- Filtragem sem Formação de Torta: ocorre quando o fluxo de suspensão é paralelo à superfície do meio filtrante que retém as partículas, não ocorrendo a formação de torta devido à grande velocidade relativa entre a suspensão e o meio. O fluido passa através do meio e o sólido é retido. Esse tipo é muito empregado em filtragem de gases.
- Filtragem em Leitos Profundos: aplicada a suspensões muito diluídas, com meios filtrantes cujos poros são bem maiores do que as partículas. Há, dessa forma, retenção do sólido no interior do meio filtrante.

- Filtragem Contínua a Vácuo, com Formação de Torta: utilizada no processamento mineral cobrindo, uma faixa granulométrica que vai de 10 a 100 ppm. A classificação dos filtros contínuos pode ser feita de três forma diferentes, dependendo da consideração da posição relativa (alimentação por baixo ou por cima), da forma geométrica (tambor, disco, taboleiro ou horizontal) e da função desempenhada (filtragem rápida, desaguamento ou lavagem).

A separação sólido-líquido nas polpas resultantes da lixiviação é, em geral, efetuada em filtragem a vácuo, combinada, em alguns casos, com o uso de espessadores e ciclones, segundo operações clássicas em usinas hidrometalúrgicas. Uma tendência hoje verificada em usinas de urânio é a de se adotarem espessadores e ciclones de alta capacidade e filtro do tipo “esteira”, visando melhora a eficiência de separação e redução dos custos operacionais. Nas lixiviações ácidas, a clarificação do licor a níveis de 5 a 20 ppm de sólidos é uma etapa fundamental; a filtração por percolação em colunas de carvão é a técnica mais usada para este fim.

Os filtros, sob sua forma geral, mais comumente encontrados nas indústrias, podem ser: *de tambor, de disco, encapsulados (hiperbáricos) e horizontal*.

- Filtro de Tambor: é um grande cilindro que gira solidário ao seu eixo longitudinal, que se acha conectado, desde a periferia, a um válvula automática, e cuja alimentação é feita, normalmente, em uma bacia de polpa posicionada de forma que a porção inferior desse cilindro fique submersa. O meio filtrante pode ser um tecido preso ou não (tipo correia no último caso) à superfície do tambor ou um tecido preso ao tambor acrescido de uma camada de material granular formada sob esse tecido (filtros pré-cobertos). A descarga pode ser efetuada por diversos dispositivos, entre esses, por raspador, por rolo e por fios.
- Filtro de Disco: é composto por uma série de discos espaçados, ligados entre si por um tubo que executa um movimento de rotação e que serve como ligação para uma válvula automática (conectada a uma bomba de vácuo e a um compressor). A formação de torta é realizada em uma bacia de polpa onde há o recobrimento da porção inferior dos discos (até cerca da metade do seu diâmetro). A descarga da torta formada é feita utilizando-se ar

comprimido (sopro) sendo o material recolhido em aberturas dispostas em ambos os lados de cada disco.

- Filtros Encapsulados ou Hiperbáricos: são uma opção de desenvolvimento recente, onde se pode aplicar uma diferença de pressão extra, além do vácuo, de maneira a chegar limites da ordem de 10^5 Pa. Verifica-se que, embora haja redução de umidade, há maior dificuldade com relação à descarga da torta formada.
- Filtros Horizontais: podem ser divididos em horizontais de mesa, horizontais de correia e de bandeja revolvente.
- Filtros Horizontais de Mesa: são circulares, dispõem de movimento giratório no plano horizontal e sua alimentação é feita por cima. O vácuo, efetuado através de bomba, tem o mesmo sentido da força gravitacional e é controlado por válvula concêntrica localizada em sua parte inferior. A secagem pode ser feita com auxílio de vapor. A descarga da torta é realizada com auxílio de um parafuso ou lâmina. São filtros mais apropriados a materiais grosseiros (100 a $100\mu\text{m}$).
- Filtros Horizontais de Correia: são também caracterizados por uma alimentação por cima e pelo vácuo aplicado no mesmo sentido da força gravitacional. São mais apropriados a materiais grosseiros, produzem tortas com baixa umidade e apresentam a possibilidade de lavagem do meio filtrante, que se encontra posicionado sobre uma correia. Existe a possibilidade da utilização de vapor para redução da umidade.
- Filtro de Bandeja Revolvente: são caracterizados por uma alimentação feita por cima, pela existência de compartimentos (taboleiros) e pelo movimento de rotação, no plano horizontal, que permite a realização das diversas tarefas. A descarga da torta é efetuada com auxílio de ar comprimido e com a movimentação do compartimento do filtro.

I.4.4 – CONCENTRAÇÃO E PURIFICAÇÃO [38, 42, 44, 45, 72]

A concentração é a etapa em que ocorre a separação do(s) produto(s) útil(eis). A separação é realizada em sistemas dinâmicos onde a resultante de um jogo de forças confere trajetórias diferentes às partículas de tal modo que se possa separá-las com base em uma propriedade. Essa propriedade é usualmente chamada diferenciadora podendo por exemplo ser: a cor, brilho, susceptibilidade magnética, condução de cargas e propriedades de superfícies.

O método de concentração mais comum é o densitário ou gravítico que consiste na separação em um meio denso utilizando um fluido de densidade intermediária a das espécies minerais que se quer separar, de tal modo que as espécies mais densas do que o fluido afundem e as mais leves flutuem. Os meios densos normalmente usados podem ser: líquidos orgânicos, soluções de sais orgânicos e suspensões de sólidos.

Os líquidos orgânicos apresentam em geral, como principais desvantagens para a sua aplicação: a decomposição química, o elevado índice de toxidez, ação corrosiva e a de elevado custo.

As suspensões sólidas podem ser preparadas utilizando-se água ou um líquido denso como fluido. Os sólidos normalmente utilizados são quartzo, argilas, galena, magnetita, ferro-silício e chumbo.

Existem dois tipos de separação: estática, dinâmica e por correntes longitudinais

- Separação Estática: realizada a nível industrial em equipamentos onde a principal força atuante é a gravidade. Esse método se limita à separação de partículas minerais com tamanho mínimo de 6,35mm e peso específico de 3,5 g/cm³.
- Separação Dinâmica: utiliza a centrifugação, pode operar em limites de granulometria inferiores à da separação estática, ou seja da ordem de 0,5 mm. Utiliza-se, nesse caso, a centrifugação.

Os jigues são equipamentos que utilizam correntes verticais para a suspensão de espécies. Diversos são os tipos destes equipamentos disponíveis no mercado.

- Separação por correntes longitudinais: é caracterizada pela existência de basicamente dois tipos: *escoamento laminar e em calhas*.

No escoamento laminar há uma corrente longitudinal constituída por uma lâmina de pequena espessura. Os tipos mais utilizados são mesa vibratória e as espirais concentradoras.

A separação por correntes longitudinais em calhas é caracterizada pela existência de uma corrente de água que arrasta partículas minerais que ficam sujeitas a forças gravíticas e da pressão da corrente.

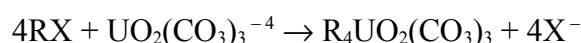
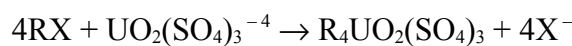
A concentração e a purificação dos licores ácidos (contendo urânio) constituem etapas imprescindíveis na produção de “yellow cake” de adequado grau de pureza. Nas lixiviações alcalinas, a solubilização do urânio pode ser suficientemente seletiva de modo a dispensar processos de purificação adicional.

As técnicas mais usadas para a concentração e purificação das soluções ácidas são: *extração líquido-líquido com solventes orgânicos e troca iônica com resinas sintéticas*.

- Extração por Solvente Líquido-Líquido com Solvente Orgânico: consiste basicamente numa contactação íntima da solução aquosa com um extratante orgânico, que retira, seletiva ou preferencialmente, o urânio da solução. Esta mistura, deixada em condições de decantação, é separada em fases orgânica e aquosa, tendo em vista sua imiscibilidade natural. A fase orgânica, então contendo o urânio, é submetida a nova contactação com outra solução aquosa, que reextrai praticamente todo o urânio, permitindo a reciclagem da fase orgânica no processo. Dependendo da natureza do licor podem ser usados solventes aniônicos ou catiônicos, ambos capazes de conduzir a elevadas concentrações de urânio e a uma eficiente purificação. Uma amina terciária diluída em querosene tem sido o extratante mais utilizado industrialmente.

Uma outra importante aplicação da extração por solvente está relacionada à recuperação de urânio contido em ácido fosfórico, empregando-se ácido di-2-etil hexil fosfórico (D2HPA-TOPO) que extrai o urânio hexavalente ou o ácido octilfenil-fosfórico (OPAP), que extrai o urânio tetravalente diluídos em querosene como extratantes básicos.

- Troca Iônica com Resinas Sintéticas: é aplicável nos casos de tratamento de polpas e de soluções clarificadas, em circuitos ácidos e alcalinos, envolvendo a percolação da solução em colunas contendo as resinas de troca iônica, até que se atinja uma saturação na capacidade de adsorção do urânio. Procede-se então, à eluição e à lavagem/regeneração da coluna, adequando-a a um novo ciclo de adsorção. As reações típicas entre resinas de troca iônica e sulfato de urânio ou carbonato de urânio são: [Ref.72]



onde:

R = Porção fixa de resina;

X = Ânion trocador.

A escolha da técnica de concentração e purificação está relacionada às características do licor (concentrações e elementos contaminantes), sendo comum a adoção de ambos os processos, combinados em série.

I.4.5 – PRECIPITAÇÃO

A recuperação final do urânio das soluções (concentradas e purificadas) é obtida por precipitação química por *processos ácidos* ou *alcalinos*.

- Processos Ácidos: o urânio pode ser precipitado pela neutralização com um composto básico (hidróxido de cálcio, magnésio, sódio ou amônio), embora um produto de alta pureza possa também ser obtido pela adição de peróxido de hidrogênio (H_2O_2).

- Processos Alcalinos: o procedimento usual envolve a adição de hidróxido de sódio (NaOH) aos licores de carbonato/bicarbonato que eleva o pH até cerca de 12, quando o urânio precipita-se sob forma de diuranato de sódio ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$).

I.4.6 – FILTRAGEM, SECAGEM E ENTAMBORAMENTO

Os estágios finais do processo incluem a filtração, a lavagem, a secagem e o entamboramento (embalagem) concentrado de urânio (“yellow cake”).

A filtração ou filtração, na fase final, como já foi dito anteriormente, é a separação sólido/líquido que é caracterizada pela passagem de uma polpa através de um meio poroso, de tal forma que haja retenção do sólido e a passagem do líquido. Esta etapa tem como objetivo a retenção das impurezas do Diuranato de Amônia (DUA). Em seguida é feita a lavagem do DUA.

A seguir é feita uma secagem ou calcinação a alta temperatura, que embora seja efetivas na remoção de amônia e outros constituintes voláteis, deve ser executada em condições criticamente controladas, para se evitar a formação de produtos refratários aos processos subsequentes.

A calcinação é o aquecimento de um composto (minério de urânio) com o intuito de provocar sua decomposição com ou sem oxidação. A calcinação de minérios uraníferos pode ser aplicada com os seguintes objetivos: aumentar a solubilidade/recuperação de elementos de interesse econômico e melhorar características físicas do minério.

Em alguns casos, em minérios contendo vanádio-carbonita, uma calcinação prévia, com adição de cloreto de sódio, é importante para produzir um sal de vanádio solúvel em água, permitindo a recuperação deste elemento e sua efetiva separação do urânio.

A calcinação pode ser também empregada para promover a oxidação do urânio (estado de oxidação +4 para +6, que é uma forma solúvel) e para eliminar ou modificar compostos redutores (carbonatos, sulfetos e óxidos de ferro) que interferem na solubilização do urânio durante a lixiviação. Outro efeito importante de uma calcinação prévia relaciona-se à

desidratação de minérios ricos em argilas (montmorilonita e bentonita), evitando dificuldades operacionais posteriores, em especial nas etapas de sedimentação e filtração.

A etapa final consiste no entamboramento ou a embalagem do concentrado de urânio (“yellow cake”) em tambores apropriados, prontos para a expedição.