

PUC

ISSN 0103-9741

Monografias em Ciência da Computação
nº 29/95

**Modelagem da Essência de um Sistema de
Controle e Monitoramento de Litografia
por Feixe de Elétrons - COMONLIFE**

- Volume 1 -

Maria Luiza d'Almeida Sanchez
Bruno Maffeo

Departamento de Informática

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO
RUA MARQUÊS DE SÃO VICENTE, 225 - CEP 22453-900
RIO DE JANEIRO - BRASIL

PUC RIO - DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA

ISSN 0103-9741

Monografias em Ciência da Computação, Nº 29/95

Editor: Carlos J. P. Lucena

Setembro, 1995

**Modelagem da Essência de um Sistema de Controle e
Monitoramento de Litografia por Feixe de Elétrons - COMONLIFE ***

- Volume 1 -

Maria Luiza d'Almeida Sanchez

Bruno Maffeo

* Trabalho patrocinado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia da
Presidência da República Federativa do Brasil.

In charge of publications:

Rosane Teles Lins Castilho

Assessoria de Biblioteca, Documentação e Informação

PUC Rio — Departamento de Informática

Rua Marquês de São Vicente, 225 — Gávea

22453-900 — Rio de Janeiro, RJ

Brasil

Tel. +55-21-529 9386

Telex +55-21-31048

Fax +55-21-511 5645

E-mail: rosane@inf.puc-rio.br

SUMÁRIO

Volume 1

1. INTRODUÇÃO	1
2. MODELO DO CONTEXTO.....	6
2.1. SEÇÃO DETALHADA.....	6
2.1.1. Definição do SISTEMA	6
2.1.1.1. Descrição Sumária	6
2.1.1.1.1. Funcionamento do SISTEMA.....	6
2.1.1.2.2. Tarefas do SISTEMA de Controle.....	11
2.1.1.2. Objetivo	13
2.1.1.2.1. A Nivel Estratégico.....	13
2.1.1.2.2. A Nivel Tático.....	13
2.1.1.2.3. A Nivel Operacional	13
2.1.1.3. Descrição da Operação - Restrições e Eventos Externos Associados.....	13
a) Assunto: Geração de Camada Genérica (camada de marcas ou camada do chip)	13
a.1) Sob o ponto de vista de MOTOR_X, MOTOR_Y e OBTURADOR_FEIXE:	14
a.1.1) Funcionalidade: Traçar linha.....	14
b) Assunto: Iniciação de Wafer.....	15
b.1) Sob o ponto de vista do OPERADOR:	15
b.1.1) Funcionalidade: Iniciar wafer.....	15
b.2) Sob o ponto de vista do MOTOR_X e do MOTOR_Y.....	16
b.2.1) Funcionalidade: Levar a mesa para sua posição de repouso.....	16
c) Assunto: Alinhamento de Wafer.....	16
c.1) Sob o ponto de vista do OPERADOR:.....	16
c.1.1) Funcionalidade: Iniciar alinhamento de wafer.....	16
c.1.2) Funcionalidade: Estabelecer alinhamento de wafer.....	17
c.2) Sob o ponto de vista do MOTOR_X, do MOTOR_Y e do MOTOR_θ:	20
c.2.1) Funcionalidade: Levar a mesa para sua posição de repouso.....	20
c.2.2) Funcionalidade: Levar a mesa para posição de ajuste na direção x.....	20
c.2.3) Funcionalidade: Levar a mesa para posição de ajuste na direção y.....	20
c.2.4) Funcionalidade: Levar a mesa para posição de uma marca de alinhamento.....	20
c.2.5) Funcionalidade: Levar a mesa para posição de alinhamento na direção θ.....	21
d) Assunto: Geração de Camada do Chip.....	21
d.1) Sob o ponto de vista de Filamento, Fonte de Alta Tensão, Lente Objetiva e Lente Condensadora:	21
d.1.1) Funcionalidade: Iniciar geração de camada do chip em wafer alinhado.....	21
d.2) Sob o ponto de vista do OPERADOR:	22
d.2.1) Funcionalidade: Interromper geração de camada do chip.....	22
d.2.2) Funcionalidade: Avaliar qualidade da gravação de wafer.....	22
e) Assunto: Movimentação da Mesa nas Direções x, y e θ.....	22
e.1) Sob o ponto de vista do MOTOR_X:.....	22
e.1.1) Funcionalidade: Posicionar Mesa na direção x.....	22
e.2) Sob o ponto de vista do MOTOR_Y:.....	23
e.2.1) Funcionalidade: Posicionar Mesa na direção y.....	23
e.3) Sob o ponto de vista do MOTOR_θ:.....	24
e.3.1) Funcionalidade: Posicionar Mesa na direção θ.....	24
f) Assunto: Monitoramento do Microscópio Eletrônico.....	24
f.1) Sob o ponto de vista do OBTURADOR DO FEIXE:	24
f.1.1) Funcionalidade: Interromper ou restabelecer fluxo de elétrons.....	24
f.2) Sob o ponto de vista da FONTE DE ALTA TENSÃO:.....	25
f.2.1) Funcionalidade: Fornecer energia aos elétrons do feixe.....	25
f.3) Sob o ponto de vista do FILAMENTO:.....	25
f.3.1) Funcionalidade: Determinar a densidade de corrente do feixe de elétrons.....	25
f.4) Sob o ponto de vista da LENTE OBJETIVA:.....	26
f.4.1) Funcionalidade: Focalizar o feixe de elétrons.....	26
f.5) Sob o ponto de vista da LENTE CONDENSADORA:.....	26
f.5.1) Funcionalidade: Uniformizar e dar forma ao feixe de elétrons.....	26
2.1.2. Lista de Eventos Externos.....	27
2.2. SEÇÃO ESQUEMATICA	30
2.2.1. Esquema Transaccional.....	30
2.2.2. Esquema Semântico.....	31
2.2.3. Esquema da Dinâmica.....	72

2.2.3.1. Versão utilizando Diagramas de Estados e Transições.....	72
2.2.3.2. Versão utilizando Redes de Petri Estendidas.....	80
2.2.3.2.2. Temporizador ("Timer").....	80
2.2.3.2.3. Relógio.....	81
2.2.3.2.4 Modelagem por Redes de Petri.....	82
Volume 2	
3. MODELO DO COMPORTAMENTO.....	92
3.1. MODELO DA INFORMAÇÃO.....	92
3.1.1. <i>Esquema da Memória Essencial</i>	92
3.1.2. <i>Representação Detalhada da Informação</i>	94
3.2. MODELO DE ATIVIDADES.....	94
3.2.1. <i>Esquema de Atividades Essenciais</i>	94
3.2.2. <i>Organização Hierárquica do Esquema de Atividades</i>	95
3.2.3. <i>Especificação das Atividades Primitivas</i>	114
3.2.3.1. Seção de Definições Globais.....	114
3.2.3.1.1. Linguagem de Especificação.....	114
3.2.3.1.2. Cláusulas Globais.....	115
3.2.3.2. Lista de Pré- e Pós- Condições.....	115
F1.1.1 - interpreta figura.....	115
F1.1.2 - calcula movimentação para posição traçando.....	119
F1.1.3 - calcula movimentação para posição sem traçar.....	121
F1.1.4 - emite status.....	123
F1.2.3 - valida pedido alinhamento.....	124
F1.2.1.1 - atualiza estado wafer.....	126
F1.2.1.2 - registra variáveis processo.....	126
F1.2.1.3 - acompanha estado do microscópio.....	127
F1.2.1.4 - verifica estado do microscópio.....	129
F1.2.1.5 - restaura estado wafer.....	130
F1.2.2.1 - alinha mesa na direção x.....	131
F1.2.2.2 - alinha mesa na direção y.....	132
F1.2.2.3 - determina posição de marca.....	132
F1.2.2.4 - calcula ajuste θ	135
F1.2.2.5 - calcula origem x-y.....	136
F1.3 - imprime relatório wafer.....	136
F1.4.1 - valida pedido iniciação wafer.....	137
F1.4.2 - calcula tensão e corrente.....	142
F1.4.3 - registra iniciação com insucesso.....	143
F2.1.1 - abre obturador feixe.....	143
F2.1.2 - fecha obturador feixe.....	144
F2.1.3 - verifica obturador feixe.....	144
F2.2.1 - envia comando para mesa xy.....	145
F2.2.2 - avalia posição da mesa xy.....	146
F2.3.1 - envia comando para mesa θ	150
F2.3.2 - avalia posição da mesa θ	151
5. DICIONÁRIO DE DADOS.....	160
5.1. SEÇÃO DE DEFINIÇÕES GLOBAIS.....	160
5.2. DICIONÁRIO DE DADOS.....	160
Agrupamento de Dados.....	161
Depósito Externo.....	164
Depósito Interno.....	165
Agrupamento de Entidades Externas.....	168
Elementos de Dados.....	169
Entidades Externas.....	179
Entidade Subordinada do Esquema Semântico.....	181
Fluxo de Controle Virtual.....	191
Fluxos de Dados Contínuos.....	192
Fluxos de Dados Discretos.....	194
Relacionamento com Atributos Presente no Esquema Semântico.....	196
Relacionamento Presente no Esquema da Memória Essencial.....	200
Relacionamento Presente no Esquema Semântico.....	201
Sinais.....	202
6. CONCLUSÃO.....	205
AGRADECIMENTO.....	209

BIBLIOGRAFIA	209
ANEXO A - CÁLCULO DE "CONTROLE_X_MOTOR" E "CONTROLE_Y_MOTOR"	211
A.1- CÁLCULO PARA MOVIMENTAÇÃO DE MESA NAS DIREÇÕES X E Y A SUA VELOCIDADE MÁXIMA	211
A.2- CÁLCULO PARA A MOVIMENTAÇÃO DA MESA NA DIREÇÃO DE UMA LINHA DE TRAÇADO GÊNÉRICA	211
ANEXO B - REDES DE PETRI: RAMO DETERMINANTE E OUTRAS EXTENSÕES DE NOTAÇÃO.....	212
ANEXO C - EXTENSÕES DO ESQUEMA SEMÂNTICO	213

Modelagem da Essência de um Sistema de Controle e Monitoramento de Litografia por Feixe de Elétrons - COMONLIFE

Maria Luiza d'Almeida Sanchez

UFF- Departamento de Engenharia de Telecomunicações

DI/PUC - Rio

e-mail: mluiza@caa.uff.br

Bruno Maffeo

DI/PUC - Rio

e-mail: maffeo@inf.puc-rio.br

PUC - Rio. Inf. MCC - 029/95

Abstract:

This work emphasizes the experimental approach to Software Engineering. It follows a model of research inspired on methods of empirical research used by traditional engineering disciplines. Particularly aiming at the conceptual modeling of software systems, we elaborated on tools and techniques proposed for the development of software for process-control real-time systems as extensions of those in use by practitioners for developing conventional information systems. This choice reflects a concern related to reducing the costs associated with the transfer to practice of the proposed technology. These tools and techniques were experimented and refined within the context of a controlled empirical process: the development of a realistic system, COMONLIFE, with size and intrinsic complexity seemingly adequate to the scope of the experiment. Specifically, the work focuses the phase of Requirements Analysis and Specification, restricted to the construction of the Conceptual Model for COMONLIFE.

Keywords :

Real-Time Systems, Process-Control Systems, Requirements Analysis, Conceptual Model, Essential Model.

Resumo:

O presente trabalho privilegia a vertente experimental da Engenharia de Software. O método de pesquisa empregado baseia-se num entendimento do que tem sido o método de pesquisa aplicada empregado nas disciplinas de engenharia tradicionais. Dentro dessa filosofia e direcionado para a modelagem conceitual de sistemas de software, foram experimentadas e testadas ferramentas e técnicas propostas para o desenvolvimento de software para sistemas processo-controle de tempo-real, originadas na prática do desenvolvimento de sistemas de informação convencionais. Essa escolha reflete uma preocupação no sentido de diminuir custos associados à transferência para a prática da tecnologia proposta. Essas ferramentas e técnicas foram refinadas dentro do contexto de um processo de experimentação controlada: o desenvolvimento de um sistema realista, COMONLIFE, presumivelmente dotado de complexidade intrínseca e porte adequados à abrangência da experimentação. Especificamente, este trabalho focaliza a fase de Análise e Especificação de Requisitos sob a óptica da modelagem conceitual do COMONLIFE.

Palavras-Chaves:

Sistemas de Tempo-Real, Sistemas Processo-Controle, Análise de Requisitos, Especificação de Requisitos, Modelagem Conceitual, Modelagem da Essência.

1. Introdução

A motivação principal da linha de pesquisa na qual este trabalho está inserido relaciona-se ao processo de desenvolvimento de sistemas de tempo-real, de grande porte e em ambiente distribuído, para controle/monitoramento de processos. Quando comparados a aplicações comerciais convencionais, sistemas processo-controle (“process-control systems”) geralmente apresentam menor tolerância associada a requisitos de desempenho e a falhas, maior tempo de desenvolvimento e maior dimensionamento da equipe técnica.

Devido à complexidade dessa classe de sistemas, cada projeto constitui investimento de risco significativo, o que corresponde a probabilidade alta de não haver sucesso no desenvolvimento e, conseqüentemente, de inexistir retorno sobre o investimento realizado. Quanto aos sistemas em si, observa-se atualmente forte tendência no sentido de construí-los cada vez mais complexos e/ou inovadores [Levenson91] e, portanto, assumindo maiores riscos. Como agravante típica dessa classe de sistemas, verifica-se que pequenas distorções comportamentais no subsistema de controle podem ter conseqüências graves relacionadas à segurança de equipamentos e pessoas [Levenson91].

Após exame detalhado de sistemas complexos, Perrow [Perrow84] concluiu que acidentes associados a sistemas processo-controle não podem ser completamente eliminados. Eles decorrem da grande complexidade desses sistemas e do forte acoplamento existente entre seus componentes. Quanto maior a complexidade do subsistema de controle, que em geral corresponde à grande complexidade do processo controlado, maior a probabilidade de ocorrência desses ditos “acidentes normais”. Computadores aumentam a complexidade dos sistemas nos quais estão embutidos [Levenson91] e, em conseqüência, a probabilidade de acidentes. Esse aumento de complexidade é sobretudo devido à enorme adaptabilidade do software, que permite a construção de sistemas processo-controle mais complexos e a introdução de novos tipos de controle também mais complexos [Levenson91]. O acoplamento entre componentes do sistema também aumenta pois, por si só, o computador é um fator de acoplamento. Por outro lado, a introdução de sistemas de computação apresenta vantagens sobre os controles convencionais (mecânicos, analógicos e humanos), o que inevitavelmente os leva a ser cada vez mais utilizados.

Como em princípio deve ocorrer em relação a qualquer sistema artificial construído para atender a propósitos previamente estabelecidos, a implementação de um subsistema de controle deve estabelecer um comportamento desejado. Esse comportamento é especificado nos requisitos, os quais devem conter informações suficientes para que seja possível distinguir entre os comportamentos desejados e os não desejados de forma completa e não ambígua. Linguagens de especificação que não exponham corretamente as distinções de comportamentos relevantes são inadequadas [Jaffe91]. Ambigüidade ou imprecisão nos requisitos afeta a capacidade de determinar a correção de sistemas.

A correção de sistemas possui dois aspectos:

- ◆ o sistema implementado deve satisfazer os requisitos especificados;
- ◆ os requisitos especificados devem corresponder ao comportamento esperado e satisfazer as restrições impostas pelo ambiente externo ao sistema.

Nessas condições, os modelos a serem empregados no processo de desenvolvimento não podem focalizar apenas a validade da implementação em relação a uma especificação de requisitos. Para garantir segurança, disponibilidade, confiabilidade e desempenho, os modelos empregados em todas as fases do desenvolvimento, em especial durante a elicitação de requisitos, devem especificar e prever o comportamento (normal e anormal) do ambiente externo sob todas as

circunstâncias relevantes, explicitando as restrições impostas pelo processo controlado e incluindo o fato de que a introdução de um sistema baseado em computadores pode causar mudanças nesse comportamento.

Eventos críticos, muitos deles correspondentes a falhas ocorridas no ambiente externo, devem associar-se a ações imediatas do subsistema de controle, componente crítico do sistema processo-controle, visando garantir a segurança do processo. A eficiência e a eficácia desse subsistema são condições necessárias para seu emprego.

De um ponto de vista técnico, os erros incorridos na fase correspondente à **especificação de requisitos** têm sido contabilizados como os principais responsáveis pelas falhas graves observadas em sistemas de computação [Boehm75, Endres75, Glass91, Levenson91, Levenson90, Liskov86]. Também, verifica-se que o custo para remover esses erros é muito maior do que para remover erros introduzidos em fases posteriores do processo de desenvolvimento [Boehm75].

Caracteristicamente, a pesquisa em Engenharia de Software tem atribuído ênfase insuficiente à avaliação prática das hipóteses, ferramentas e técnicas de trabalho por ela gerados. Isso decorre certamente da complexidade e dos grandes custos associados a projetos de pesquisa orientados para esse tipo de experimentação e provavelmente a uma percepção ainda mal definida em relação a qual deva ser o método a ser empregado em uma atividade experimental nessa área. Em particular, percebe-se que as analogias possíveis com a prática experimental associada a outras disciplinas - tais como a Física e a Química - mais antigas ainda não foram completamente exploradas. De todo modo, qualquer que seja a origem desse afastamento entre a pesquisa e a prática [Glass94], antecipa-se que, permanecendo, ele pode provocar um retardamento significativo no progresso do conhecimento técnico-científico relativo ao processo de desenvolvimento de software.

Visando contribuir para a diminuição do afastamento mencionado no parágrafo precedente, a linha de pesquisa da qual resulta o presente trabalho, tem buscado privilegiar a vertente experimental da Engenharia de Software. O método empregado baseia-se no entendimento dos autores do que tem sido o método de pesquisa aplicada empregado nas engenharias tradicionais: dado um problema, novo ou antigo, empreende-se

- ◆ a análise das soluções existentes, nela incluindo-se a busca de analogias para o problema e para as soluções,
- ◆ a proposta de melhores soluções,
- ◆ a construção ou o desenvolvimento relativo à proposta,
- ◆ repetitivamente, a análise comparativa qualitativa/quantitativa dos resultados obtidos, gerados pelo processo de construção ou desenvolvimento, até que não seja mais possível melhorar a proposta.

Certamente, empregar um método baseado em experimentação controlada implica aumentar o custo da pesquisa em Engenharia de Software, bem como o prazo para obtenção de resultados válidos e a dificuldade para divulgá-los. Não empregá-lo induz a uma pesquisa cujo compromisso primordial é com a lógica da formulação teórica e não com a realidade da prática, afastando-a dos modelos de pesquisa (sobretudo em engenharia) onde a validação e o refinamento da teoria fundamenta-se na construção ou no desenvolvimento de artefatos com características realistas.

Dentro dessa filosofia e partindo-se de modelos testados na prática da construção de sistemas convencionais comerciais, foram elaboradas propostas para o processo de desenvolvimento de software para sistemas processo-controle em tempo-real. Essas propostas foram testadas e refinadas através de um processo de experimentação controlada - o desenvolvimento de um sistema real dotado de complexidade e porte necessários à abrangência da experimentação. Visando reduzir os

custos de transferência da tecnologia desenvolvida, as propostas introduzidas baseiam-se em ferramentas conceituais e técnicas de modelagem próximas àquelas já empregadas com sucesso na prática. Especificamente neste trabalho, o foco é direcionado para a fase de Especificação de Requisitos, sob a óptica de uma modelagem conceitual do sistema a ser desenvolvido.

Está cada vez mais difundida na área de Informática a convicção de que o processo de desenvolvimento de software só terá a capacidade de gerar produtos de alta confiabilidade e eficácia comprovada na medida que esse processo utilize instrumentos de modelagem que abranjam também suas etapas - Análise (modelagem conceitual) e Design (modelagem da implementação) - de mais alto nível de abstração em relação à tecnologia empregada na implementação do sistema.

Essa convicção é mais vigorosa quando a classe do software a ser construído incorpora características de sistemas de tempo-real. Nesse caso, pesquisas recentes [Ward85, Maffeo91, Maffeo92, Barbosa92, Clemente92] em Engenharia de Software dirigiram-se no sentido de definir um conjunto de instrumentos - ferramentas conceituais e técnicas de modelagem - que possam constituir apoio eficaz ao processo de desenvolvimento nessas etapas que antecedem a etapa de codificação.

Os modelos assim produzidos devem situar-se em um nível de abstração considerado “natural” em relação ao problema a ser abordado e “abstrato” em relação aos aspectos relacionados à implementação. Iniciar o processo de desenvolvimento a partir desse nível é certamente mais promissor do que começar a construção do sistema já empregando uma linguagem de programação.

Com algumas extensões importantes, as ferramentas e as técnicas de **modelagem da essência** de sistemas sócio-técnicos convencionais [Maffeo92] mostraram-se úteis para especificar requisitos (ações, informação e restrições) de sistemas de tempo-real. Foram empregadas com sucesso em [Barbosa92, Clemente92, Barbosa95]. Essa modelagem conceitual utilizou linguagens de representação definidas rigorosamente que permitem a distinção entre comportamentos desejados e não desejados. Para gerar o Modelo da Essência do subsistema de controle, emprega-se um conjunto de instrumentos de modelagem que, a partir de visões diferentes sobre o sistema processo-controle, facilita a descoberta de omissões/erros no modelo. A representação mantém um alto nível de abstração, modelando o subsistema de controle de modo invariante em relação a qualquer alternativa de implementação. Apesar disso, sua utilização nem sempre possibilitou um perfeito entendimento do problema a resolver, evidenciando a necessidade de aperfeiçoar-se o conjunto de ferramentas/técnicas empregadas e de estabelecer-se uma especificação mais precisa dos critérios que recomendam sua utilização. Além disso, devido à complexidade dos sistemas dessa classe, a construção do Modelo da Essência não é simples pois ainda não existe um conjunto completo de regras que relacionem os padrões de modelagem às diversas classes de problema.

Muitas dessas ferramentas/técnicas de modelagem já possuem formalização matemática [Richter92]. As definições de sintaxe e semântica [Ward85, Maffeo92] propostas para o Modelo do Comportamento permitem afirmar que esse é um modelo rigoroso e totalmente formalizável matematicamente. Visando melhorar seu poder de comunicação, o modelo utiliza anotações informais compreendendo descritores sugestivos associados a elementos formais de modelagem, cuja interpretação ligada ao mundo "real" restringe-se à definição dos dados presente no Dicionário de Dados. Essa definição será sempre, qualquer que seja o instrumento de modelagem usado, informal.

A modelagem conceitual de um sistema de tempo-real para controle/monitoramento de processos constitui desafio bastante atual para a Engenharia de Software. O objetivo principal deste trabalho é contribuir para aumentar o entendimento do processo de modelagem da essência. Para isso, seu conteúdo apresenta o resultado de um experimento controlado, envolvendo o

desenvolvimento de um subsistema de controle/monitoramento para um processo específico, visando testar, avaliar criticamente e refinar o conjunto de ferramentas conceituais e técnicas de modelagem inicialmente propostas, além de complementar esse conjunto e estabelecer critérios precisos para seu emprego.

Com esse objetivo, pretende-se evidenciar a pertinência da estrutura da modelagem da essência tal como é atualmente preconizada na área dos chamados Métodos Estruturados [Ward85, Maffeo92]. Utilizando essa estrutura, tenta-se obter um enunciado completo e preciso do problema a ser resolvido (Modelo do Contexto) e especificar rigorosamente uma solução abstrata para esse problema (Modelo do Comportamento).

Enfoques distintos e complementares sobre o contexto do sistema (Descrição Sumária, Descrição de Objetivos, Descrição das Operações, Lista de Eventos Externos, Esquema Transacional, Esquema Semântico, Esquema da Dinâmica e Dicionário de Dados) permitem uma visão abrangente das necessidades do ambiente externo a serem atendidas pelo sistema. A redundância controlada introduzida por esses enfoques, complementada por indispensável disciplina de modelagem, permitem assegurar a consistência do enunciado do problema.

Analogamente, enfoques distintos e complementares sobre o estado (Esquema e Detalhe da Informação) e o comportamento (Esquema e Detalhe das Atividades) do sistema permitem modelar rigorosamente uma solução abstrata para o problema enunciado.

Adicionalmente, pretende-se demonstrar que a Lista de Eventos Externos é instrumento eficaz para registrar falhas no ambiente externo, dando maior visibilidade a questões que afetem a segurança em sistemas processo-controle. A representação da ocorrência de falhas no Modelo do Contexto e de seu tratamento no Modelo do Comportamento permitem uma avaliação precisa sobre o quanto essas questões fazem parte do escopo do sistema.

Dessa forma, visa-se:

- ◆ estabelecer as condições para realizar uma modelagem conceitual que especifique requisitos de forma a garantir a confiabilidade e a segurança do sistema a ser construído;
- ◆ obter uma considerável redução de erros no produto final e de custos nas fases de design, implementação, implantação e manutenção do sistema.

Foi nesse contexto que estabeleceu-se a proposta de desenvolver o subsistema de controle/monitoramento **COMONLIFE - Controle e Monitoramento de Litografia por Feixe de Elétrons**. O sistema processo-controle correspondente é parte de um projeto, desenvolvido em conjunto com o Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia e o Departamento de Física da PUC-Rio, que constitui uma base de experimentação interessante para ferramentas e técnicas de modelagem conceitual.

Para a construção do **Modelo da Essência**, foram inicialmente utilizadas as mesmas ferramentas e técnicas empregadas em [Barbosa92, Clemente92]. O sistema proposto para o experimento possui porte e complexidade maiores do que os daqueles tratados nessas referências e isso impactou significativamente a construção do modelo ao ser-lhe exigido um elevado nível de comunicação e precisão.

Especificamente, o presente trabalho visa:

- ◆ apresentar a estrutura do Modelo da Essência gerado no processo de desenvolvimento, revelando as características de cada elemento dessa estrutura;

- ◆ evidenciar a forma de registro e o tratamento conceitual de exceções, aqui identificadas como falhas que possam ocorrer em dispositivos pertencentes ao ambiente externo ao subsistema computacional para controle/monitoramento;
- ◆ facilitar o uso futuro das ferramentas e técnicas de modelagem da essência, constituindo uma documentação básica para guiar o emprego dessas ferramentas e técnicas e apoiar o controle da qualidade dos modelos a serem gerados.

Normalmente, o emprego desse método de desenvolvimento associa-se a um custo considerável alocado à fase de elicitação, análise, especificação e documentação dos requisitos essenciais para o sistema. Esse custo pode ser reduzido, compativelmente com a redução da qualidade associada ao Modelo da Essência produzido, utilizando-se um subconjunto dos instrumentos de modelagem da estrutura apresentada neste trabalho. Trata-se aqui de uma decisão de cunho estritamente gerencial, que deve ser tomada de forma bastante criteriosa sobretudo no que se refere à modelagem do contexto. De fato, em sistemas processo-controle, é indispensável uma representação completa e precisa do comportamento possível do ambiente externo ao subsistema computacional que executará o controle, sobretudo nos aspectos referentes a falha.

2. Modelo do Contexto

2.1. Seção Detalhada

2.1.1. Definição do SISTEMA

2.1.1.1. Descrição Sumária

2.1.1.1.1. Funcionamento do SISTEMA

COMONLIFE destina-se a monitorar e controlar um equipamento de litografia por feixe de elétrons baseado em microscópio eletrônico e mesa x-y- θ (suporte horizontal capaz de deslocar-se nas direções x e y e de sofrer rotações em torno de eixo vertical).

O microscópio eletrônico é composto de (ver figura 1):

- Obturador do Feixe: responsável por permitir a passagem do feixe de elétrons;
- Fonte de Alta Tensão: responsável por transferir a energia com a qual os elétrons do feixe incidem sobre a superfície do semiconductor;
- Filamento: responsável por determinar a densidade de corrente do feixe de elétrons;
- Lente Objetiva: responsável por determinar o diâmetro do feixe;
- Lente Condensadora: responsável por uniformizar e dar forma ao feixe;
- Detector de Corrente de Absorção: responsável por determinar o estado do Obturador do Feixe;
- Detector de Elétrons Retro-espalhados e Detector de Elétrons Secundários: responsáveis por recolher os elétrons que retornam da superfície sobre a qual incide o feixe de elétrons e permitir que a imagem dessa superfície seja exibida em monitor acoplado ao microscópio eletrônico.

O módulo Gerador de Padrão corresponde a estratégia de traçado empregada para geração de máscara pelo subsistema de controle e o módulo Offset da Posição do Campo é equivalente a medida de posição da mesa (em relação ao sistema de coordenadas sobre o wafer).

A mesa x-y- θ é composta de:

- Motor, um para a direção x (motor x) e outro para a y (motor y): responsável por mover a mesa em cada uma dessas direções;
- Interferômetro Ótico, um para a direção x e outro para a y: responsável por determinar a posição da mesa em cada uma dessas direções;
- Motor θ : responsável pela rotação da mesa no plano xy, permitindo o alinhamento das camadas do chip a ser produzido;
- Detector θ : responsável por determinar o ângulo da mesa no plano xy, em relação a um eixo de origem.

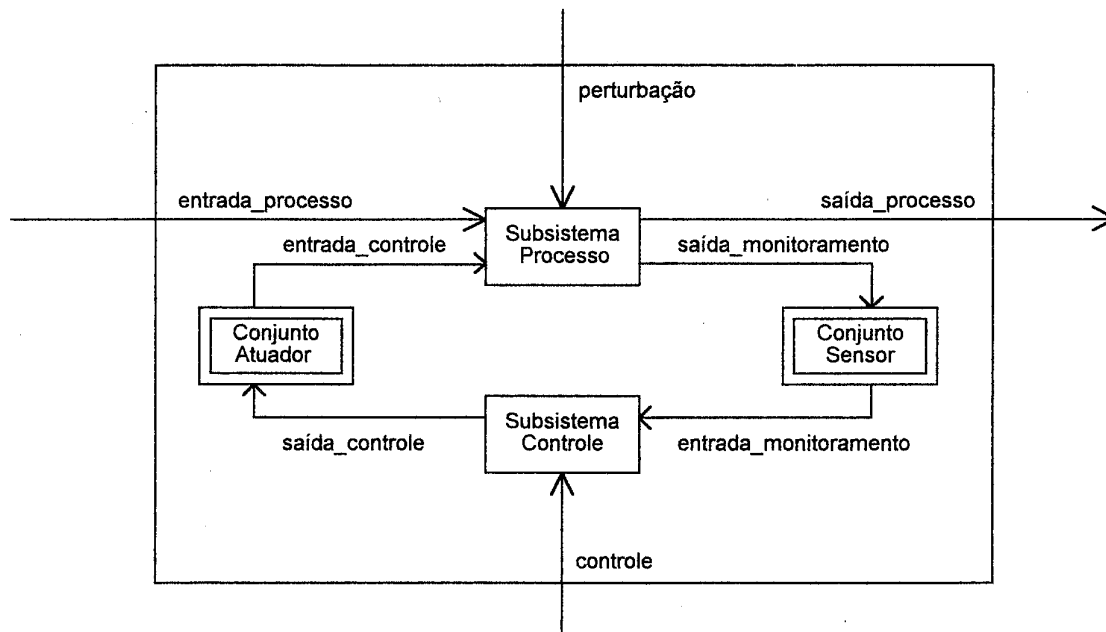
O processo de litografia por feixe de elétrons utiliza um **wafer** (material semiconductor em forma de hóstia) de duas a oito polegadas de diâmetro, sobre o qual é aplicado um **resiste**, material polimérico constituindo uma camada superficial que será submetida a processos químicos.

Baseia-se na geração de camadas sobre o wafer, utilizando um fino feixe de elétrons que pode ser defletido, ligado e desligado. Cada camada corresponde à reprodução do desenho de uma máscara definida por um sistema de C.A.D. (Computer Aided Design).

Um chip é constituído de várias camadas litográficas superpostas. Uma máscara no arquivo C.A.D. representa uma ou mais camadas do chip. Vários chips idênticos são replicados em um mesmo wafer. Os parâmetros (**parâmetros de wafer**) empregados durante a geração das camadas que constituem o chip dizem respeito:

- à identificação do wafer;
- ao número de réplicas do chip a serem produzidos no wafer;
- a **parâmetros_ operação** correspondentes aos valores de grandezas físicas (voltagem da Fonte de Alta Tensão, corrente da Lente Objetiva, corrente da Lente Condensadora e corrente de emissão do filamento) e aos valores de traçado sobre o wafer (dose do feixe de elétrons, diâmetro do feixe e resolução de traçado) a serem estabelecidos no equipamento;
- à identificação (**identificação_chip**) do conjunto de arquivos, gerados pelo sistema de C.A.D., que definem as máscaras_chip a serem traçadas.

Formalização:



entrada_processo	∈	CONJUNTO_POTÊNCIA	(Cj_Valor_Entrada	x	CJ_Tempo_Entrada)
saída_processo	∈	CONJUNTO_POTÊNCIA	(CJ_Valor_Saída	x	CJ_Tempo_Saída)
perturbação	∈	CONJUNTO_POTÊNCIA	(CJ_Valor_Perturbação	x	CJ_Tempo_Perturbação)
controle	∈	CONJUNTO_POTÊNCIA	(CJ_Sinal	x	Cj_Tempo_Sinal U
			Cj_Comando	x	CJ_Tempo_Comando)
entrada_sistema	=	entrada_processo + perturbação + controle			
saída_sistema	=	F(entrada_processo + perturbação + controle) = saída_processo			

Figura 2 - Sistema processo-controle - Modelo Clássico de Retro-Alimentação

A figura 2 ilustra um modelo possível para um sistema processo-controle de loop fechado, composto de quatro componentes básicos: subsistema processo, subsistema controle, conjunto atuador e conjunto sensor. O subsistema processo é controlado através de variáveis manipuladas (entrada_controle) e o comportamento corrente é monitorado através de variáveis medidas (entrada_monitoramento). A mudança de estado do processo se dá como resultado de mudanças de condições internas, variáveis manipuladas e perturbações no ambiente.

Como em quase todo sistema processo-controle (ver figura 2), partes do processo fogem ao escopo do subSISTEMA¹ computacional. O SubSISTEMA computacional COMONLIFE atua apenas sobre o microscópio eletrônico e a mesa x-y- θ para viabilizar a geração de camadas. Algumas etapas do processo, fora do escopo do COMONLIFE, devem ser executadas antes de iniciar a produção de chips:

- preparação inicial de um wafer sobre o qual serão geradas as camadas do chip em questão, revestindo-o por um resiste cujas características permitam determinar a intensidade do feixe de elétrons e o tempo de exposição a serem utilizados;
- geração do conjunto de arquivos C.A.D. que definem as máscaras correspondentes às camadas do chip a ser produzido. Esse conjunto identifica o chip, o qual, normalmente, possui diversas camadas litográficas superpostas, que podem estar detalhadas em um ou mais arquivos C.A.D..

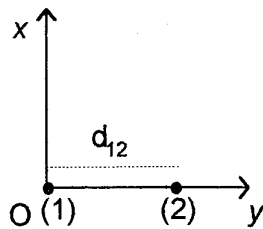
O subSISTEMA computacional controla a geração de uma camada por vez. Excetuando o caso da última, após a geração de cada camada, o wafer deve ser retirado do equipamento para sofrer tratamentos químicos que visam preparar sua superfície para receber a próxima camada. Enquanto isso, outro wafer pode estar sendo gravado, isto é, nele pode estar sendo traçada uma máscara visando à geração de nova camada sobre sua superfície.

A retirada do wafer para tratamento químico é outra etapa do processo fora do escopo do controle. Essa manipulação gera a necessidade de administrar a produção de chips em um dado wafer. Para isso, cada **wafer** deve ser **iniciado**, isto é, devem ser-lhe associados uma identificação e os parâmetros_operação empregados na gravação das máscaras_chip e, para permitir a geração de camadas superpostas, devem ser traçadas marcas na superfície do wafer (**marcas de alinhamento**), que definam um sistema de coordenadas associado ao wafer, fixo em sua superfície.

Sempre que é manualmente recolocado no equipamento para a geração de nova camada, o posicionamento do wafer precisa ser verificado pois, em geral, terá havido alguma modificação em relação à colocação anterior. Pequenas mudanças em sua posição relativa sobre a mesa (rotação e translação) podem ser determinadas a partir de diferenças entre a posição real e a esperada de duas marcas de alinhamento. O alinhamento do wafer requer um ajuste fino de forma que, durante a geração das sucessivas camadas, um mesmo sistema de coordenadas associado ao wafer possua referenciamento invariante em um sistema de coordenadas absolutas e, nessas condições, permita definir o estado **wafer alinhado**.

Por simplicidade, o sistema de coordenadas absolutas utilizado como referência deve ter eixos paralelos às direções (ortogonais) x e y de deslocamento da mesa e a origem deve coincidir com a interseção do feixe de elétrons com um plano paralelo à superfície do wafer (ou, equivalentemente, da mesa) - ver figura 3. O feixe de elétrons, ao longo do eixo do microscópio eletrônico, define o eixo de coordenadas z.

¹ sempre que expreso em maiúsculas, o termo SISTEMA refere-se ao COMONLIFE



origem O	:	coincide com a primeira marca de alinhamento
eixo Ox/Oy	:	paralelo ao deslocamento da mesa na direção x/y
eixo Oz	:	coincide com o feixe de elétrons ao longo do eixo do microscópio eletrônico
(1)/(2)	:	primeira/segunda marca de alinhamento

Figura 3 - Sistema de Coordenadas sobre o Wafer

Antes de iniciar o processamento de um wafer (iniciação do wafer ou geração de camada do chip), a mesa pode encontrar-se em qualquer posição em relação ao sistema de coordenadas absolutas e deve ser levada a uma posição de referência inicial (**posição de repouso da mesa**) a partir da qual são realizados os deslocamentos necessários para atingir uma outra posição específica (por exemplo, a posição de uma marca de alinhamento). Ainda é necessário o conhecimento pelo SISTEMA da posição da origem do sistema de coordenadas sobre o wafer em relação ao sistema de coordenadas absolutas, informação constante de **parâmetros de wafer**. As posições referenciadas serão suas posições relativas a essa origem, definidas no arquivo C.A.D. correspondente à máscara a ser traçada.

A gravação de um wafer é feita com base em figura representada em um arquivo C.A.D. - correspondente a uma camada do wafer.

Essa figura deve ser replicada várias vezes, tantas quantas forem as réplicas do chip a serem produzidas. Cada réplica do chip corresponde a um retângulo e, para que o sistema possa efetuar a gravação da figura associada, as coordenadas x e y presentes no arquivo C.A.D. devem corresponder a deslocamentos relativos a um dos vértices desse retângulo.

A posição do retângulo é bem definida em relação ao sistema de coordenadas associado ao wafer e será recuperada cada vez que o wafer for alinhado. Cada camada de uma réplica do chip está gravada dentro do retângulo que delimita essa réplica. Por construção, as arestas dos retângulos são paralelas às direções dos eixos x e y do sistema de coordenadas associado ao wafer.

Esse sistema de coordenadas é a base para a geração da máscara. Quando o wafer está alinhado, seus eixos são paralelos aos eixos do sistema de coordenadas absolutas e sua origem é a posição de uma das marcas de alinhamento (por exemplo: a primeira marca de alinhamento).

A referência a posicionamento da mesa determinado por valores específicos de "x_mesa" e "y_mesa" significa:

- x_mesa: negativo do valor do deslocamento da mesa, efetuado a partir da origem do sistema de coordenadas sobre o wafer, que faz o eixo do microscópio eletrônico incidir sobre a projeção do ponto ("x_mesa", "y_mesa") na direção x;
- y_mesa: negativo do valor do deslocamento da mesa, efetuado a partir da origem do sistema de coordenadas sobre o wafer, que faz o eixo do microscópio eletrônico incidir sobre a projeção do ponto ("x_mesa", "y_mesa") na direção y.

2.1.1.2.2. Tarefas do SISTEMA de Controle

São tarefas do COMONLIFE:

- administrar a gravação de wafers;
- interpretar a máscara a ser traçada em wafer;
- controlar o posicionamento do wafer;
- controlar a passagem do feixe de elétrons pelo Obturador do Feixe;
- monitorar o estado do microscópio eletrônico;
- trocar informações com o operador.

A administração da gravação de wafers é feita por intermédio de:

- antes de gerar a primeira camada, garantir o traçado de marcas na superfície do wafer. Essas marcas permitem definir o sistema de coordenadas associado ao wafer em relação ao sistema de coordenadas absolutas;
- detecção de inconsistências entre os atributos dos parâmetros de wafer empregados;
- registro da história de gravação de um wafer;
- determinação da camada a gerar, requisitada pelo operador;
- identificação da máscara a ser traçada;
- cálculo e registro histórico dos valores de corrente da Lente Objetiva utilizada no equipamento durante a geração de cada camada.

Finalidades:

- garantir a geração de todas as camadas de um chip;
- permitir o alinhamento do wafer, mantendo a consistência de geração das diversas camadas;
- fornecer ao operador os valores que o equipamento deve utilizar durante a geração de cada camada.

A interpretação da máscara é feita por intermédio de:

- leitura do conjunto de arquivos C.A.D. associados ao wafer que está sendo gravado;
- determinação da espessura mínima de linha que, juntamente com a resolução selecionada pelo operador, define o diâmetro do feixe;
- tradução de cada desenho da máscara em linhas e sólidos de traçado, tantas vezes quantas forem as réplicas a serem produzidas.

Finalidade:

- determinar as características de traçado correspondentes à máscara que está sendo traçada;
- garantir a replicação do chip.

O controle do posicionamento do wafer é feito por intermédio de:

- durante sua iniciação, posicionamento do wafer em local predefinido (internamente ao COMONLIFE), rotação de ângulo θ e movimentação da mesa nas direções x e y, para executar o traçado das marcas de alinhamento;
- durante o alinhamento do wafer, rotação de ângulo θ e movimentação da mesa nas direções x e y, visando posicionar o wafer de forma que suas marcas de alinhamento ocupem a posição esperada e movimentação da mesa nas direções x e y, conforme comando do operador, visando ajustar o posicionamento das marcas de alinhamento;
- durante a geração de camada, movimentação da mesa nas direções x e y, para a posição onde deve ser iniciado um traçado (o que é feito com o Obturador do Feixe fechado e a velocidade máxima de movimentação visando agilizar a produção) e movimentação da mesa, nas direções x e y, para a posição final de traçado (o que é feito com o Obturador do Feixe aberto e com a velocidade calculada em função da dose a ser aplicada no resiste);

- monitoramento, através de sensores, da posição corrente da mesa, visando verificar se a mesa está acompanhando a movimentação controlada e efetuar correções quando necessário;
- detecção de situações de falha nas quais a mesa não obedece aos comandos enviados.

Finalidades:

- posicionar o wafer, de forma que se encontrem sob o Feixe de Elétrons a posição inicial de traçado e as posições sobre a linha de traçado até sua posição final, permitindo a geração de camada;
- garantir o alinhamento relativo das diversas camadas do chip.

O controle do Obturador do Feixe é feito por intermédio de:

- abertura/fechamento da passagem do feixe de elétrons através do obturador;
- detecção de situações de falha nas quais o obturador não obedece aos comandos enviados.

Finalidades:

- permitir o traçado de uma linha sobre o wafer, controlando a abertura do obturador;
- permitir o posicionamento do wafer sem efetuar traçado, controlando o fechamento do obturador.

O monitoramento do estado do microscópio eletrônico é feito por intermédio de:

- verificação dos valores iniciais da voltagem na Fonte de Alta Tensão e corrente do Filamento, da Lente Objetiva e das Lentes Condensadoras;
- monitoramento dos valores da voltagem na Fonte de Alta Tensão, da corrente emitida pelo Filamento, da corrente na Lente Objetiva e da corrente nas Lentes Condensadoras;
- detecção de falhas em qualquer um desses componentes do microscópio eletrônico.

Finalidades:

- verificar se o comportamento do equipamento está de acordo com o esperado pelo operador, conforme parâmetros de operação especificados;
- evitar desperdício de tempo gerando camada com o equipamento danificado.

A troca de informações com o operador é feita por intermédio de:

- pedido de iniciação de um wafer, ao qual são associados os parâmetros de wafer utilizados para sua gravação;
- pedido de geração de uma camada em wafer previamente iniciado;
- ajuste e confirmação das posições das marcas de alinhamento;
- apresentação de informações sobre andamento da geração de uma camada, isto é, estado do processo de gravação (tempo transcorrido desde o início e tempo esperado de término), comunicação da ocorrência de falha e histórico de todo o processo de gravação de um wafer.

Finalidades:

- permitir iniciar um wafer;
- permitir gerar cada uma das camadas que constituem um chip;
- permitir o alinhamento de um wafer;
- fornecer o andamento da geração de uma camada e o histórico de todo o processo de gravação de um wafer.

2.1.1.2. Objetivo

2.1.1.2.1. A Nível Estratégico

O SubSISTEMA de Controle e Monitoramento de Litografia por Feixe de Elétrons (COMONLIFE) deve contribuir para que o Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro possa assegurar a continuidade e o incremento do apoio a suas atividades de pesquisa e desenvolvimento. Esse apoio continuado e crescente ocorrerá na medida que o Departamento prossiga contribuindo, através de seus projetos, para o avanço científico e tecnológico do País.

COMONLIFE deverá permitir que essa contribuição atinja níveis significativos de eficácia, eficiência e qualidade no caso específico de um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico voltado para a produção de dispositivos microeletrônicos (chips) de elevada integração. Cumpre ressaltar que, a nível internacional, tais dispositivos são estratégicos pois permitirão um forte incremento no poder de processamento dos futuros computadores.

2.1.1.2.2. A Nível Tático

COMONLIFE deve contribuir para o aumento do desempenho e da qualidade:

- na produção de chips de alta integração;
- na pesquisa de novos materiais e técnicas litográficas.

2.1.1.2.3. A Nível Operacional

COMONLIFE deve monitorar e controlar a produção de chips obtidos através do processo de litografia por feixe de elétrons. Esse processo permite atingir resoluções entre 0,1 e 0,5 μm , indispensáveis para a obtenção do nível de integração desejado.

2.1.1.3. Descrição da Operação - Restrições e Eventos Externos Associados

a) Assunto: Geração de Camada Genérica (camada de marcas ou camada do chip).

A geração de uma camada inicia-se pela interpretação da máscara a ser traçada e, a partir da determinação da primeira linha de traçado, o SISTEMA envia os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor" visando posicionar a mesa de tal forma que a interseção do eixo do Microscópio Eletrônico com a superfície do wafer corresponda ao início da primeira linha de traçado.

A interpretação de cada figura da máscara a ser traçada no wafer dá origem a **linhas de traçado** (linhas a serem efetivamente gravadas no wafer). Para cada linha presente no arquivo C.A.D., são geradas **n** linhas de traçado adjacentes, onde **n** é o resultado da divisão da espessura da linha pela espessura do feixe de elétrons. A espessura do feixe pode ser selecionada pelo operador ajustando um de dois atributos de parâmetros_ operação: valor da **espessura** ou valor da **resolução** de traçado (inteiro que divide a menor espessura de linha para obter a espessura do feixe). Um sólido presente no arquivo C.A.D. é transformado num conjunto de linhas de traçado de acordo com uma estratégia apropriada, a ser definida posteriormente conforme o tipo de equipamento a ser utilizado no processo de eletrolitografia.

A figura correspondente à máscara a ser traçada pode ser replicada várias vezes no wafer. O SISTEMA interpreta essa figura o número de vezes correspondentes ao número de réplicas. As réplicas são limitadas por retângulos idênticos e adjacentes. São também idênticos os posicionamentos das réplicas no interior dos retângulos que as limitam. O SISTEMA calcula as suas posições de início e fim considerando como origem um dos vértices do retângulo.

a.1) Sob o ponto de vista de MOTOR_X, MOTOR_Y e OBTURADOR_FEIXE:

- Qualquer falha em dispositivo (MOTOR_X, MOTOR_Y ou OBTURADOR_FEIXE) determina a interrupção de geração de camada;

(eventos externos 18, 19, 30 ou 31)

a.1.1) Funcionalidade: Traçar linha.

- Tendo a mesa atingido a posição desejada, identificada por valores específicos de "x_mesa" e "y_mesa":

- Caso a posição atingida corresponda a início de traçado (correspondência reconhecida pelo SISTEMA a partir de informações internalizadas durante a geração de uma camada), o SISTEMA envia a OBTURADOR_FEIXE "controle_obturador" com o valor de aberto e controla a movimentação da mesa de forma que sua velocidade tenha módulo igual a **velocidade_gravação**, direção correspondente à da reta a ser traçada e sentido oposto ao de um percurso que vai do ponto inicial de traçado ao ponto final de traçado (ver anexo A). Para esse controle de movimentação da mesa, o SISTEMA emite os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor".

- **Velocidade_gravação** é calculada a partir dos seguintes atributos de parâmetros_operação: intensidade da corrente de emissão, diâmetro do feixe e tempo de exposição ao feixe de elétrons. Este último é função da espessura das linhas.

É utilizada a fórmula abaixo:

Com:

$D = \text{dose, em C/cm}^2$

$J = \text{densidade de corrente, em A/cm}^2$;

$I = \text{corrente absorvida, em A}$;

$d = \text{diâmetro do feixe, em cm}$;

$v = \text{velocidade de deslocamento da mesa, em cm/s}$

e

$D = J * t$,

obtém-se:

$t = d / v$

e

$D = (I * t) / (0.8 * d)$;

- Caso a posição atingida corresponda a fim de traçado (correspondência reconhecida pelo SISTEMA a partir de informações internalizadas durante a geração de uma camada), o SISTEMA envia a OBTURADOR_FEIXE "controle_obturador" com o valor de fechado, envia ao OPERADOR o "status" de operação (tempo transcorrido de início e tempo estimado de término) e volta a interpretar a máscara que está sendo traçada para obter uma nova linha de traçado. Existirão linhas de traçado enquanto não forem gravadas por completo o número de réplicas da máscara a traçar. Existindo linha de traçado, o SISTEMA controla o posicionamento da mesa para a posição de início de traçado, emitindo os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y (ver anexo A), visando

agilizar o processo de geração de camada. Caso não existam mais linhas a traçar, o SISTEMA finaliza a geração de camada genérica.

- Ao término de um traçado de linha sem falhas, o SISTEMA reage inabilitando a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador" e:
 - caso finalize geração de camada de marcas de alinhamento, o SISTEMA envia ao OPERADOR "tensão_e_corrente", contendo os valores de tensão na Fonte de Alta Tensão, corrente nas Lentes Condensadoras, corrente de emissão do Filamento e corrente da Lente Objetiva, esta última calculada pelo SISTEMA, para o processamento de cada camada (a fórmula empregada será definida por métodos empíricos). O SISTEMA registra, no histórico de wafer, a iniciação finalizada com sucesso ;
 - caso finalize geração de camada do chip, o SISTEMA sinaliza ao OPERADOR "término_processo". O SISTEMA registra, no histórico de wafer, a geração da camada com sucesso.

(eventos externos 9 e 10)

b) Assunto: Iniciação de Wafer.

b.1) Sob o ponto de vista do OPERADOR:

b.1.1) Funcionalidade: Iniciar wafer.

- OPERADOR inicia wafer enviando ao SISTEMA "pedido_iniciação" contendo os parâmetros de wafer (englobando identificação_wafer, identificação_chip e parâmetros_operação). Reagindo ao estímulo, o SISTEMA deve providenciar:
 - acesso de leitura ao depósito externo MÁSCARA para internalizar a máscara que descreve as marcas de alinhamento a serem traçadas. Essa máscara é elemento de máscaras_chip e especifica a forma e a posição (em relação ao sistema de coordenadas sobre o wafer) de cada marca de alinhamento (essa posição não pode coincidir com posições utilizadas para traçado das outras máscaras do chip);
 - início do histórico desse wafer, armazenando informações relativas a identificação_wafer, identificação_chip, parâmetros_operação e à posição das marcas de alinhamento obtidas a partir da máscara que descreve as marcas de alinhamento.
 - colocação da mesa na sua posição de repouso em relação ao sistema de coordenadas absolutas. Para tal são enviados os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y, visando agilizar o processo de iniciação de wafer (ver anexo A);
 - ocorrerá rejeição ("rejeição_iniciação"), sendo informado o motivo, nas seguintes situações:
 - 1) caso a identificação fornecida corresponda a wafer já iniciado anteriormente;
 - 2) caso o depósito externo MÁSCARA não contenha o conjunto completo de todas as máscaras correspondentes a todas as camadas do chip;
 - 3) caso os parâmetros_operação fornecidos referenciem atributo com valor inválido.

(evento externo 1)

b.2) Sob o ponto de vista do MOTOR_X e do MOTOR_Y

b.2.1) Funcionalidade: Levar a mesa para sua posição de repouso.

- o SISTEMA controla a colocação da mesa em sua posição de repouso emitindo os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor".
 - Tendo a mesa atingido a posição de repouso, o SISTEMA cessa a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor" e inicia a geração da camada correspondente às marcas, controlando o posicionamento da mesa nas direções x e y para levá-la à posição correspondente ao início de traçado de uma das marcas (envio dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor").

(eventos externos 9 e 10)

c) Assunto: Alinhamento de Wafer.

c.1) Sob o ponto de vista do OPERADOR:

c.1.1) Funcionalidade: Iniciar alinhamento de wafer.

- OPERADOR necessita alinhar wafer iniciado e, para isso, envia ao SISTEMA "pedido_início_alinhamento" contendo identificação_wafer. O alinhamento do wafer visa garantir o correto posicionamento relativo das diferentes camadas do chip. Reagindo ao estímulo, o SISTEMA deve providenciar:
 - a partir da identificação_wafer, determinação da posição das marcas de alinhamento gravadas na sua iniciação;
 - início de monitoramento do microscópio eletrônico (valores referentes a "tensão_fonte", "corrente_emissão_filamento", "corrente_condensadora" e "corrente_objetiva");
 - colocação da mesa na sua posição de repouso em relação ao sistema de coordenadas absolutas. Para isso são enviados os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esse deslocamento é feito de forma a atingir a velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y, visando agilizar o processo de alinhamento do wafer (ver anexo A);
 - início de alinhamento do wafer. Para isso, são emitidos os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esses fluxos permitem a movimentação da mesa nas direções x e y para que a posição provável de uma das marcas de alinhamento situe-se no eixo do microscópio eletrônico. Esse deslocamento é feito de forma a atingir a velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y, visando agilizar o processo de alinhamento do wafer (ver anexo A);
 - quando "x_mesa" e "y_mesa" atingem a faixa desejada, paralisação da mesa para aguardar confirmação ou ajuste de posição por parte do operador;
 - rejeição ("rejeição_início_alinhamento"), sendo informado o motivo, nas seguintes situações:
 - 1) caso sejam selecionados parâmetros de wafer referentes a wafer não iniciado anteriormente;
 - 2) caso não exista, no depósito externo MÁSCARA, o arquivo correspondente à máscara a ser traçada, já que o final de alinhamento do wafer é seguido do início de geração da camada correspondente do chip.

(evento externo 2)

c.1.2) Funcionalidade: Estabelecer alinhamento de wafer.

- OPERADOR participa do alinhamento de wafer realizando inspeção visual, através do monitor acoplado diretamente ao microscópio eletrônico, e informando ao SISTEMA o valor do ajuste na posição de marca, caso exista necessidade de ajustar o posicionamento nas direções x e/ou y, ou a confirmação da posição de marca, se esta encontrar-se no eixo do microscópio eletrônico. Após confirmação das marcas necessárias à definição da origem e da direção de um dos eixos do sistema de coordenadas do wafer e se ajustes tiverem sido introduzidos, uma compensação angular deverá ser efetuada através de rotação da mesa no plano xy. Para o (re)alinhamento do wafer no plano da mesa são necessárias apenas duas marcas; o segmento de reta que as une define uma direção que especifica a orientação do wafer nesse plano. Obtida essa orientação será suficiente, para estabelecer o alinhamento do wafer, posicionar sob o feixe de elétrons uma marca escolhida o que permite a determinação da origem do sistema de coordenadas do wafer. Esse posicionamento será realizado através de ajustes introduzidos pelo OPERADOR para centrar no monitor a posição da segunda marca que permanece visível após a rotação do wafer. A confirmação de sua posição por parte do OPERADOR é o suficiente para determinação da origem, já que sua posição em relativa é conhecida pelo SISTEMA.

O wafer está alinhado quando os eixos do sistema de coordenadas do wafer estão paralelos aos do sistema de coordenadas absolutas e o SISTEMA determinou a posição da origem. O processo de alinhamento está descrito na figura 2 e necessita de apenas duas marcas.

Outras marcas podem ter sido gravadas na iniciação para permitir ao OPERADOR verificar a existência de possíveis deformações causadas no wafer pelo tratamento químico a que foi submetido e, dessa forma, avaliar a qualidade dos chips produzidos.

O alinhamento é finalizado após confirmação, por parte do OPERADOR, de todas as marcas traçadas na iniciação.

- durante o alinhamento do wafer, OPERADOR confirma a posição da marca de alinhamento ao observar que a marca sob o Feixe de Elétrons está centrada no monitor. Envia ao SISTEMA "confirmação_marca".
 - caso o OPERADOR confirme a posição da primeira marca de alinhamento, o SISTEMA registra a confirmação dessa marca e movimenta a mesa para a posição da segunda marca de alinhamento, emitindo os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y (ver anexo A), visando agilizar o processo de alinhamento de wafer.
 - caso o OPERADOR confirme a posição da primeira apresentação da segunda marca de alinhamento, o SISTEMA registra o deslocamento total efetuado pela mesa para chegar à posição que está sendo confirmada e calcula (ver figura 5) a rotação necessária para o alinhamento do eixo definido pelas duas marcas confirmadas. Para isso, emite o fluxo contínuo "controle_theta_motor". O deslocamento angular é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação angular da mesa, visando agilizar o processo de geração de camada.
 - caso o OPERADOR confirme a posição da segunda apresentação da segunda marca de alinhamento, o SISTEMA considera o wafer alinhado e registra a posição da origem em relação ao Feixe de Elétrons a partir de sua posição relativa àquela que está sendo confirmada (por simplicidade, escolheu-se a origem do sistema de coordenadas coincidente com a posição da primeira marca de alinhamento e conhece-se a posição da segunda marca em relação à primeira). A seguir, o SISTEMA controla o posicionamento da mesa para apresentação de outra marca de alinhamento caso exista (o que permite avaliar a deformação do wafer); para isso, emite os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y (ver anexo A), visando agilizar o processo de

alinhamento de wafer. Caso não existam mais marcas a confirmar, o SISTEMA verifica o estado do microscópio eletrônico para iniciar a geração de camada do chip.

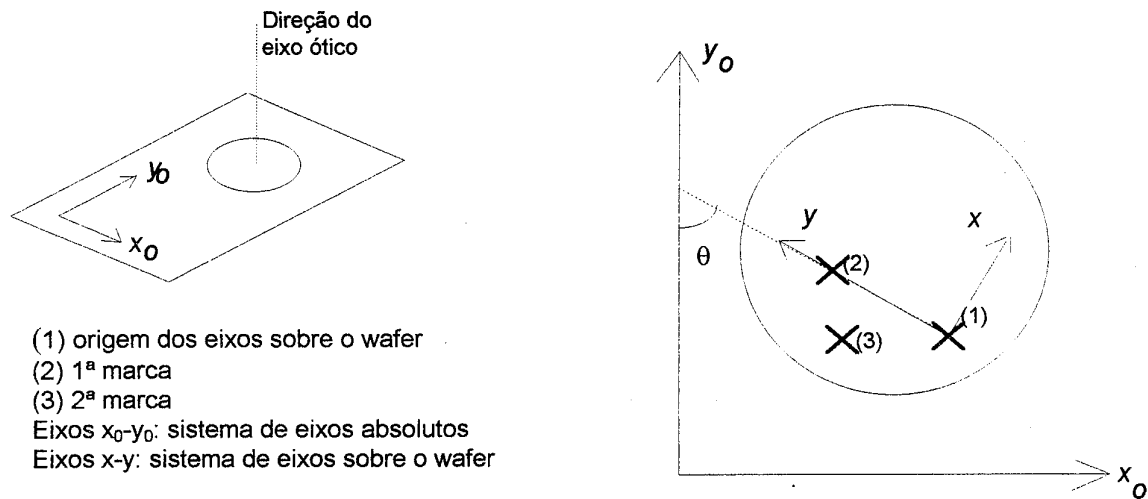


Figura 4 - Alinhamento do Wafer

Seqüência de Alinhamento

1. após ajuste, caso necessário, e confirmação da posição da primeira marca, fica garantido o posicionamento da projeção do eixo óptico sobre uma das marcas de alinhamento;
2. após uma primeira confirmação da segunda marca:
 - 2.1 não havendo necessidade de ajuste ($\theta = 0$ na figura 4), o alinhamento fica obtido;
 - 2.2 havendo necessidade de ajuste, é possível calcular o ângulo θ entre a direção de um dos eixos (eixo y) e o eixo correspondente do sistema de coordenadas absolutas (ver figura 4), a mesa é então rotacionada desse ângulo e o alinhamento obtido;
3. após ajuste, caso necessário, e segunda confirmação da segunda marca fica definida a origem dos eixos x - y sobre o wafer, já que a posição relativa entre essa marca e a origem sobre o wafer é conhecida.

- caso o wafer já esteja alinhado e todas as marcas tenham sido confirmadas, o SISTEMA registra a confirmação da última marca e verifica o estado do microscópio eletrônico para iniciar a geração de camada do chip.
- caso o wafer já esteja alinhado e ainda existam marcas a confirmar (marcas de alinhamento utilizadas para avaliar a quantidade de deformação do wafer), o SISTEMA apresenta outra marca ao OPERADOR, para isso emite os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y , visando agilizar o processo de alinhamento de wafer (ver anexo A). Para cada marca confirmada, o SISTEMA registra o deslocamento total efetuado pela mesa para chegar à posição de confirmação, isto, é o total de ajuste introduzido pelo OPERADOR para obter-se o

alinhamento da marca considerada; quando o wafer estiver alinhado, esse total indica seu grau de deformação.

(evento externo 3)

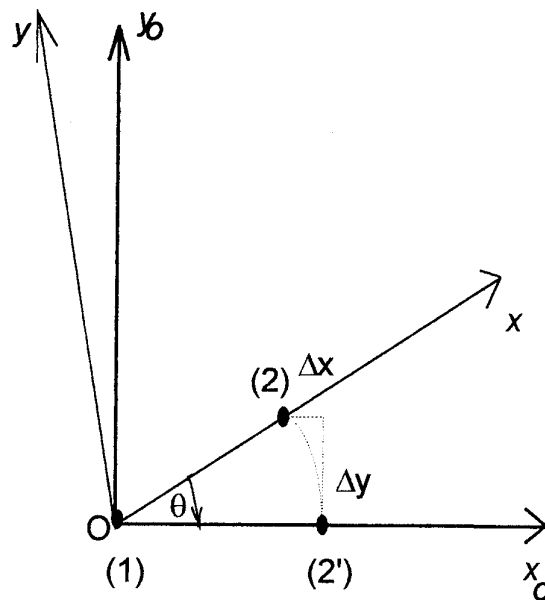


Figura 5 - Cálculo do Ângulo de Rotação

eixos Ox_0 e Oy_0 : paralelos às direções de deslocamento da mesa
o sistema de coordenadas do wafer (xOy) deve ficar paralelo ao sistema de coordenadas absolutas (x_0Oy_0)

com o wafer desalinhado: (2)/(2') corresponde à posição corrente/esperada da segunda marca de alinhamento

"deslocamento" de mesa na direção θ para obter-se alinhamento do wafer: θ , talque:

$\theta = \arctg(\Delta x/\Delta y)$, onde Δx e Δy correspondem aos deslocamentos da mesa nas direções x_0 e y_0 , respectivamente;

a composição desses deslocamentos corrige a posição da segunda marca

Observação: o sentido dos deslocamentos Δx e Δy fornecem o sinal de $\text{tg } \theta$ e, em consequência, do ângulo θ .

- durante o alinhamento do wafer, OPERADOR observa que a posição na direção x da marca de alinhamento visível não está correta e envia ao SISTEMA "ajuste_marca_x" contendo o valor do deslocamento necessário à correção. Conforme requisitado pelo OPERADOR, o SISTEMA controla a movimentação da mesa na direção x ("controle_x_motor") e internaliza o valor do deslocamento total efetuado nessa direção. Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa na direção x , visando agilizar o processo de alinhamento de wafer (ver anexo A).

(evento externo 4)

- durante o alinhamento do wafer, OPERADOR observa que a posição na direção y da marca de alinhamento visível não está correta e envia ao SISTEMA "ajuste_marca_y" contendo o valor do deslocamento necessário à correção. Conforme requisitado pelo OPERADOR, o SISTEMA controla a movimentação da mesa na direção y ("controle_y_motor") e internaliza o valor do deslocamento total efetuado nessa direção. Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa na direção y , visando agilizar o processo de alinhamento de wafer (ver anexo A).

(evento externo 5)

c.2) Sob o ponto de vista do MOTOR_X, do MOTOR_Y e do MOTOR_θ:

- Falhas nas mesas x, y ou θ , determinam interrupção de alinhamento do wafer.

(eventos externos 18, 19 ou 20)

c.2.1) Funcionalidade: Levar a mesa para sua posição de repouso.

- o SISTEMA controla o posicionamento da mesa em sua posição de repouso emitindo os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor"
 - Tendo a mesa atingido a posição de repouso, o SISTEMA cessa a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor" e inicia o alinhamento do wafer ou a iniciação do wafer. Para isso, são emitidos os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esses fluxos permitem a movimentação da mesa nas direções x e y para que a posição provável de uma das marcas de alinhamento situe-se no eixo do microscópio eletrônico. Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y, visando agilizar o processo de alinhamento de wafer (ver anexo A);

(evento externo 9 e 10)

c.2.2) Funcionalidade: Levar a mesa para posição de ajuste na direção x.

- Para ajustar a posição de marca de alinhamento na direção x, o SISTEMA, atendendo a requisição do OPERADOR ("ajuste_marca_x"), controla o posicionamento da mesa na direção x emitindo o fluxo contínuo "controle_x_motor". Tendo a mesa atingido a posição correspondente ao deslocamento requisitado, o SISTEMA cessa o envio do fluxo contínuo "controle_x_motor" causando a paralisação da mesa. A posição sob o feixe de elétrons é observada em monitor diretamente acoplado ao microscópio eletrônico, o que permite ao OPERADOR visualizar a marca de alinhamento. O SISTEMA espera que o OPERADOR envie novo ajuste ou confirmação de posição da marca de alinhamento.

(evento externo 9)

c.2.3) Funcionalidade: Levar a mesa para posição de ajuste na direção y.

- Para ajustar a posição de marca de alinhamento na direção y, o SISTEMA, atendendo a requisição do OPERADOR ("ajuste_marca_y"), controla o deslocamento da mesa na direção y emitindo o fluxo contínuo "controle_y_motor". Tendo a mesa atingido a posição correspondente ao deslocamento requisitado, o SISTEMA cessa o envio do fluxo contínuo "controle_y_motor" causando a paralisação da mesa. A posição sob o feixe de elétrons é observada em monitor diretamente acoplado ao microscópio eletrônico, o que permite ao OPERADOR visualizar a marca de alinhamento. O SISTEMA espera que o OPERADOR envie novo ajuste ou confirmação de posição da marca de alinhamento.

(evento externo 10)

c.2.4) Funcionalidade: Levar a mesa para posição de uma marca de alinhamento.

- O SISTEMA controla o alinhamento do wafer emitindo os fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor" para levar a mesa à posição em que uma das marcas de alinhamento situe-se no eixo do microscópio eletrônico. Esse alinhamento deve ser confirmado ou ajustado pelo OPERADOR pois é feito com base na posição das marcas de alinhamento gravadas na iniciação

do wafer e não leva em conta possíveis desajustes introduzidos pela manipulação do wafer. A informação referente à posição e ao número de marcas de alinhamento em um wafer é fornecida através de parâmetros_wafer, estrutura de informação que contém a posição em coordenadas absolutas da primeira marca de alinhamento e da máscara associada às marcas, que define as posições de todas as outras marcas de alinhamento relativamente à primeira marca. Essa informação é internalizada durante sua iniciação e reconhecida a partir da identificação_wafer.

- Tendo a mesa atingido a posição desejada (onde, provavelmente, uma das marcas de alinhamento estará próxima ao eixo do microscópio eletrônico), identificada por valores específicos de "x_mesa" e "y_mesa", o SISTEMA cessa a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor", ocasionando a paralisação da mesa. A posição sob o feixe de elétrons é observada em monitor diretamente acoplado ao microscópio eletrônico, o que permite ao OPERADOR visualizar a marca de alinhamento. O SISTEMA espera que o OPERADOR envie novo ajuste ou confirmação de posição da marca de alinhamento.

(eventos externos 9 e 10)

c.2.5) Funcionalidade: Levar a mesa para posição de alinhamento na direção θ .

- O alinhamento é efetuado executando rotação no plano x-y (emissão do fluxo contínuo "controle_θ_motor"), para o valor de "θ_mesa" calculado após uma primeira confirmação da segunda marca, a partir das informações obtidas nos ajustes nas direções x e y e de confirmação de marca, fornecidos pelo OPERADOR.
- Tendo a mesa θ atingido a posição desejada, correspondente à posição de alinhamento angular da mesa, o SISTEMA cessa a emissão do fluxo contínuo "controle_θ_motor", deixando ainda visível no monitor a segunda marca. O SISTEMA espera que o OPERADOR envie novo ajuste ou confirmação de posição da marca de alinhamento.

(evento externo 11)

d) Assunto: Geração de Camada do Chip.

A verificação do estado do microscópio é efetuada ao término do processo de alinhamento do wafer (resposta interna de controle) iniciado a partir da ocorrência do evento externo 2.

A geração de uma camada do chip inicia pela verificação do estado do Microscópio Eletrônico. Estando o Microscópio Eletrônico configurado de acordo com as especificações do processo e em funcionamento estável, o SISTEMA inicia o traçado de uma **camada genérica** (ver item a) correspondente à máscara selecionada como camada do chip.

d.1) Sob o ponto de vista de Filamento, Fonte de Alta Tensão, Lente Objetiva e Lente Condensadora:

d.1.1) Funcionalidade: Iniciar geração de camada do chip em wafer alinhado.

- Com o wafer alinhado e antes de iniciar geração de camada, o SISTEMA verifica os valores de "corrente_emissão_filamento", "tensão_fonte", "corrente_objetiva" e "corrente_condensadora". Estando todos os valores dentro das faixas desejadas, o SISTEMA registra o início do processamento no histórico desse wafer e controla o deslocamento da mesa para a primeira posição de início de traçado, iniciando a geração de camada. Para tal, emite os fluxos contínuos

"controle_x_motor" e "controle_y_motor". Esse deslocamento é feito de forma a atingir velocidade máxima de movimentação da mesa nas direções x e y, visando agilizar o processo de geração de camada (ver anexo A). O SISTEMA informa ao OPERADOR o "status" da operação (tempo transcorrido desde o início e tempo estimado para o término);

- Decorrido um intervalo de tempo predeterminado ("é_tempo_de diagnosticar estado_do_microscópio") a partir do início de alinhamento do wafer, caso um dos valores de "corrente_emissão_filamento", "tensão_fonte", "corrente_objetiva" ou "corrente_condensadora" esteja fora da faixa desejada, o SISTEMA rejeita a geração de camada, informando ao OPERADOR o motivo ("rejeição_geração_máscara").

(evento externo 29)

d.2) Sob o ponto de vista do OPERADOR:

d.2.1) Funcionalidade: Interromper geração de camada do chip.

- OPERADOR interrompe a geração de camada em andamento, sinalizando ao SISTEMA "interrupção_máscara". O SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto) e interrompe todas as atividades de controle/monitoramento. Cessa a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador" e registra internamente a interrupção de geração de camada para esse wafer. Caso o SISTEMA não esteja gerando camada, o comando é ignorado.

(evento externo 6)

d.2.2) Funcionalidade: Avaliar qualidade da gravação de wafer.

- Durante a geração de uma camada, com periodicidade predeterminada ("é_tempo_de registrar variáveis_processo"), OPERADOR necessita que sejam armazenados no SISTEMA valores correspondentes às variáveis do processo: "x_mesa", "y_mesa", " θ _mesa", "corrente_absorção", "tensão_fonte", "corrente_emissão_filamento", "corrente_objetiva" e "corrente_condensadora". Esses dados fazem parte do histórico de gravação do wafer.

(evento externo 8)

- OPERADOR requisita relatório de histórico de processamento de um wafer enviando ao SISTEMA "pedido_relatório_wafer" para uma determinada identificação_wafer. O SISTEMA emite "relatório_wafer" contendo informações dos diversos sensores do processo, colhidas de forma periódica, durante a execução dos procedimentos de gravação do wafer selecionado.
 - Ocorrerá rejeição ("rejeição_relatório_wafer") no caso de ser selecionada uma identificação_wafer sem referência interna no SISTEMA.

(evento externo 7)

e) Assunto: Movimentação da Mesa nas Direções x, y e θ .

e.1) Sob o ponto de vista do MOTOR_X:

e.1.1) Funcionalidade: Posicionar Mesa na direção x.

- Durante a geração de uma camada, o SISTEMA necessita controlar o posicionamento da mesa na direção x. O controle de posicionamento, modelado pelo fluxo contínuo "controle_x_motor",

é enviado ao MOTOR_X. Após a movimentação da mesa, sua posição real (identificada a partir de um valor específico de "x_mesa"), é lida através do INTERFERÔMETRO_ÓTICO_X.

- Atingindo o valor de "x_mesa" a faixa desejada, o SISTEMA cessa o envio de controle para movimentação ("controle_x_motor") da mesa.

(evento externo 9)

- Saindo a variável "x_mesa" da faixa desejada ultrapassando o valor máximo, o SISTEMA envia novo controle ("controle_x_motor") para correção da movimentação da mesa na direção x.

(evento externo 12)

- Saindo a variável "x_mesa" da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo, o SISTEMA envia novo controle ("controle_x_motor") para correção da movimentação da mesa na direção x.

(evento externo 15)

- Decorrido um intervalo de tempo predeterminado ("é_tempo_de interromper processo") após o SISTEMA iniciar a tentativa de controle do posicionamento, se a mesa não atingir posição dentro da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (alinhamento de wafer ou geração de camada genérica) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 18)

e.2) Sob o ponto de vista do MOTOR_Y:

e.2.1) Funcionalidade: Posicionar Mesa na direção y.

- Durante a geração de uma camada, o SISTEMA necessita controlar o posicionamento da mesa na direção y. O controle de posicionamento, modelado pelo fluxo contínuo "controle_y_motor", é enviado ao MOTOR_Y. Após a movimentação da mesa sua posição real (identificada por um valor específico de "y_mesa") é lida através do INTERFERÔMETRO_ÓTICO_Y.
 - Atingindo o valor de "y_mesa" a faixa desejada, o SISTEMA cessa o envio de controle para movimentação ("controle_y_motor") da mesa.

(evento externo 10)

- Saindo a variável "y_mesa" da faixa desejada ultrapassando o valor máximo, o SISTEMA envia novo controle ("controle_y_motor") para correção da movimentação da mesa na direção y.

(evento externo 13)

- Saindo a variável "y_mesa" da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo, o SISTEMA envia novo controle ("controle_y_motor") para correção da movimentação da mesa na direção y.

(evento externo 16)

- Decorrido um intervalo de tempo predeterminado ("é_tempo_de interromper processo") após o SISTEMA iniciar a tentativa de controle do posicionamento, se a mesa não atingir posição dentro da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (alinhamento do wafer ou geração de camada genérica) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo19)

e.3) Sob o ponto de vista do MOTOR_θ:

e.3.1) Funcionalidade: Posicionar Mesa na direção θ.

- Durante o alinhamento do wafer, o SISTEMA necessita controlar a rotação da mesa. O controle de posicionamento, modelado pelo fluxo "controle_θ_motor", é enviado ao MOTOR_θ. Após a movimentação da mesa, sua posição real (identificada a partir de um valor específico de "θ_mesa") é lida através do DETECTOR_θ.
 - Atingindo o valor de "θ_mesa" a faixa desejada, o SISTEMA cessa o envio de controle para movimentação ("controle_θ_motor") da mesa.

(evento externo 11)

- Saindo a variável "θ_mesa" da faixa desejada ultrapassando o valor máximo, o SISTEMA envia novo controle ("controle_θ_motor") para correção da movimentação da mesa na direção θ.

(evento externo 14)

- Saindo a variável "θ_mesa" da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo, o SISTEMA envia novo controle ("controle_θ_motor") para correção da movimentação da mesa na direção θ.

(evento externo 17)

- Decorrido um intervalo de tempo predeterminado ("é_tempo_de interromper processo") após o SISTEMA iniciar a tentativa de posicionamento, se a mesa θ não atingir posição dentro da faixa desejada, o SISTEMA interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão do fluxo contínuo "controle_θ_motor"), registra a ocorrência de falha durante o alinhamento do wafer e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 20)

f) Assunto: Monitoramento do Microscópio Eletrônico.

f.1) Sob o ponto de vista do OBTURADOR DO FEIXE:

f.1.1) Funcionalidade: Interromper ou restabelecer fluxo de elétrons.

- Durante a geração de camada genérica, o SISTEMA necessita controlar a abertura/fechamento do obturador do feixe. O controle é modelado pelo fluxo "controle_obturador", enviado ao OBTURADOR_FEIXE. O estado (aberto ou fechado) do obturador é monitorado pelo

SISTEMA através do valor de "corrente_ absorção" medido pelo DETECTOR_CORRENTE_ABSORÇÃO.

- Decorrido um intervalo de tempo predeterminado ("é tempo de interromper processo") após o SISTEMA iniciar o envio de "controle_obturador" com o valor de aberto, caso o valor da "corrente_ absorção" seja igual a zero, o SISTEMA conclui que houve falha no OBTURADOR_FEIXE. O SISTEMA interrompe todo controle/monitoramento (cessa a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 30)

- Decorrido um intervalo de tempo predeterminado (é tempo de interromper processo") após o SISTEMA iniciar o envio de "controle_obturador" com o valor de fechado, caso o valor da "corrente_ absorção" permaneça com valor correspondente à absorção de elétrons pelo resiste (valor superior a 90% do valor de "corrente_ emissão_ filamento"), o SISTEMA conclui que houve falha no OBTURADOR_FEIXE. O SISTEMA interrompe todo controle/monitoramento (cessa a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor" e "controle_y_motor"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 31)

f.2) Sob o ponto de vista da FONTE DE ALTA TENSÃO:

f.2.1) Funcionalidade: Fornecer energia aos elétrons do feixe.

- Durante a geração de camada, o SISTEMA monitora o valor da "tensão_ fonte". Caso ultrapasse o valor máximo da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 21)

- Durante a geração de camada, o SISTEMA monitora o valor da "tensão_ fonte". Caso ultrapasse o valor mínimo da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra internamente ao SISTEMA a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 22)

f.3) Sob o ponto de vista do FILAMENTO:

f.3.1) Funcionalidade: Determinar a densidade de corrente do feixe de elétrons.

- Durante a geração de camada, o SISTEMA monitora o valor da "corrente_ emissão_ filamento". Caso ultrapasse o valor máximo da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos

fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra internamente ao SISTEMA a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 23)

- Durante a geração de camada, o SISTEMA monitora o valor da "corrente_emissão_filamento". Caso ultrapasse o valor mínimo da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 24)

f.4) Sob o ponto de vista da LENTE OBJETIVA:

f.4.1) Funcionalidade: Focalizar o feixe de elétrons.

- Durante a geração de camada o SISTEMA monitora o valor da "corrente_objetiva". Caso ultrapasse o valor máximo da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 25)

- Durante a geração de camada o SISTEMA monitora o valor da "corrente_objetiva". Caso ultrapasse o valor mínimo da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 26)

f.5) Sob o ponto de vista da LENTE CONDENSADORA:

f.5.1) Funcionalidade: Uniformizar e dar forma ao feixe de elétrons.

- Durante a geração de camada o SISTEMA monitora o valor da "corrente_condensadora". Caso ultrapasse o valor máximo da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 27)

- Durante a geração de camada, o SISTEMA monitora o valor da "corrente_condensadora". Caso ultrapasse o valor mínimo da faixa desejada, o SISTEMA fecha o OBTURADOR_FEIXE (caso se encontre aberto), interrompe todo controle/monitoramento (inabilita a emissão dos fluxos

contínuos "controle_x_motor", "controle_y_motor" e "controle_obturador"), registra a ocorrência de falha durante a gravação do wafer (iniciação wafer ou geração de camada do chip) e informa ao OPERADOR o motivo ("interrupção_processo").

(evento externo 28)

2.1.2. Lista de Eventos Externos

A. Sob o Ponto de Vista do OPERADOR:

1. Operador necessita iniciar um wafer com parâmetros de operação específicos. (sinalizado por "pedido_iniciação");
2. Operador necessita iniciar alinhamento de wafer específico. (sinalizado por "pedido_início_alinhamento");
3. Operador necessita confirmar posição de marca de alinhamento. (sinalizado por "confirmação_marca");
4. Operador necessita ajustar posição de marca de alinhamento na direção x. (sinalizado por "ajuste_marca_x");
5. Operador necessita ajustar posição de marca de alinhamento na direção y. (sinalizado por "ajuste_marca_y");
6. Operador necessita interromper o processo de geração de camada. (sinalizado por "interrupção_máscara");
7. Operador necessita relatório sobre wafer gravado. (sinalizado por "pedido_relatório_wafer");
8. Com periodicidade predeterminada, OPERADOR necessita que informações sobre o andamento do processo sejam armazenadas. (sinalizado por "é_tempo_de_registrar_variáveis_processo").

B. Sob o Ponto de Vista dos MOTORES

B.1 Valores de variáveis atingindo valor dentro da faixa desejada:

9. Variável x, associada à posição da mesa, atinge valor dentro da faixa desejada. (sinalizado por valor específico de "x_mesa");
10. Variável y, associada à posição da mesa, atinge valor dentro da faixa desejada. (sinalizado por valor específico de "y_mesa");
11. Variável θ , associada à posição da mesa, atinge valor dentro da faixa desejada. (sinalizado por valor específico de " θ _mesa").

B.2 Valores de variáveis saindo da faixa desejada.

B.2.1 Ultrapassando o valor máximo:

12. Variável x, associada à posição da mesa, sai da faixa desejada ultrapassando o valor máximo. (sinalizado por valor específico de "x_mesa");
13. Variável y, associada à posição da mesa, sai da faixa desejada ultrapassando o valor máximo.

(sinalizado por valor específico de "y_mesa");

14. Variável θ , associada à posição da mesa, sai da faixa desejada ultrapassando o valor máximo. (sinalizado por valor específico de " θ _mesa").

B.2.2 Ultrapassando o valor mínimo:

15. Variável x, associada à posição da mesa, sai da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo. (sinalizado por valor específico de "x_mesa");
16. Variável y, associada à posição da mesa, sai da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo. (sinalizado por valor específico de "y_mesa");
17. Variável θ , associada à posição da mesa, sai da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo. (sinalizado por valor específico de " θ _mesa").

B.3. Valor de variável sinalizando falha irreversível:

18. Decorrido período predeterminado após início da tentativa de posicionamento, variável x, associada à posição da mesa, não atinge a faixa desejada. (sinalizado por "é_tempo_de interromper processo");
19. Decorrido período predeterminado após início da tentativa de posicionamento, variável y, associada à posição da mesa, não atinge a faixa desejada. (sinalizado por "é_tempo_de interromper processo");
20. Decorrido período predeterminado após início da tentativa de posicionamento, variável θ , associada à posição da mesa, não atinge a faixa desejada. (sinalizado por "é_tempo_de interromper processo").

C. Sob o Ponto de Vista da FONTE DE ALTA TENSÃO

C.1 valor de variável saindo da faixa desejada:

21. Variável tensão, associada à tensão na Fonte de Alta Tensão, sai da faixa desejada ultrapassando o valor máximo. (sinalizado por valor específico de "tensão_fonte");
22. Variável tensão, associada à tensão na Fonte de Alta Tensão, sai da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo. (sinalizado por valor específico de "tensão_fonte").

D. Sob o Ponto de Vista do FILAMENTO

D.1 Valor de variável saindo da faixa desejada:

23. Variável corrente_emissão_filamento, associada à quantidade de elétrons gerada pelo Filamento, sai da faixa desejada ultrapassando o valor máximo. (sinalizado por valor específico de "corrente_emissão_filamento");
24. Variável corrente_emissão_filamento, associada à quantidade de elétrons gerada pelo Filamento, sai da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo. (sinalizado por valor específico de "corrente_emissão_filamento").

E. Sob o Ponto de Vista da LENTE OBJETIVA

E.1 Valor de variável saindo da faixa desejada:

25. Variável corrente_objetiva, associada à quantidade de elétrons que passa pela Lente Objetiva, sai da faixa desejada ultrapassando o valor máximo.
(sinalizado por valor específico de "corrente_objetiva");
26. Variável corrente_objetiva, associada à quantidade de elétrons que passa pela Lente Objetiva, sai da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo.
(sinalizado por valor específico de "corrente_objetiva").

F. Sob o Ponto de Vista da LENTE CONDENSADORA

F.1 Valor de variável saindo da faixa desejada:

27. Variável corrente_condensadora, associada à quantidade de elétrons que passa pela Lente Condensadora, sai da faixa desejada ultrapassando o valor máximo.
(sinalizado por valor específico de "corrente_condensadora");
28. Variável corrente_condensadora, associada à quantidade de elétrons que passa pela Lente Condensadora, sai da faixa desejada ultrapassando o valor mínimo.
(sinalizado por valor específico de "corrente_condensadora").

G. Sob o Ponto de Vista do MICROSCÓPIO ELETRÔNICO

G.1 Valor de variável sinalizando falha:

29. Decorrido tempo necessário à estabilização do microscópio eletrônico, variáveis associadas ao Feixe de Elétrons não atingem valor dentro da faixa desejada.
(sinalizado por "é_tempo_de diagnosticar estado_do_microscópio").

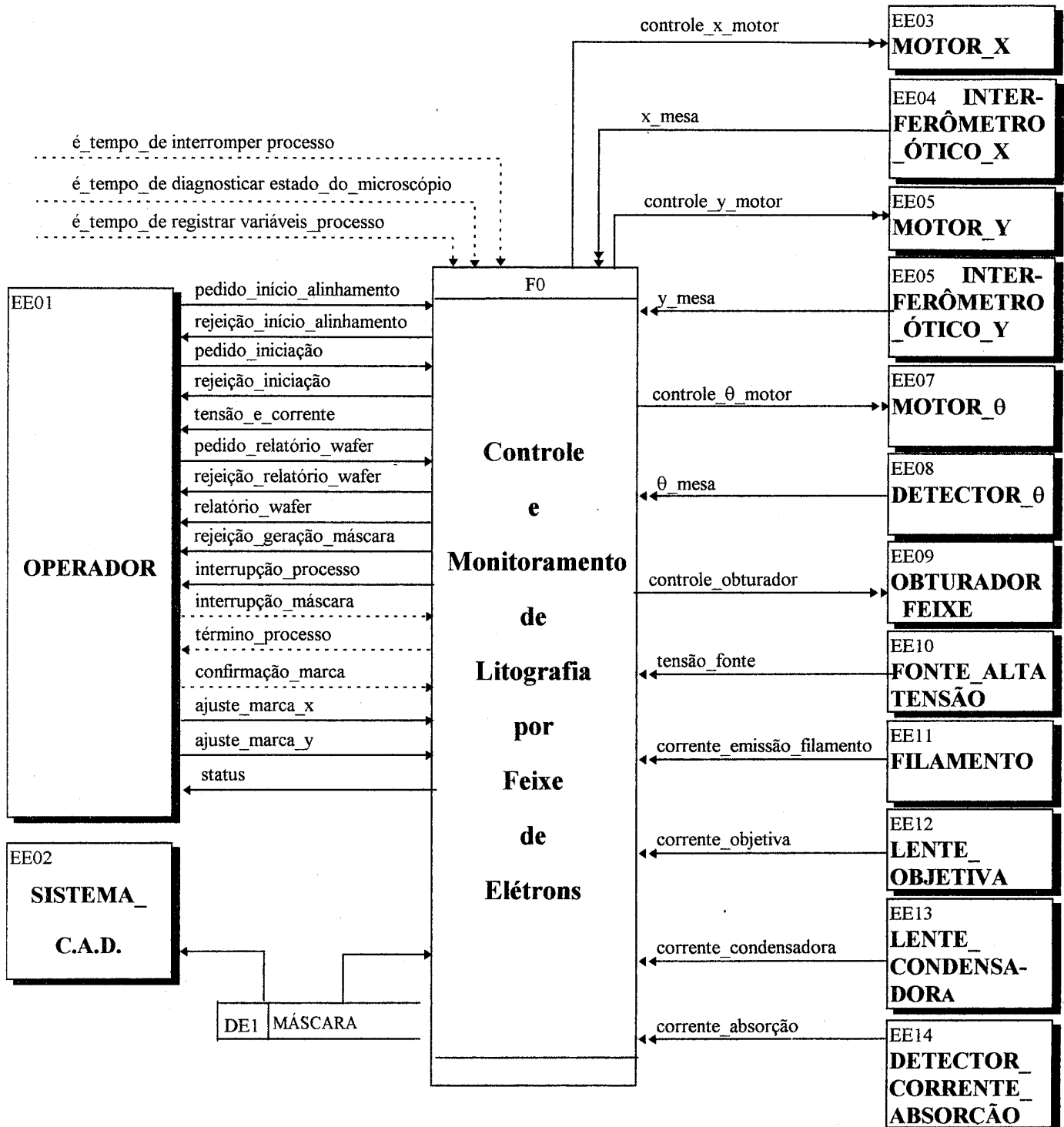
H. Sob o Ponto de Vista do OBTURADOR DO FEIXE

H.1 Valor de variável sinalizando falha irreversível:

30. Decorrido período predeterminado após início da tentativa de abrir obturador, valor de "corrente_absorção" não indica obturador aberto.
(sinalizado por "é_tempo_de interromper processo");
31. Decorrido período predeterminado após início da tentativa de fechar obturador, valor de "corrente_absorção" não indica obturador fechado.
(sinalizado por "é_tempo_de interromper processo").

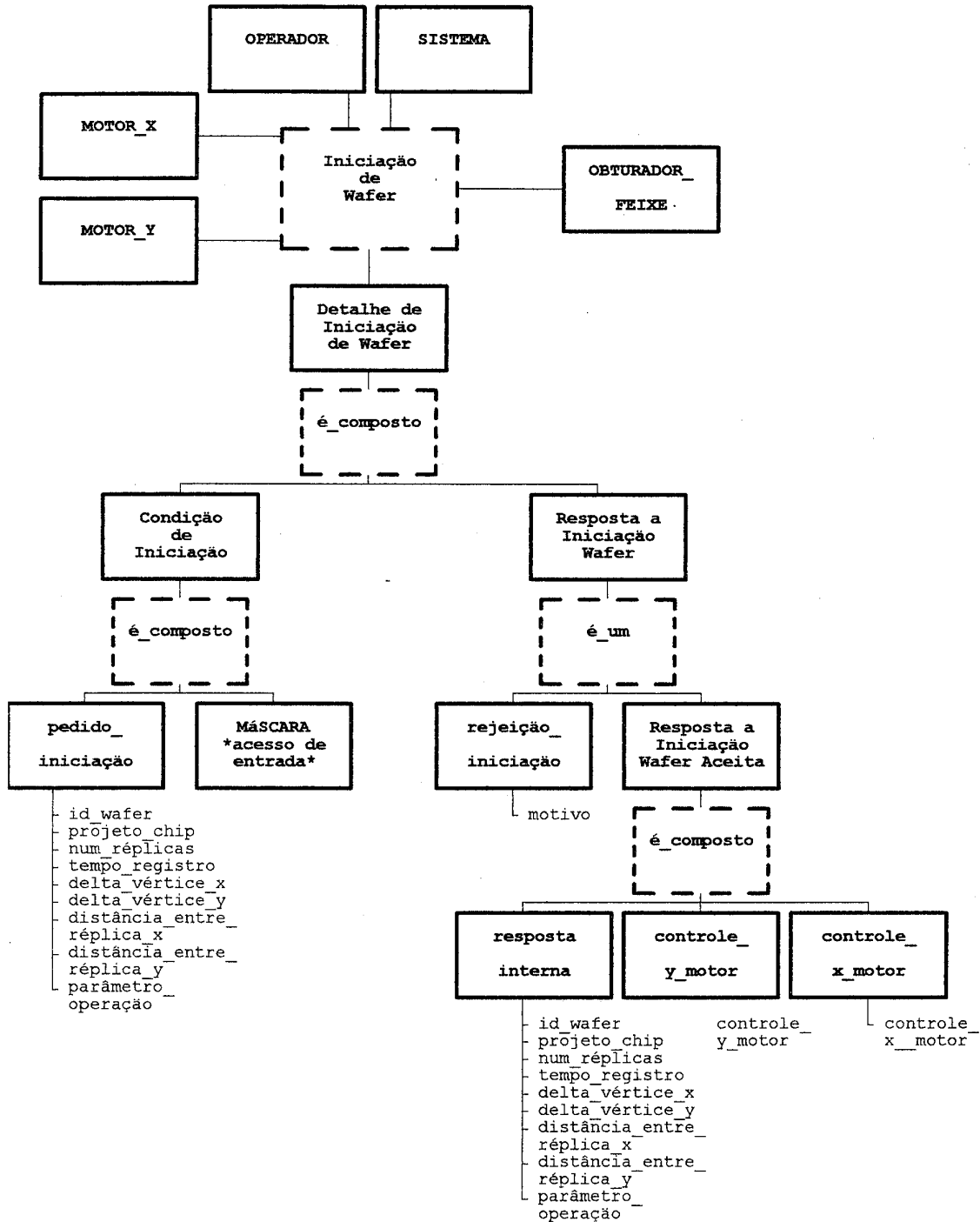
2.2. Seção Esquemática

2.2.1. Esquema Transacional

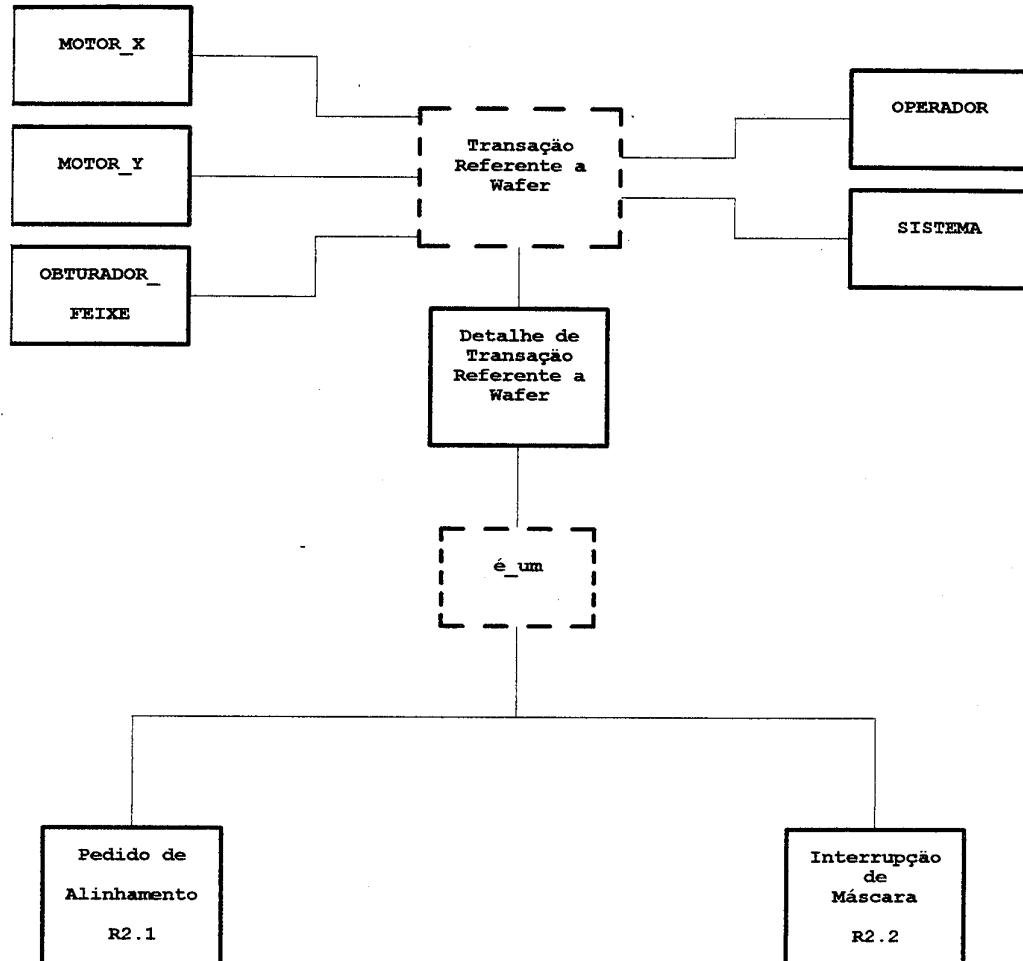


Detalhamento de R1

* evento externo 1 *

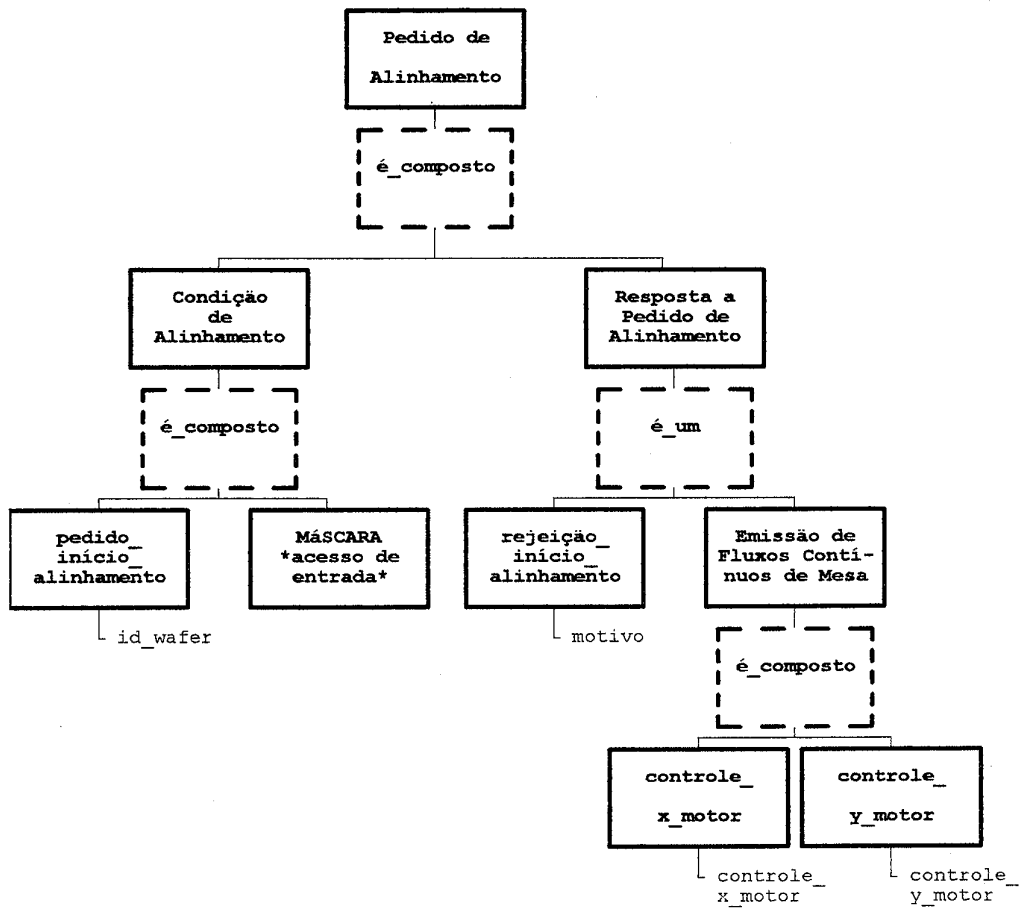


Detalhamento de R2



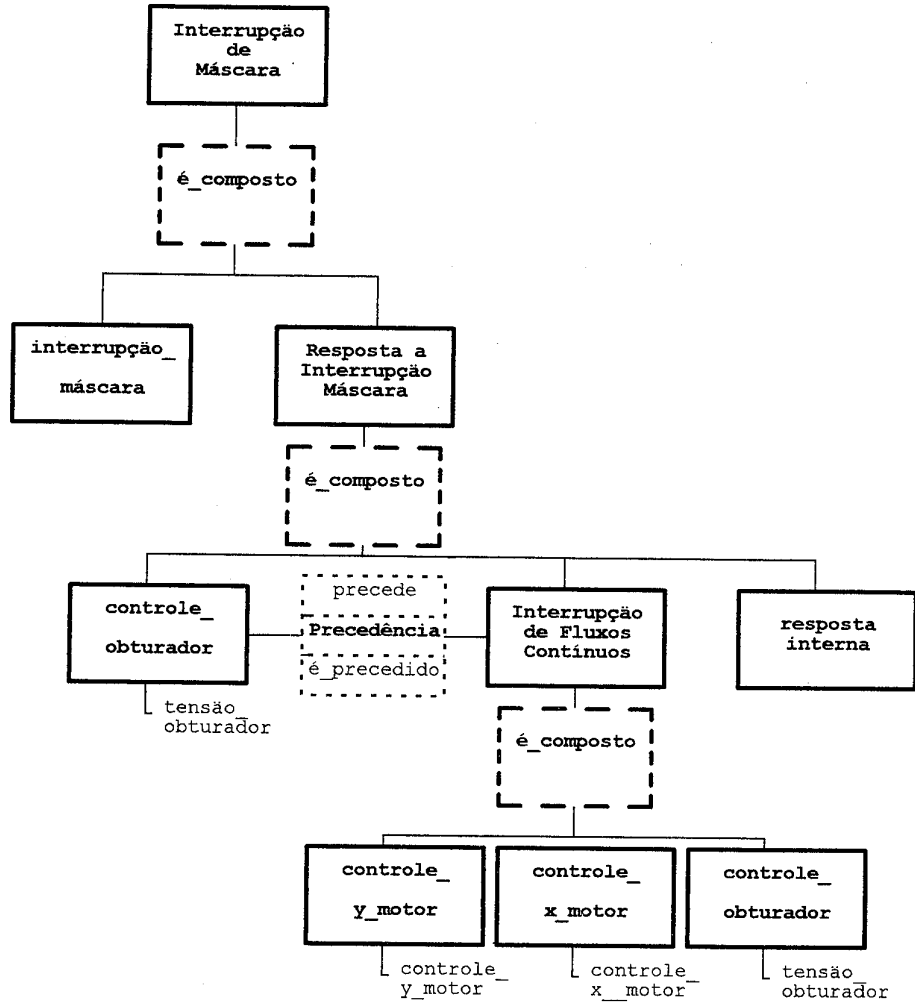
Detalhamento de R2.1

* evento externo 2 *

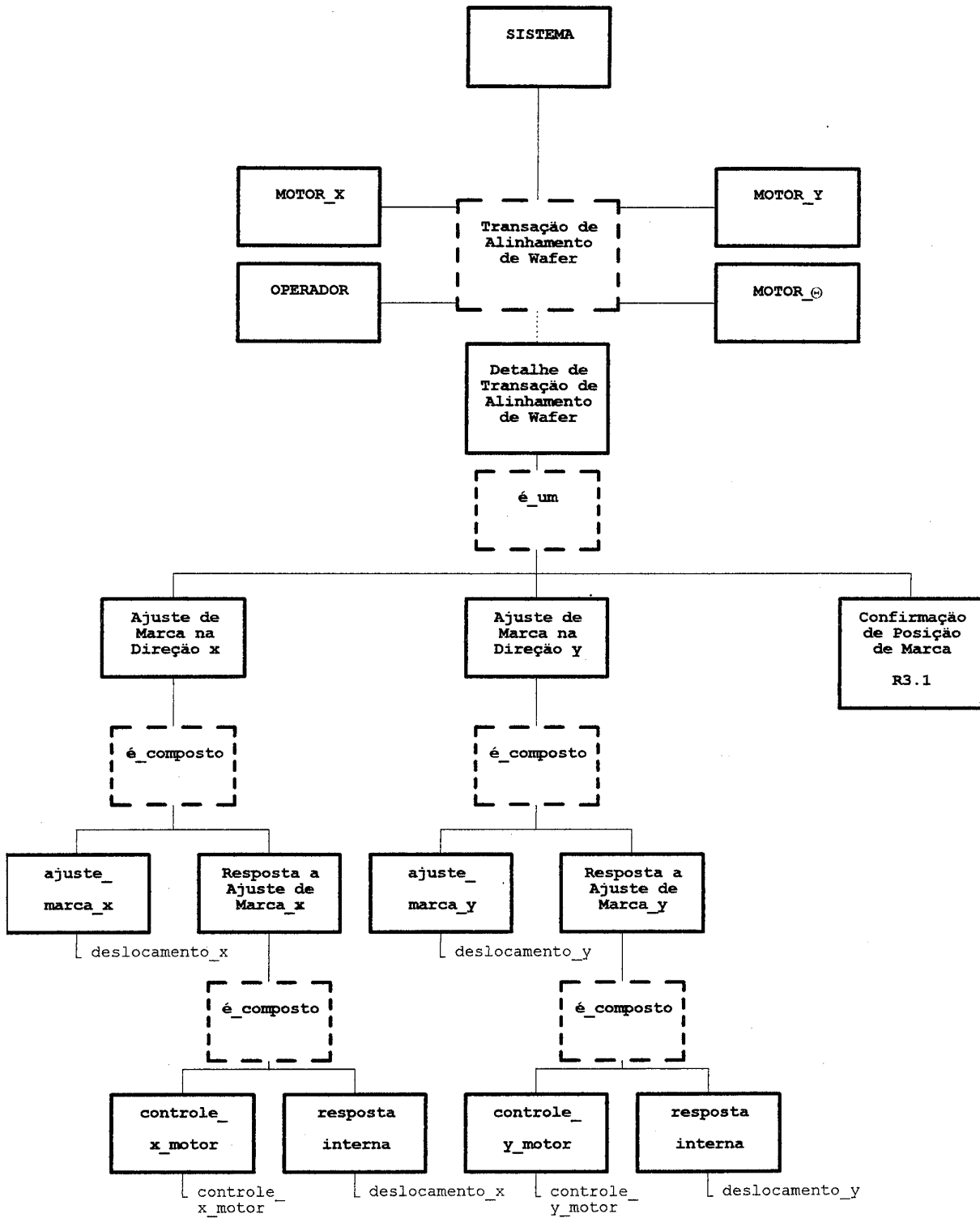


Detalhamento de R2.2

* evento externo 6 *



Detalhamento de R3

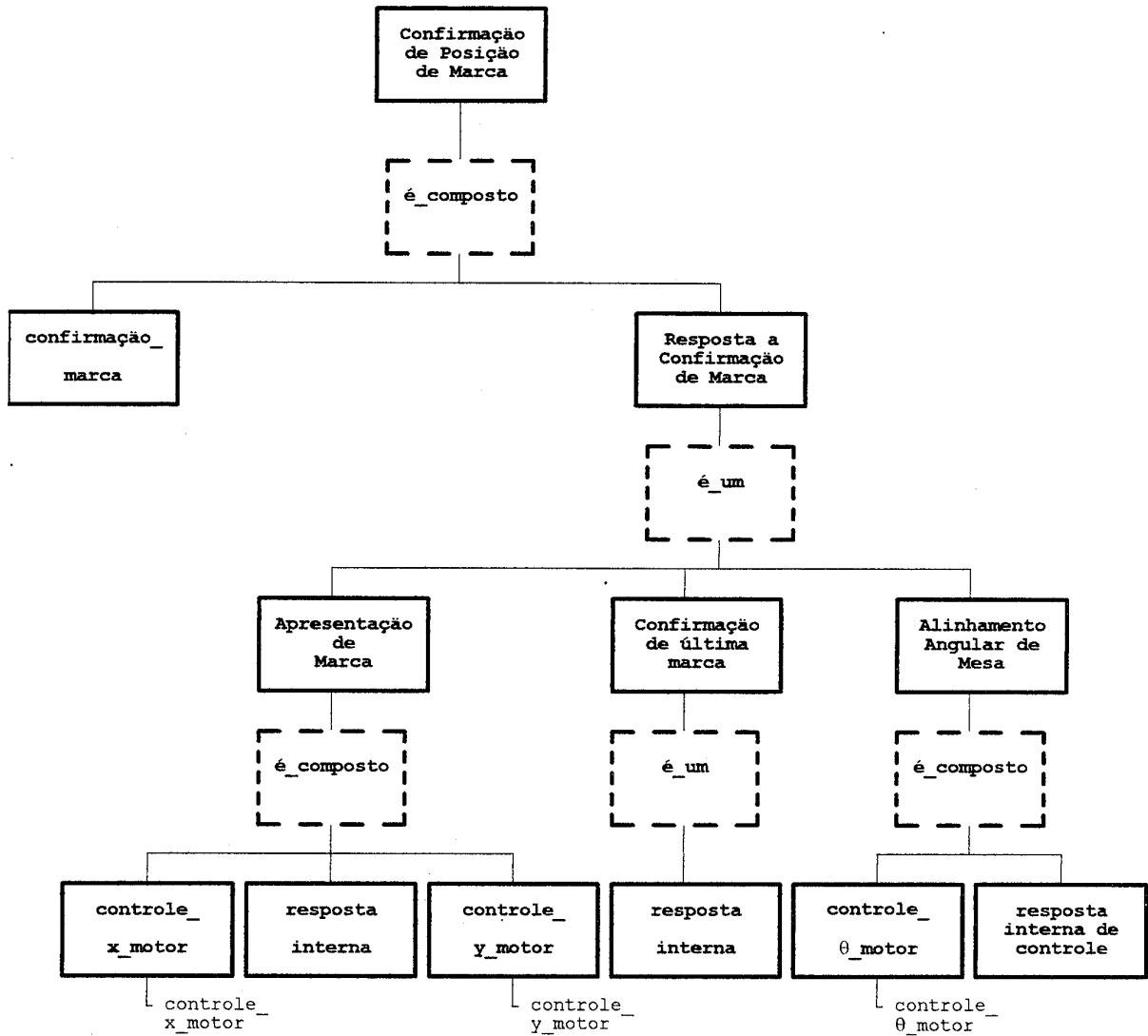


* evento externo 4 *

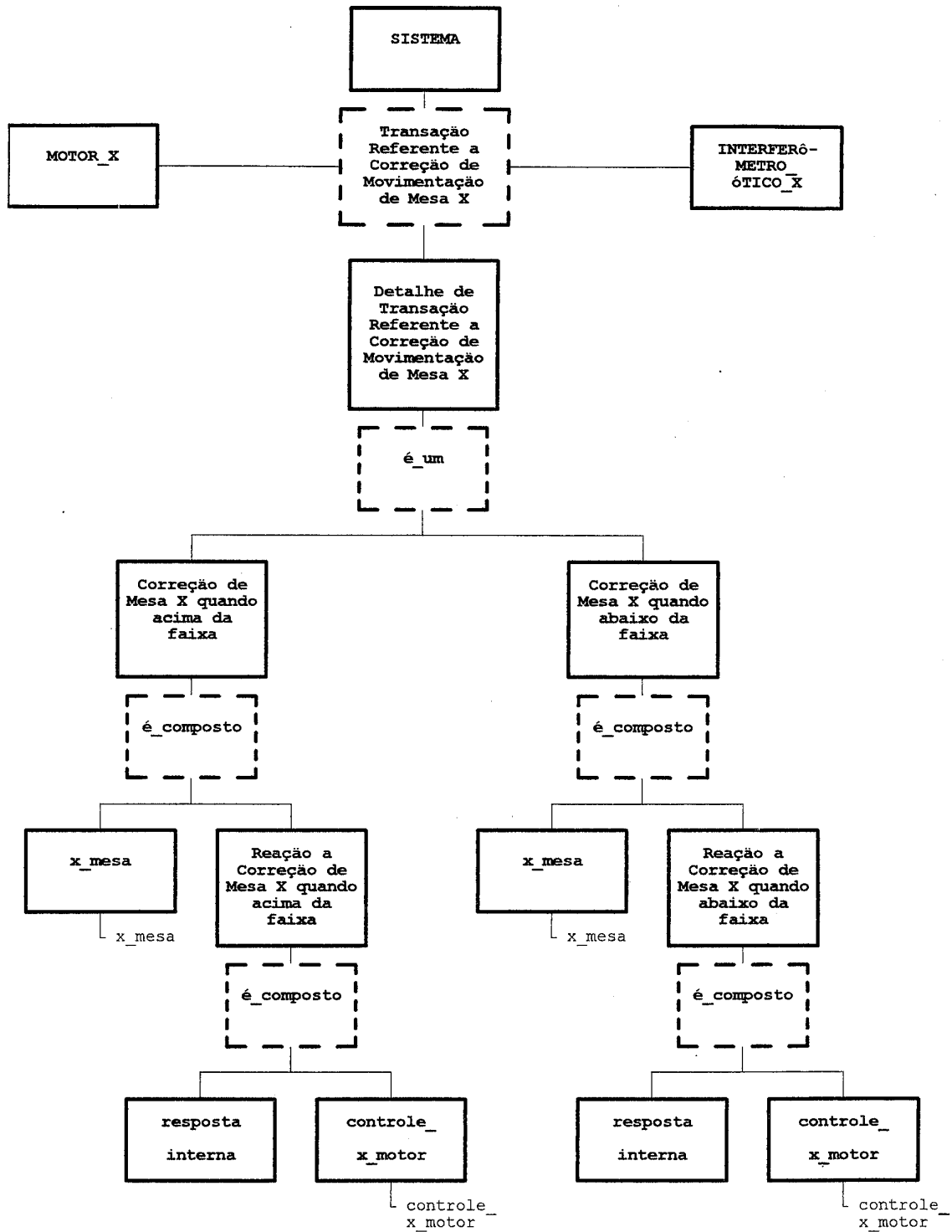
* evento externo 5 *

Detalhamento de R3.1

* evento externo 3 *



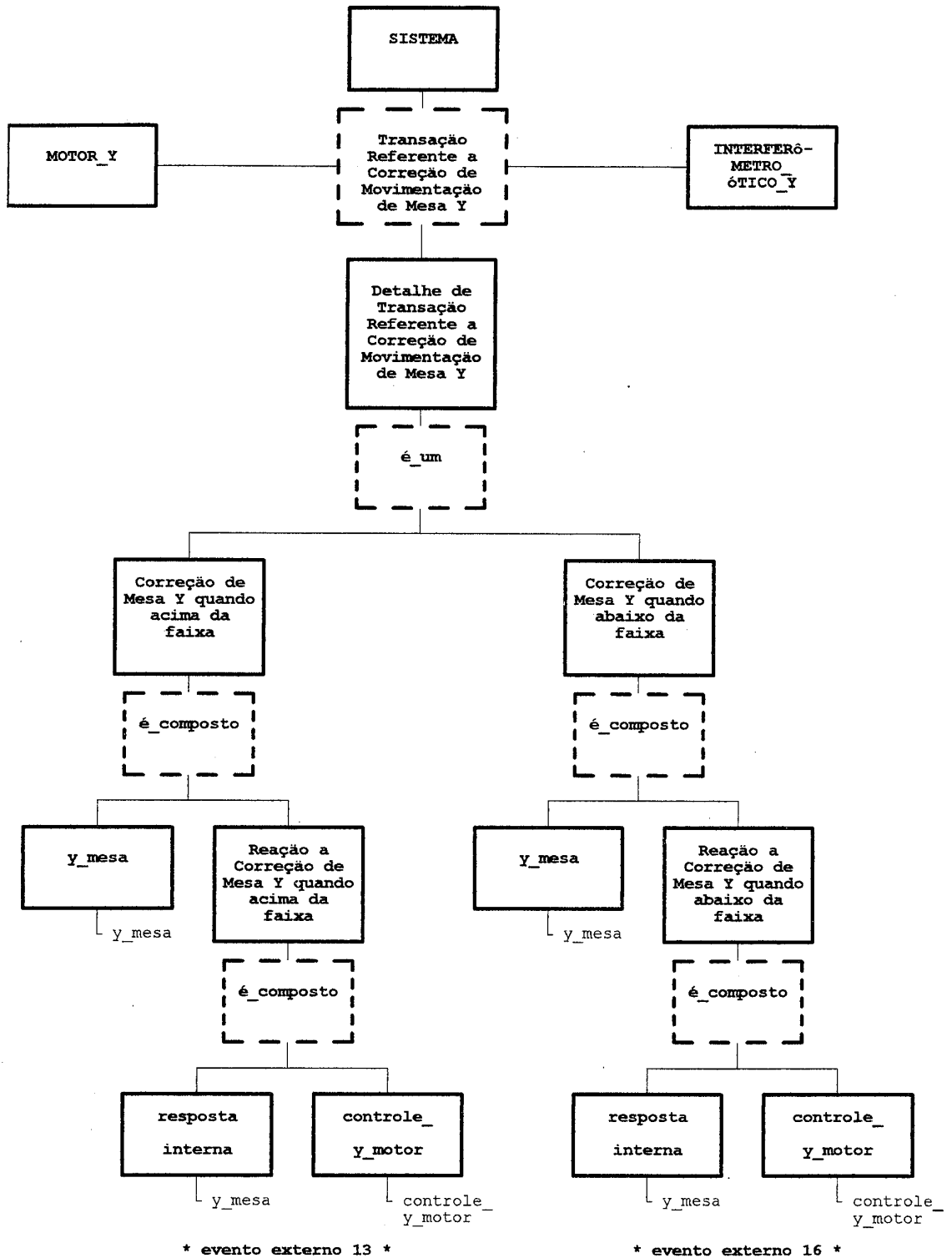
Detalhamento de R4



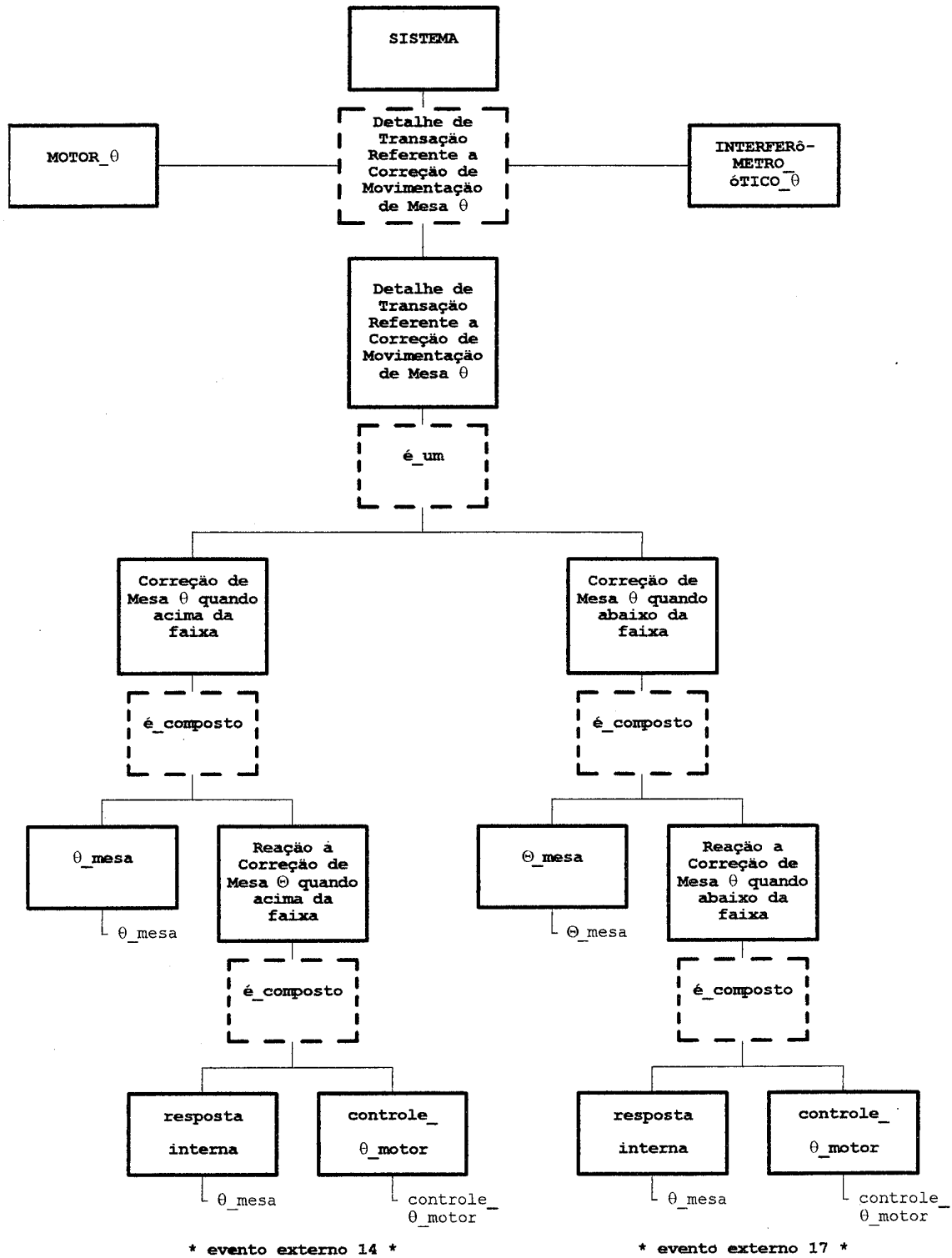
* evento externo 12 *

* evento externo 15 *

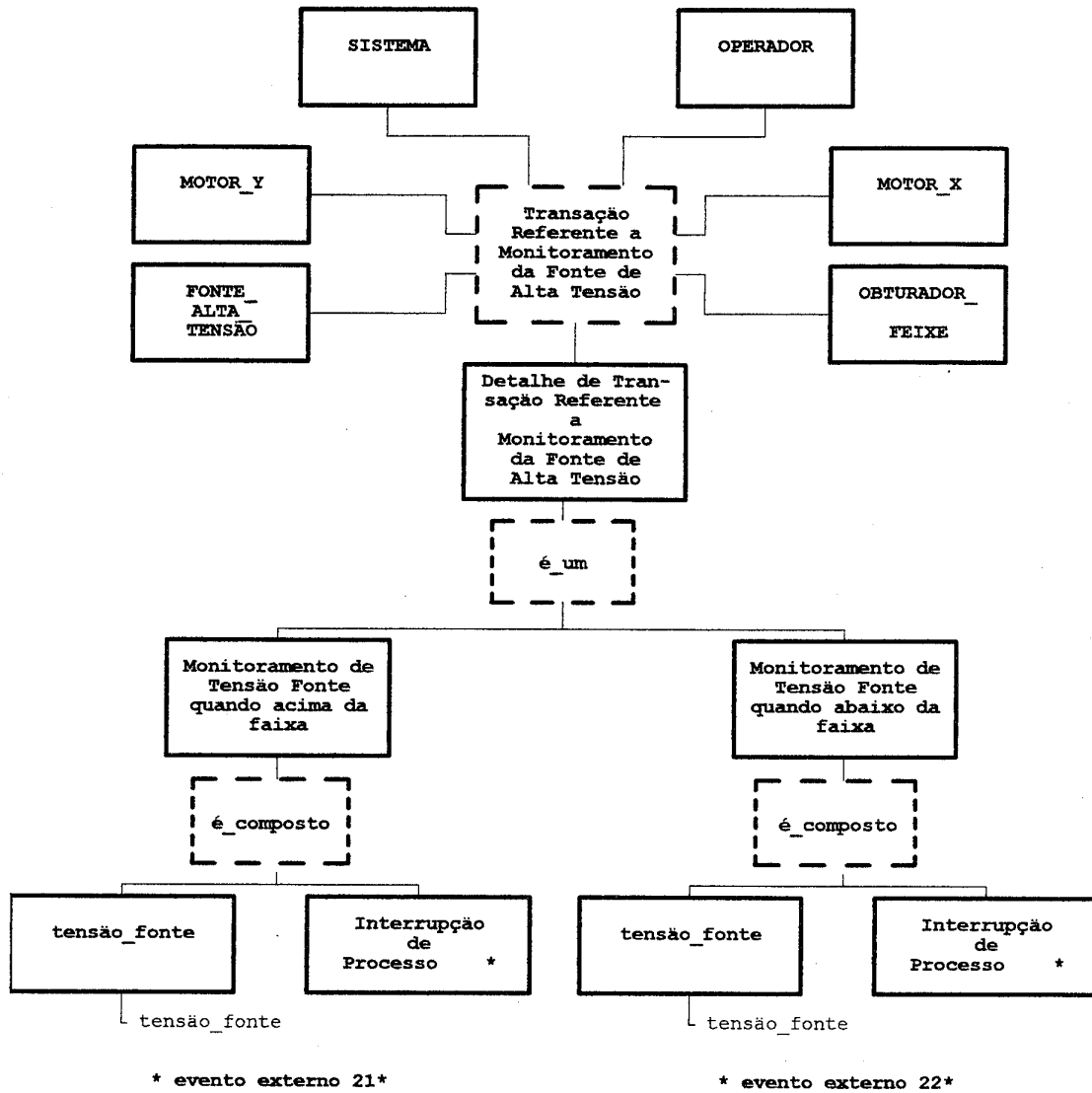
Detalhamento de R5



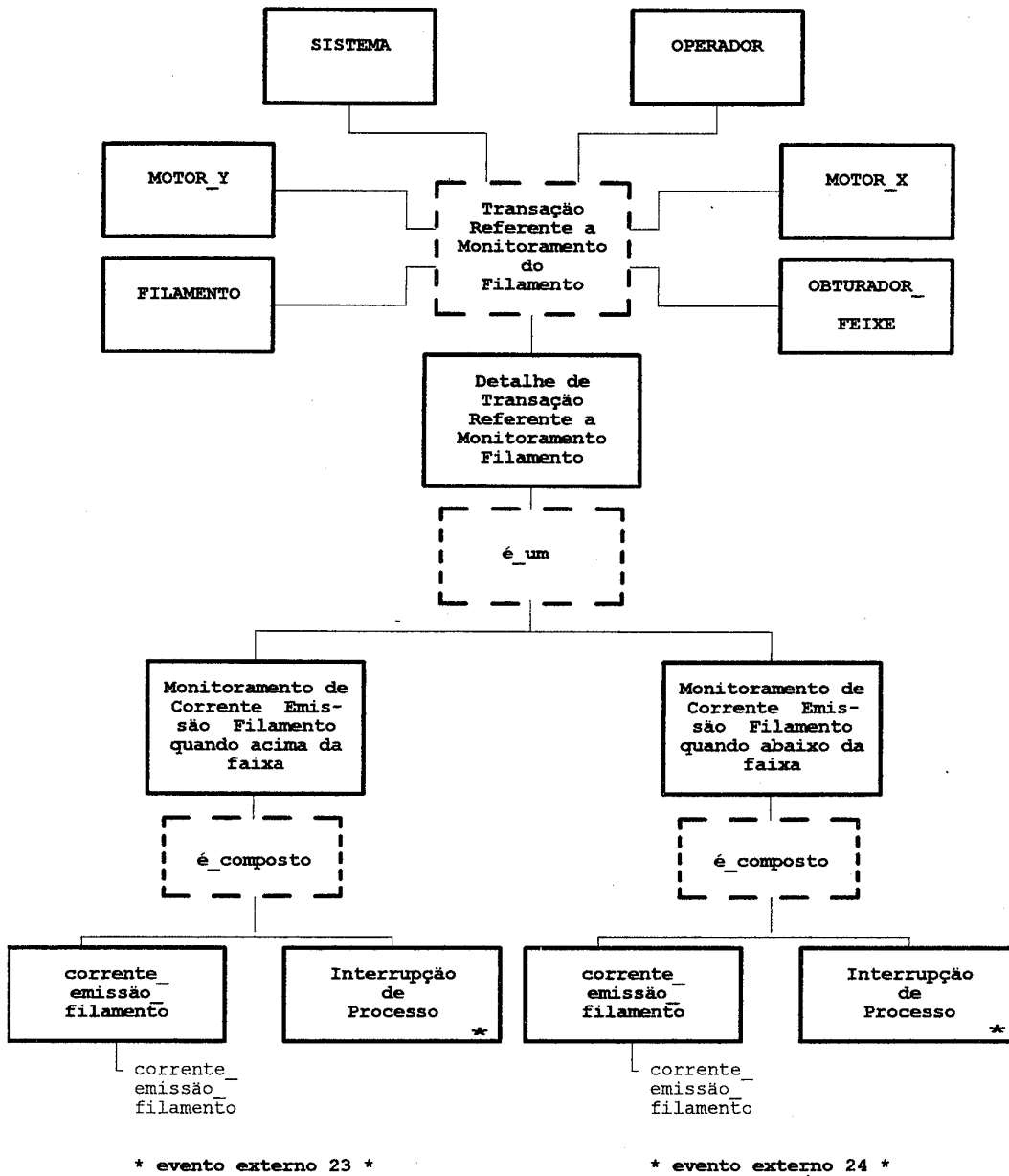
Detalhamento de R6



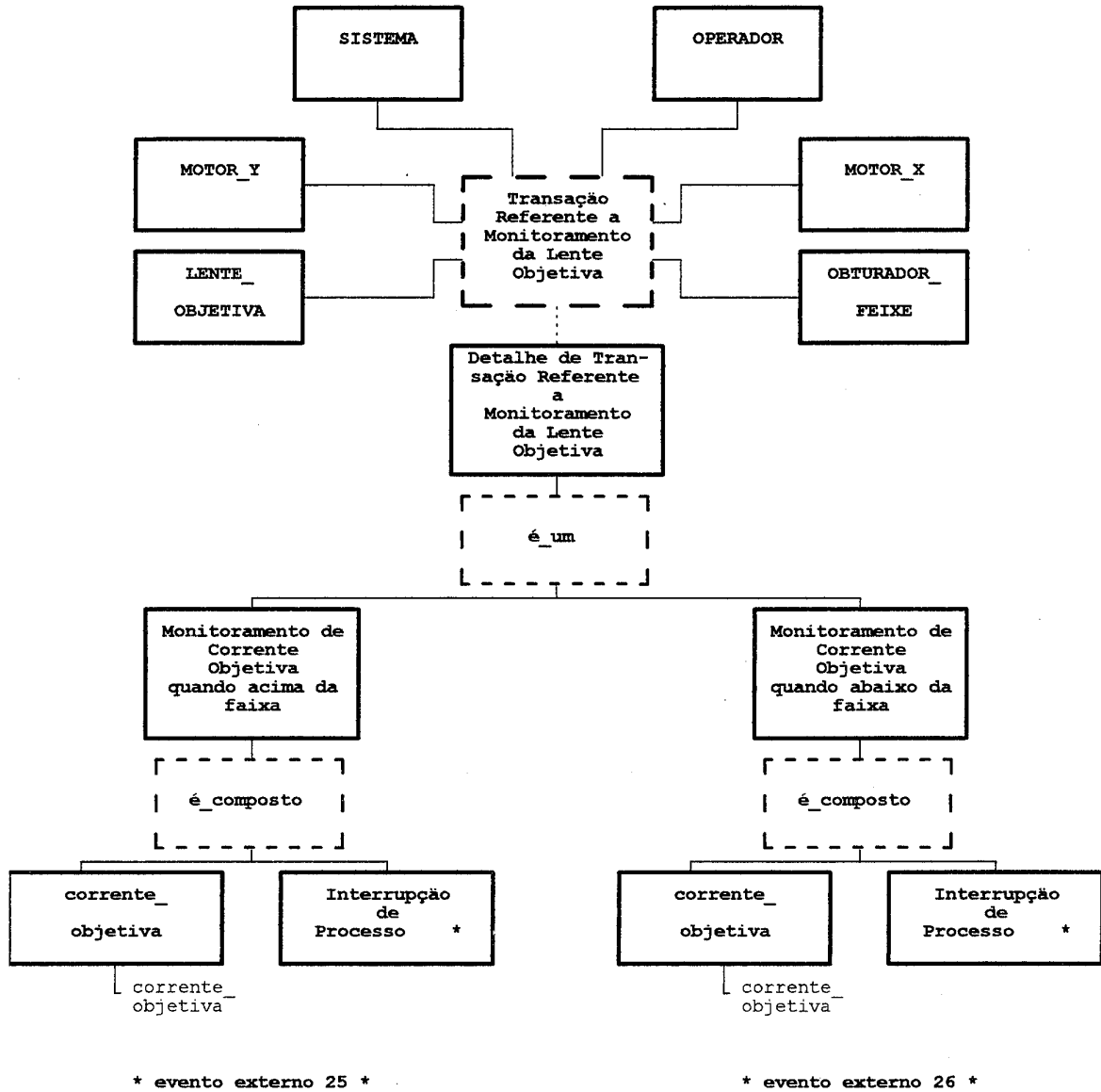
Detalhamento de R7



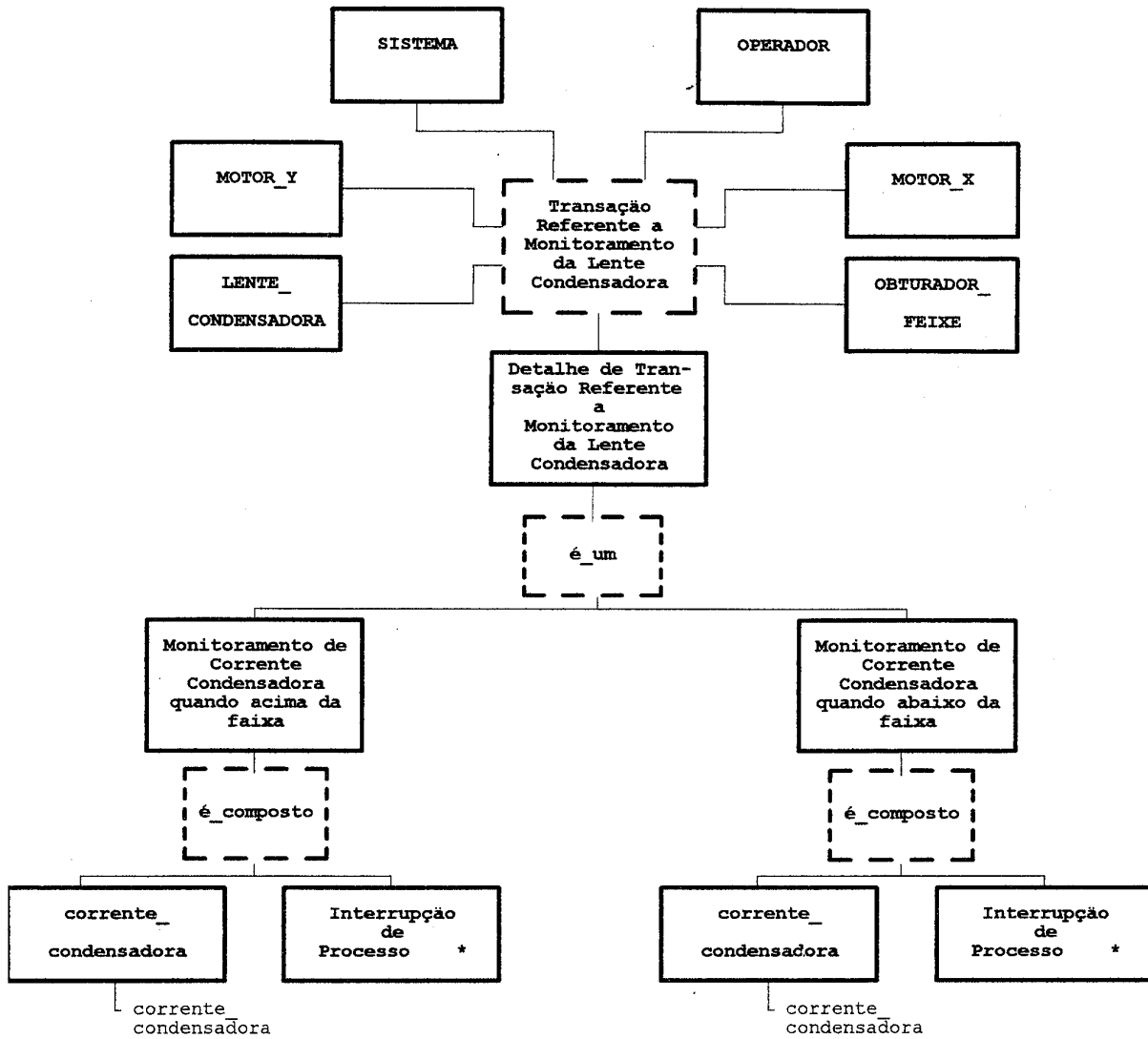
Detalhamento de R8



Detalhamento de R9



Detalhamento de R10

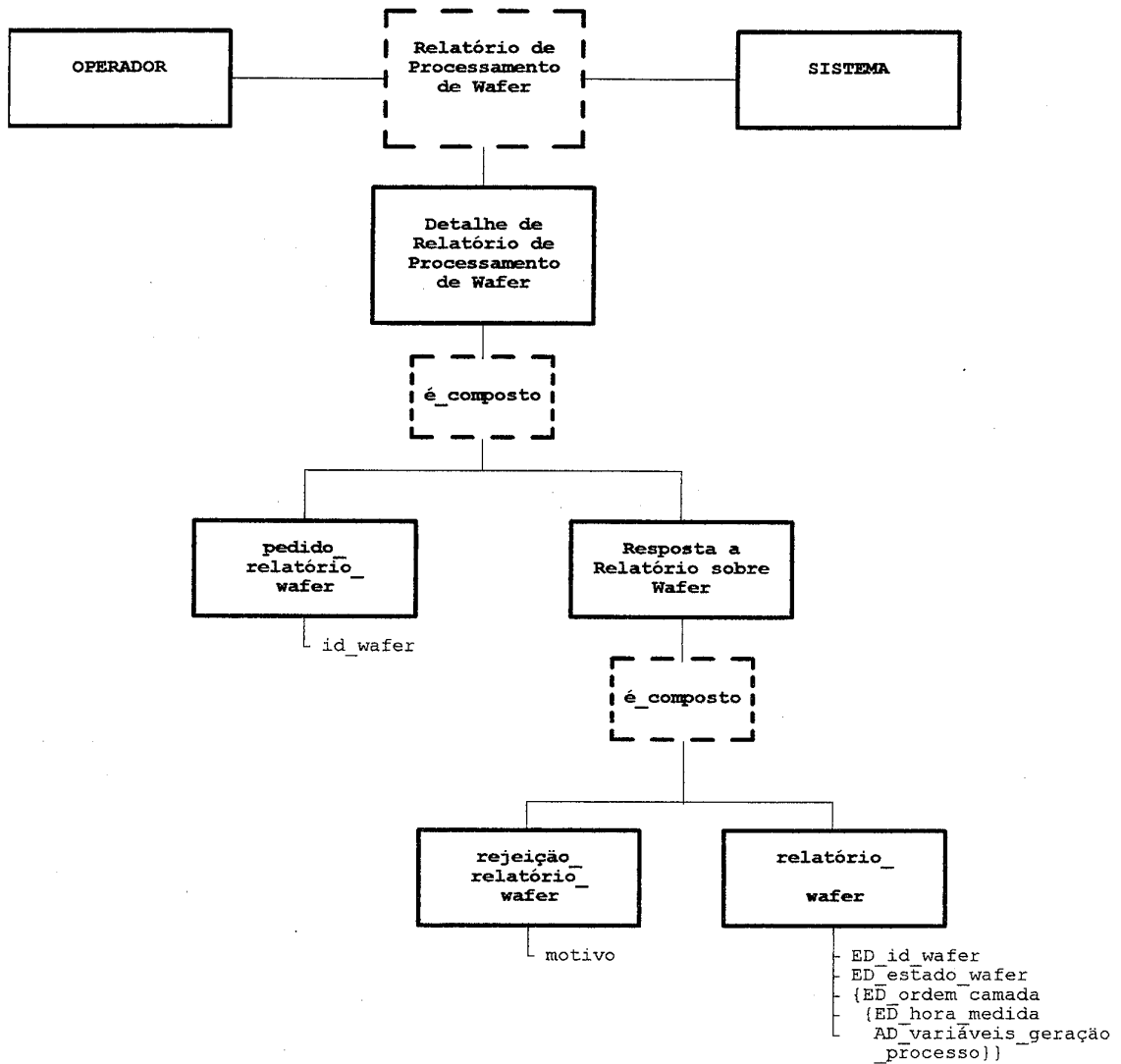


* evento externo 27 *

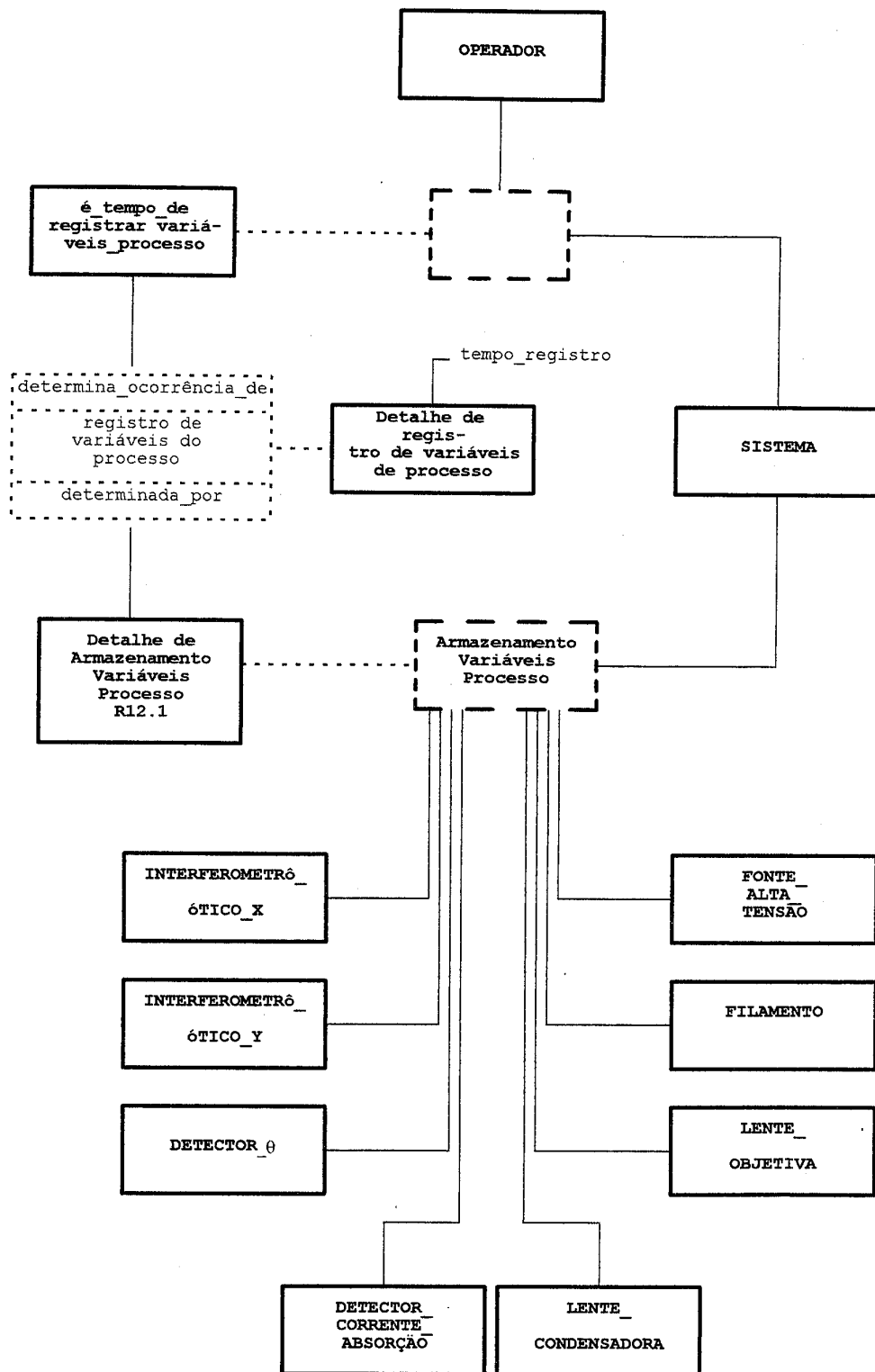
* evento externo 28 *

Detalhamento de R11

* evento externo 7 *

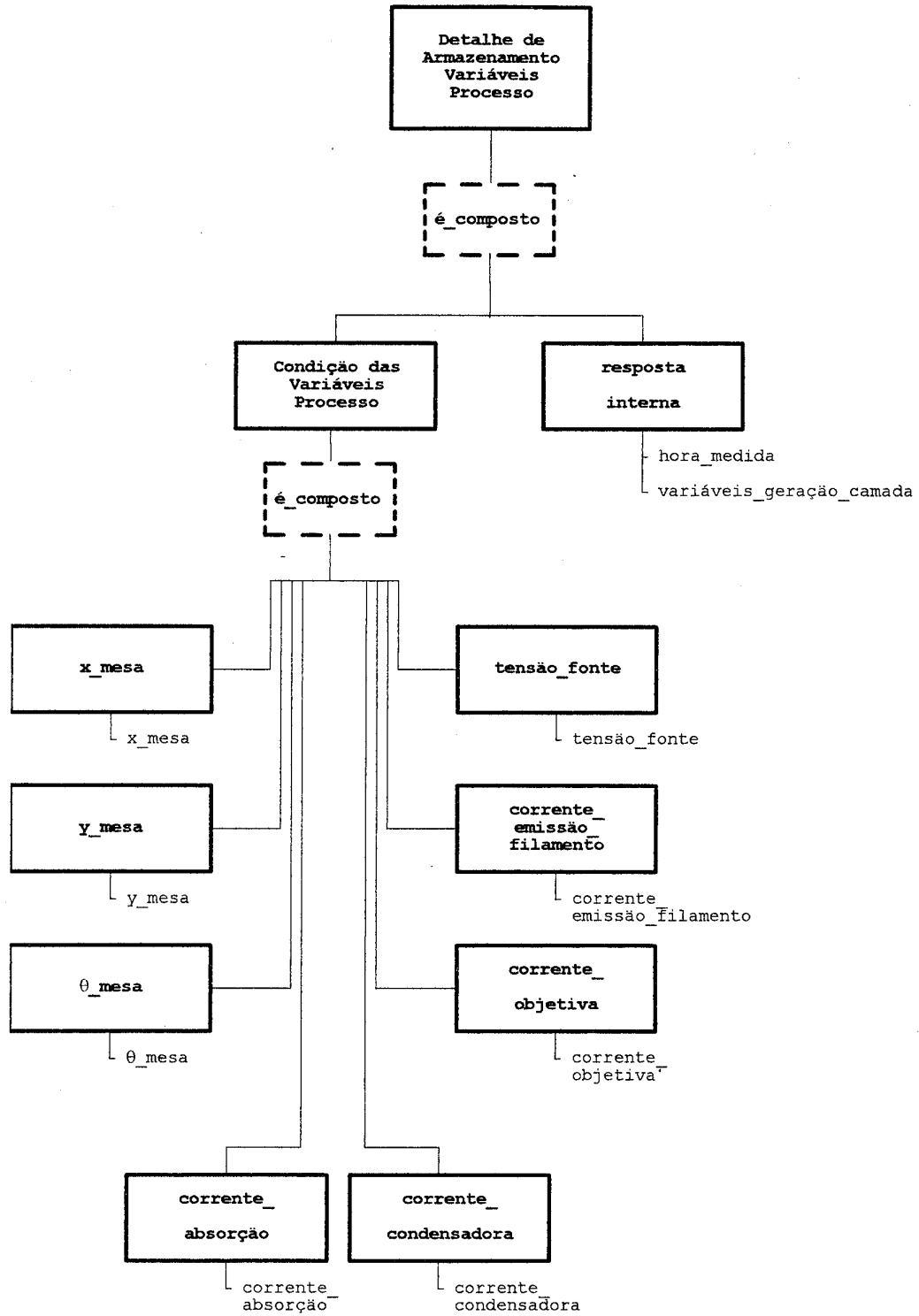


Detalhamento de R12

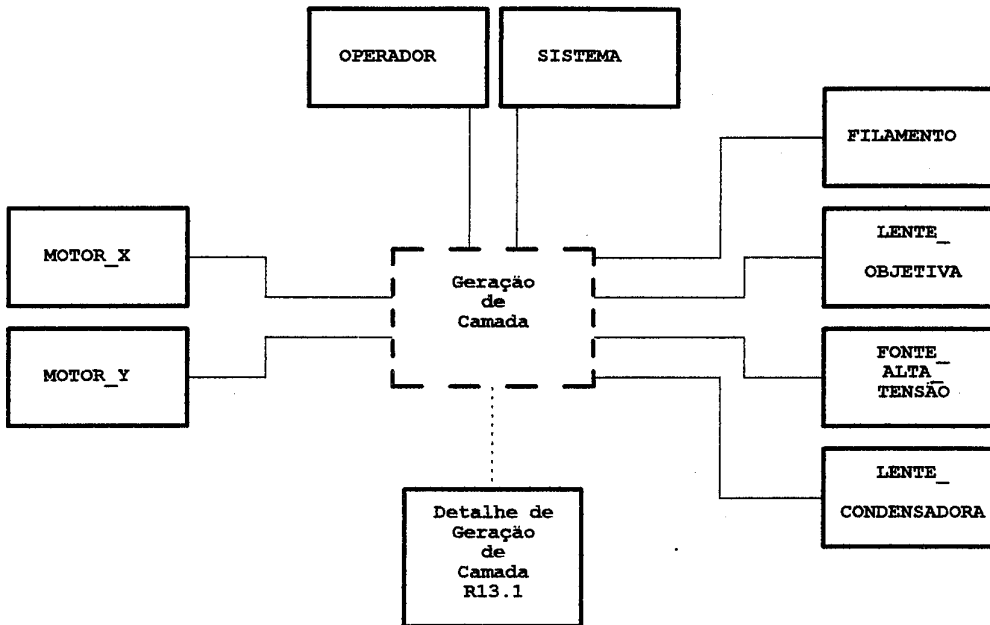


Detalhamento de R12.1

* evento externo 8 *



Detalhamento de R13

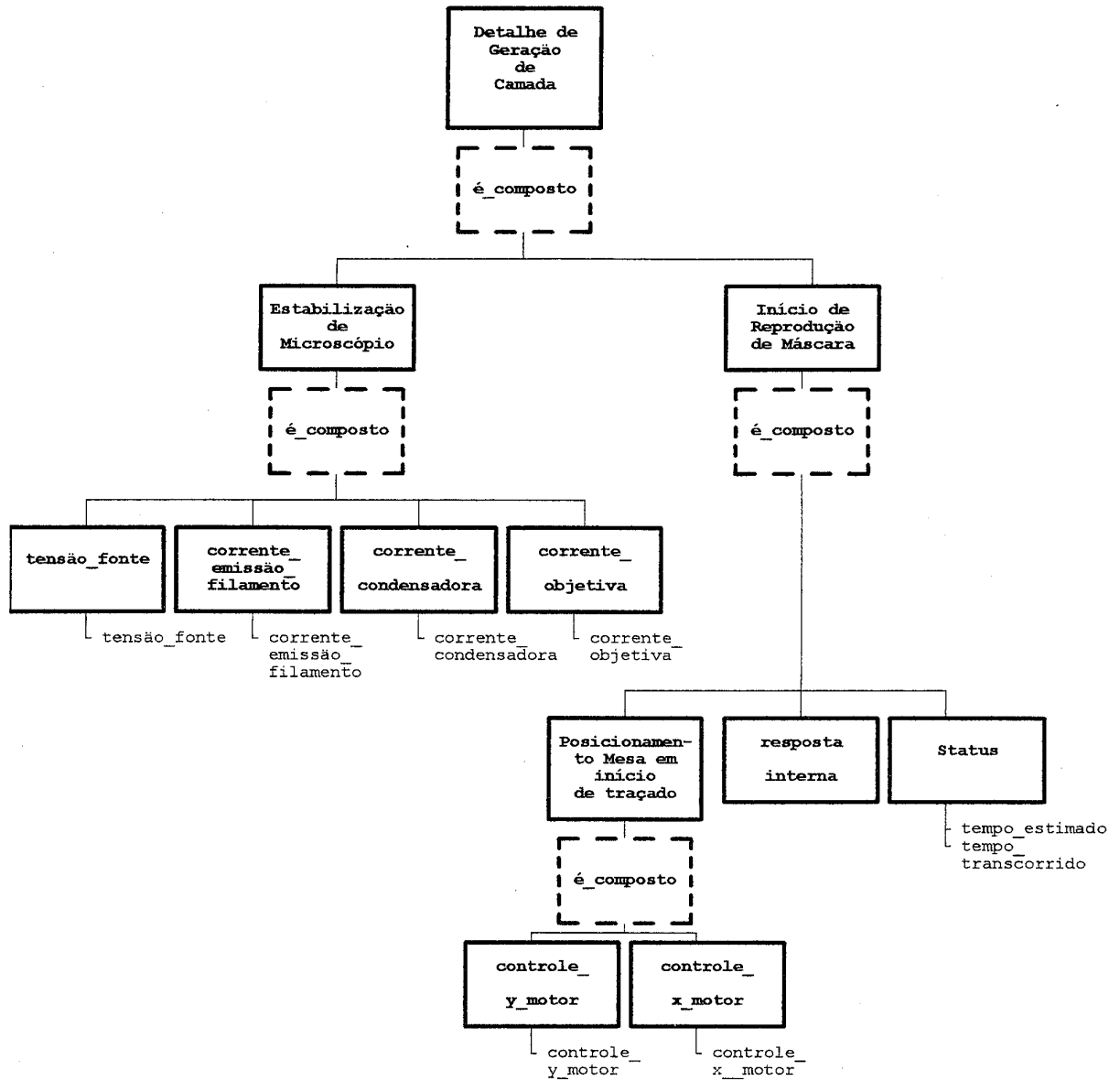


OBSERVAÇÃO:

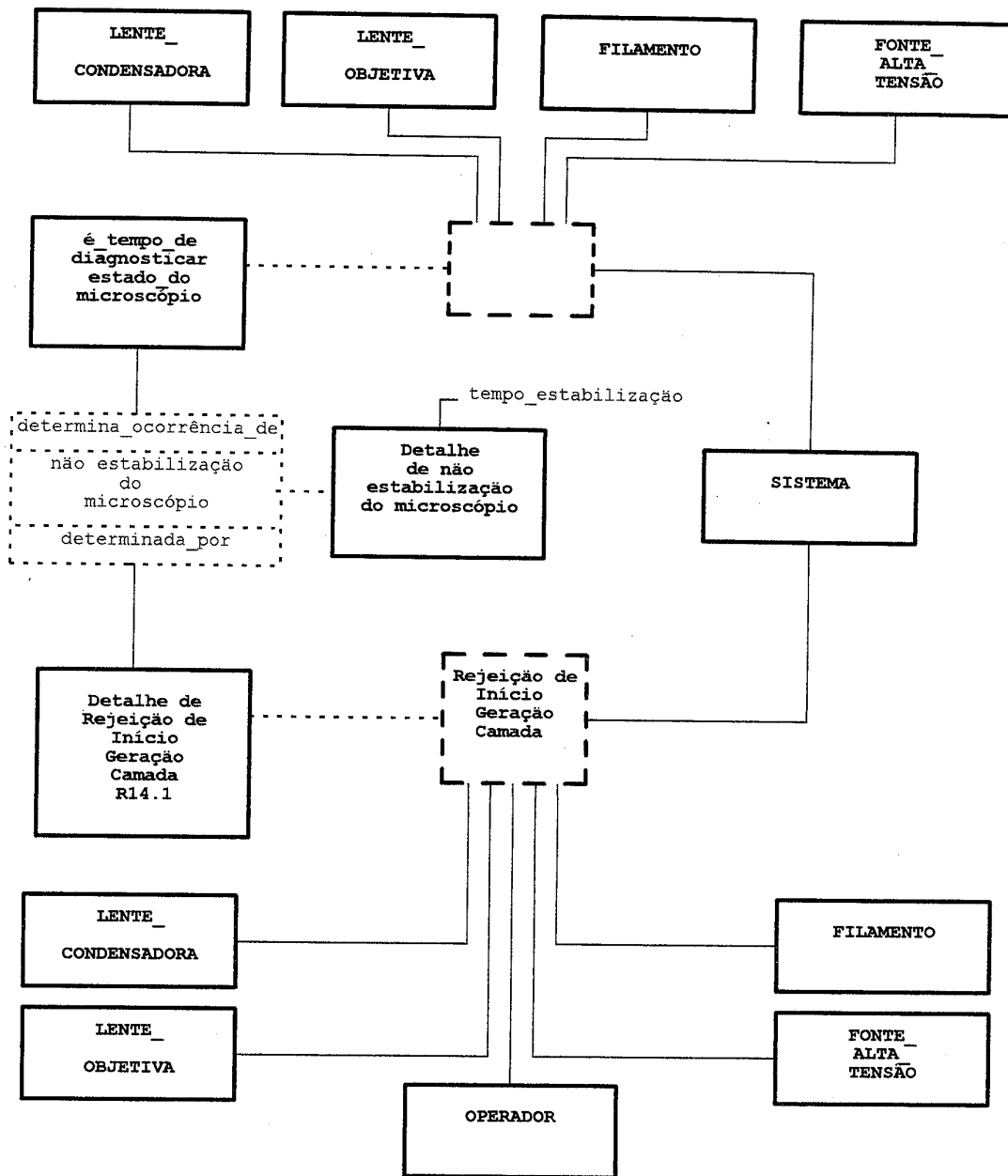
Como o Esquema Semântico destina-se a modelar transações entre o sistema e o ambiente externo associadas a ocorrências de eventos externos, este diagrama não deveria fazer parte desse esquema. Sua inclusão visa a um melhor entendimento da dinâmica do subsistema de controle/monitoramento e refere-se à porção resposta interna de controle contida na resposta interna presente na transação R3.1 - Confirmação de última marca.

Essa resposta interna de controle dá início à Geração de Camada, que ocorrerá somente se condições externas específicas, avaliadas pelo subsistema de controle, tiverem sido estabelecidas. Devido à complexidade dessa resposta interna de controle e a sua relevância para o sistema (relaciona-se ao objetivo final do sistema), empregou-se a linguagem de representação associada ao Esquema Semântico para representar Geração de Camada como uma "transação" cuja "entrada" não corresponde a uma sinalização decorrente da ocorrência de um evento externo. Essa "entrada" corresponde à leitura de variáveis contínuas do processo que permite ao subsistema de controle/monitoramento avaliar o estado do processo e comandar sua continuação no sentido de gerar máscara. A leitura é efetivada pelo subsistema quando este encontra-se em um estado interno - fim de alinhamento com sucesso - alcançado durante a execução da resposta interna de controle acima mencionada.

Detalhamento de R13.1

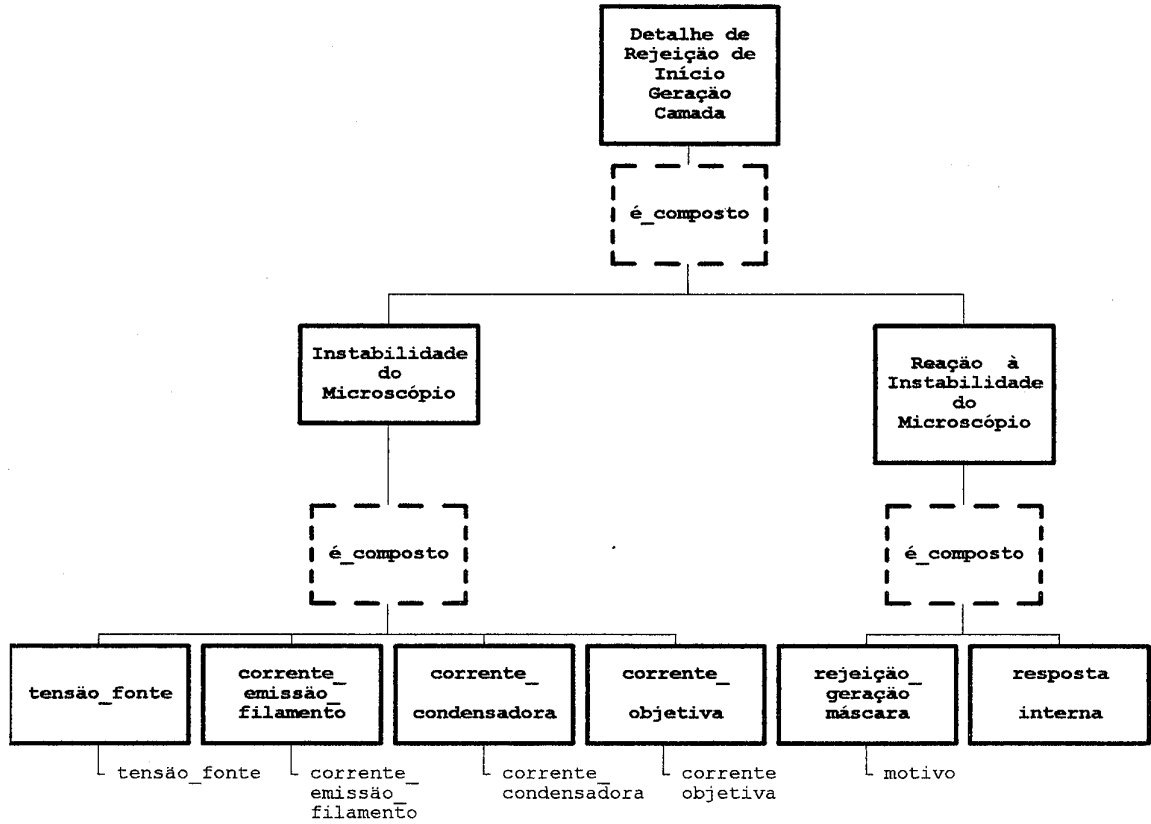


Detalhamento de R14



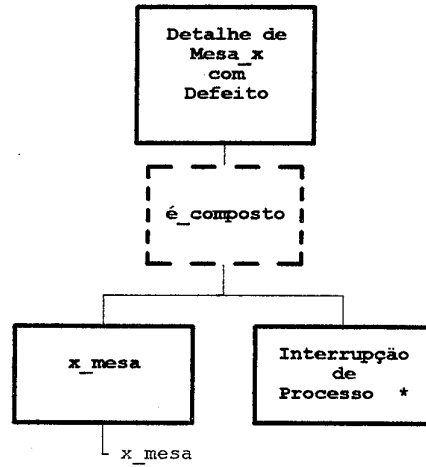
Detalhamento de R14.1

* evento externo 29 *



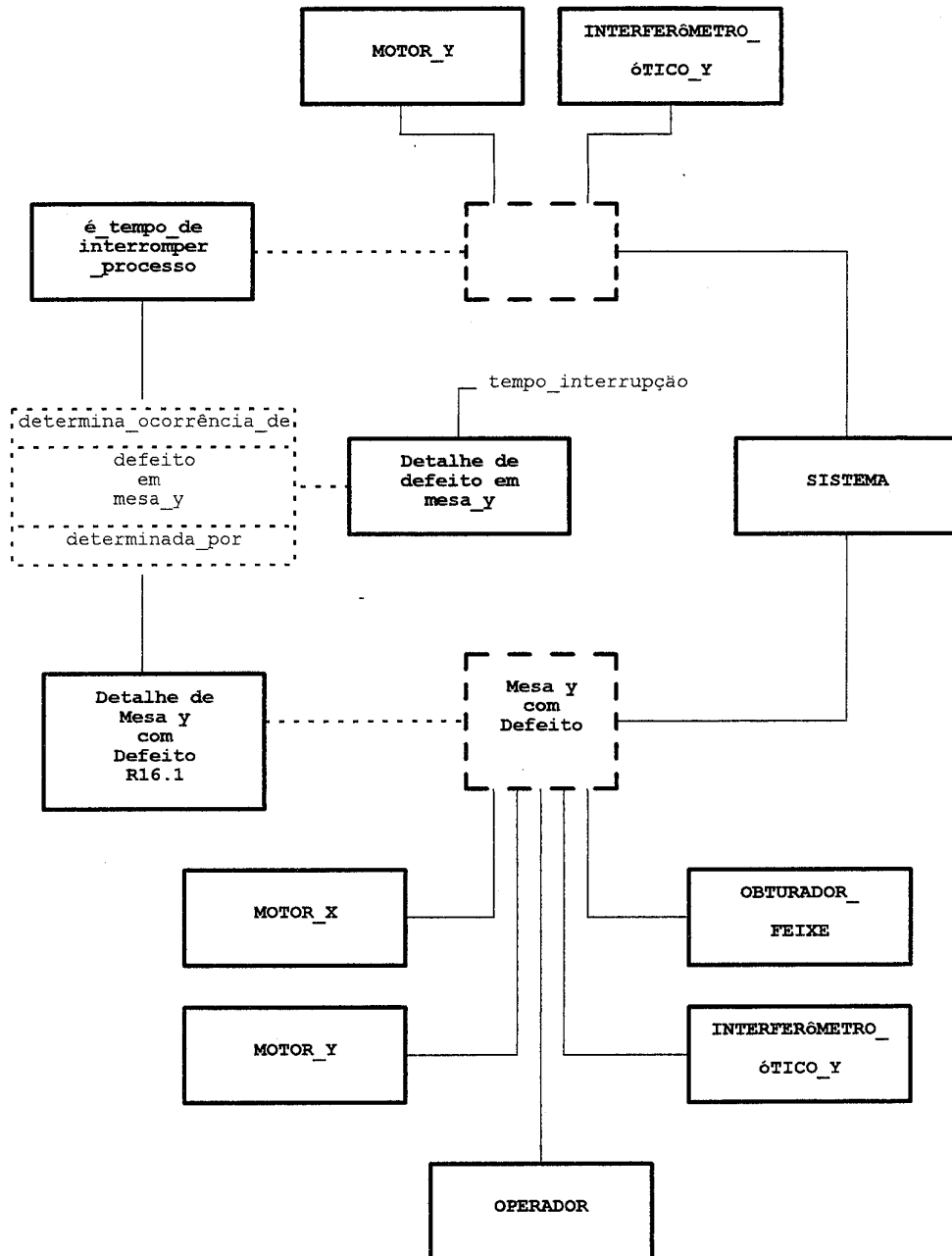
Detalhamento de R15.1

* evento externo 18 *



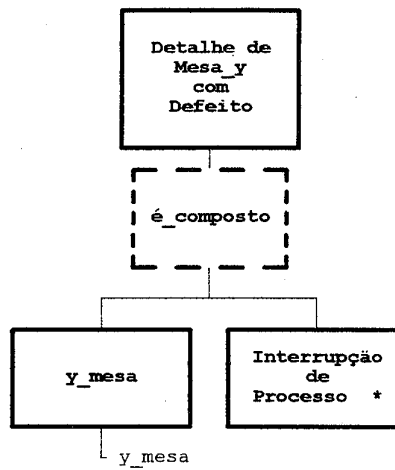
* O detalhamento de Interrupção de Processo encontra-se ao final do Esquema Semântico

Detalhamento de R16



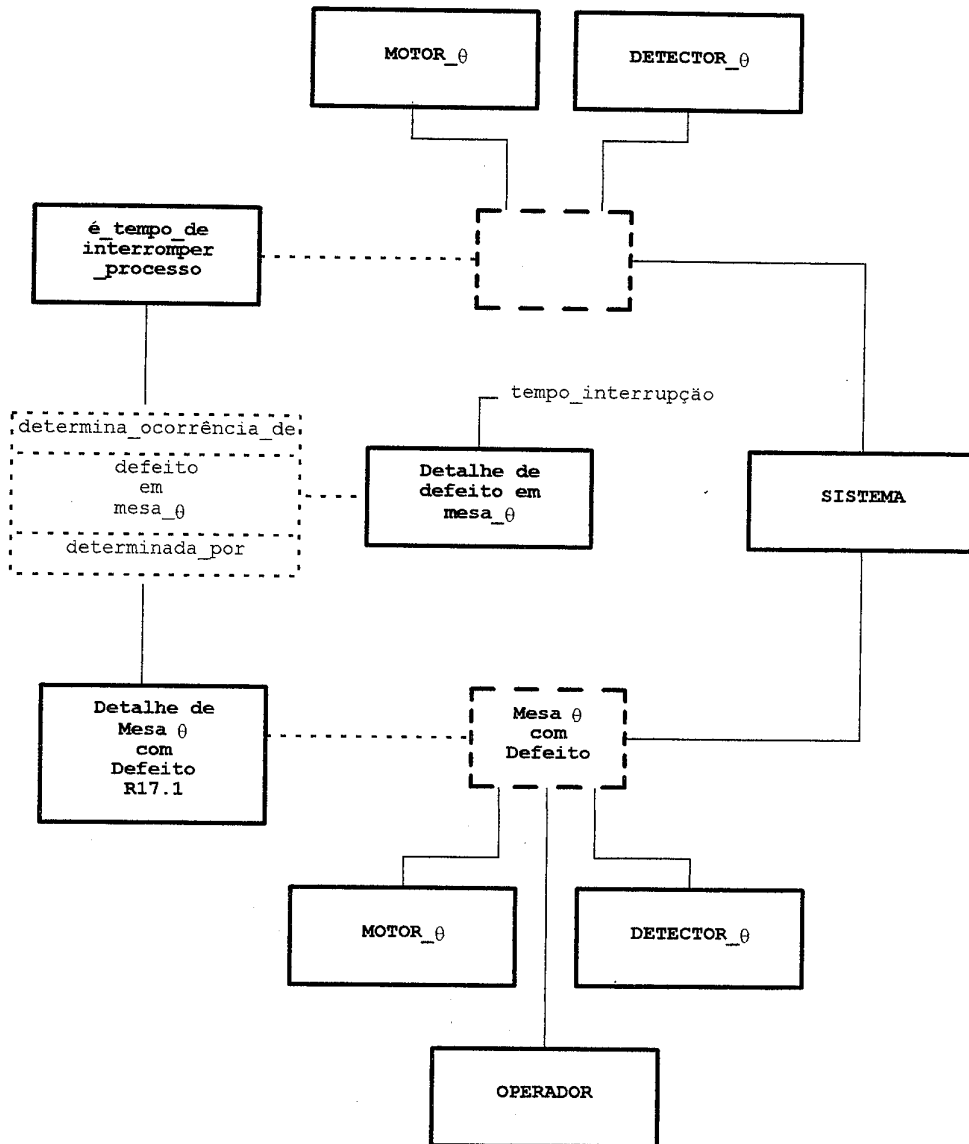
Detalhamento de R16.1

* evento externo 19 *



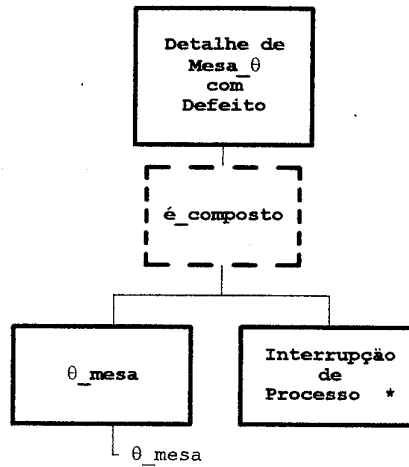
* O detalhamento de Interrupção de Processo encontra-se ao final do Esquema Semântico

Detalhamento de R17



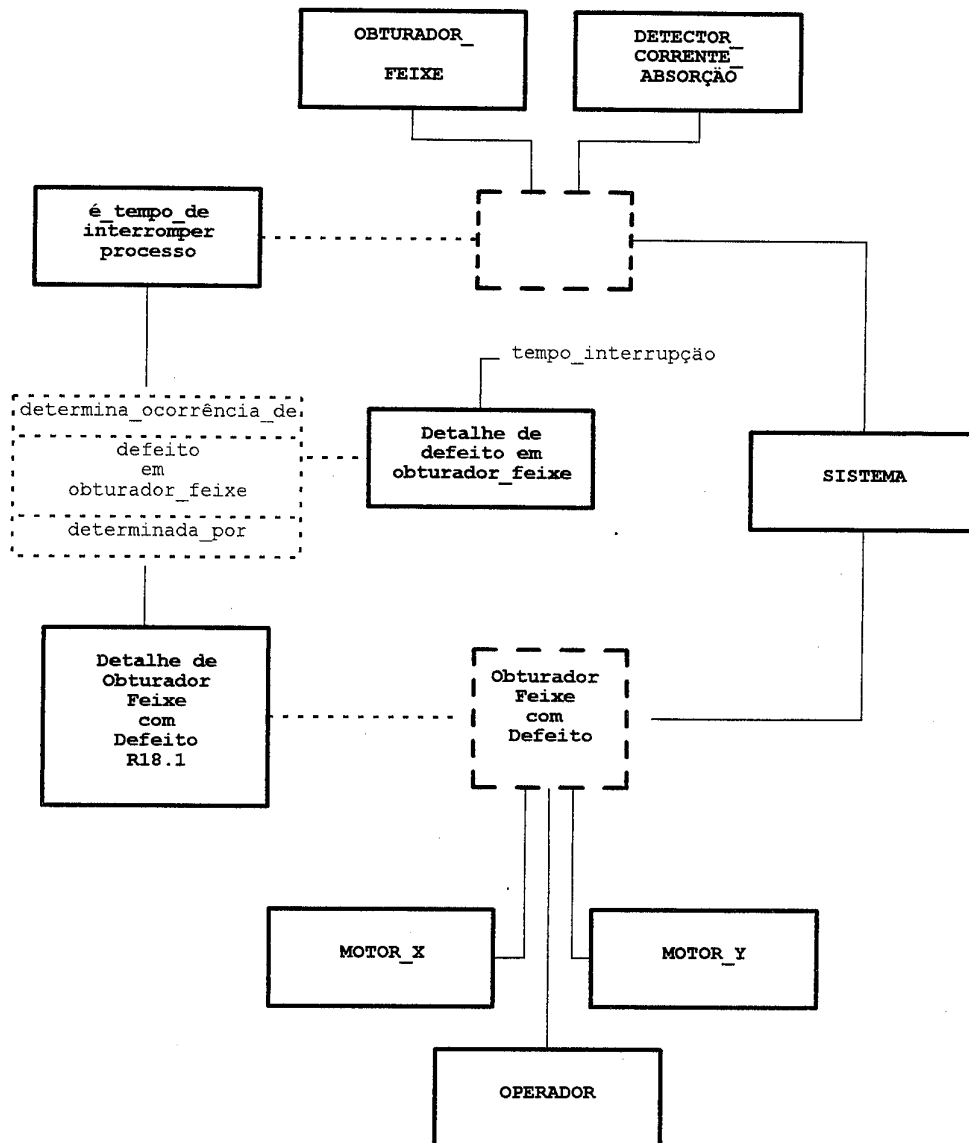
Detalhamento de R17.1

* evento externo 20 *

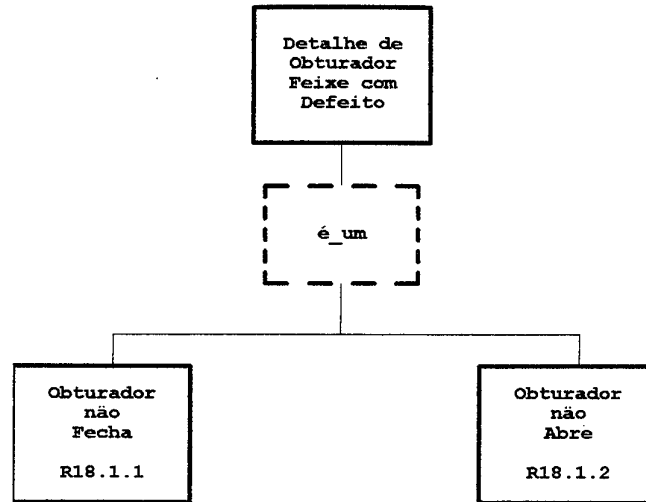


* O detalhamento de Interrupção de Processo encontra-se ao final do Esquema Semântico

Detalhamento de R18

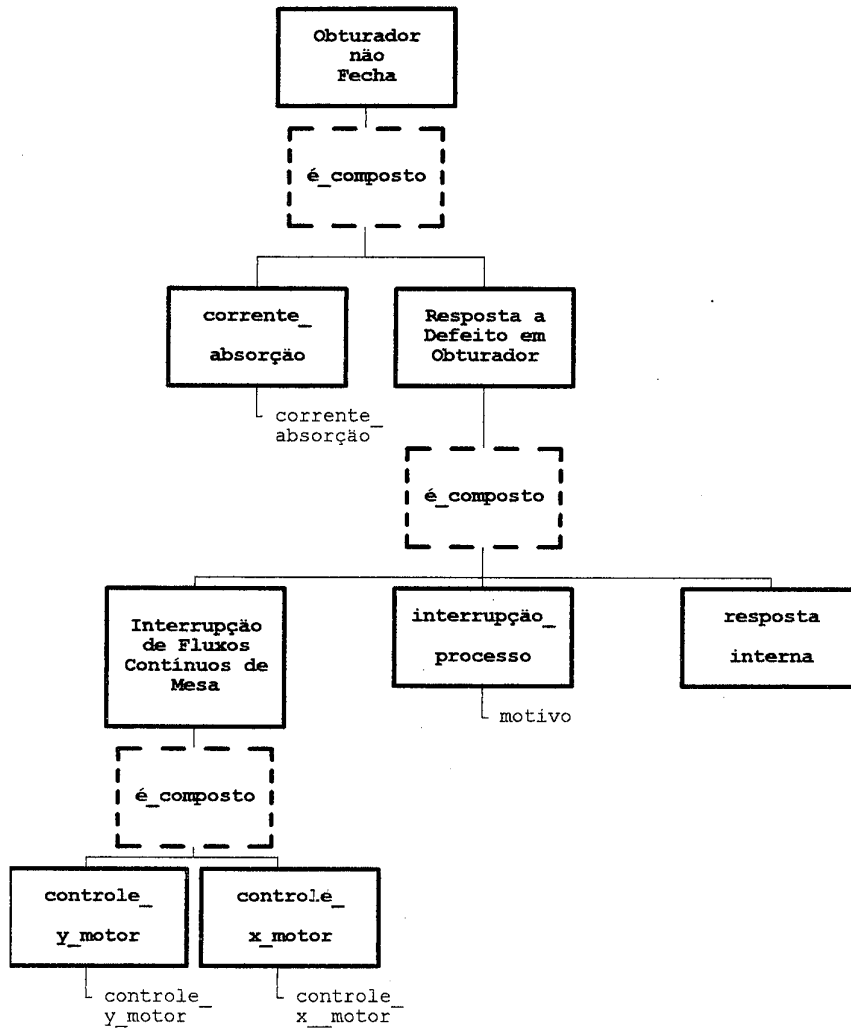


Detalhamento de R18.1



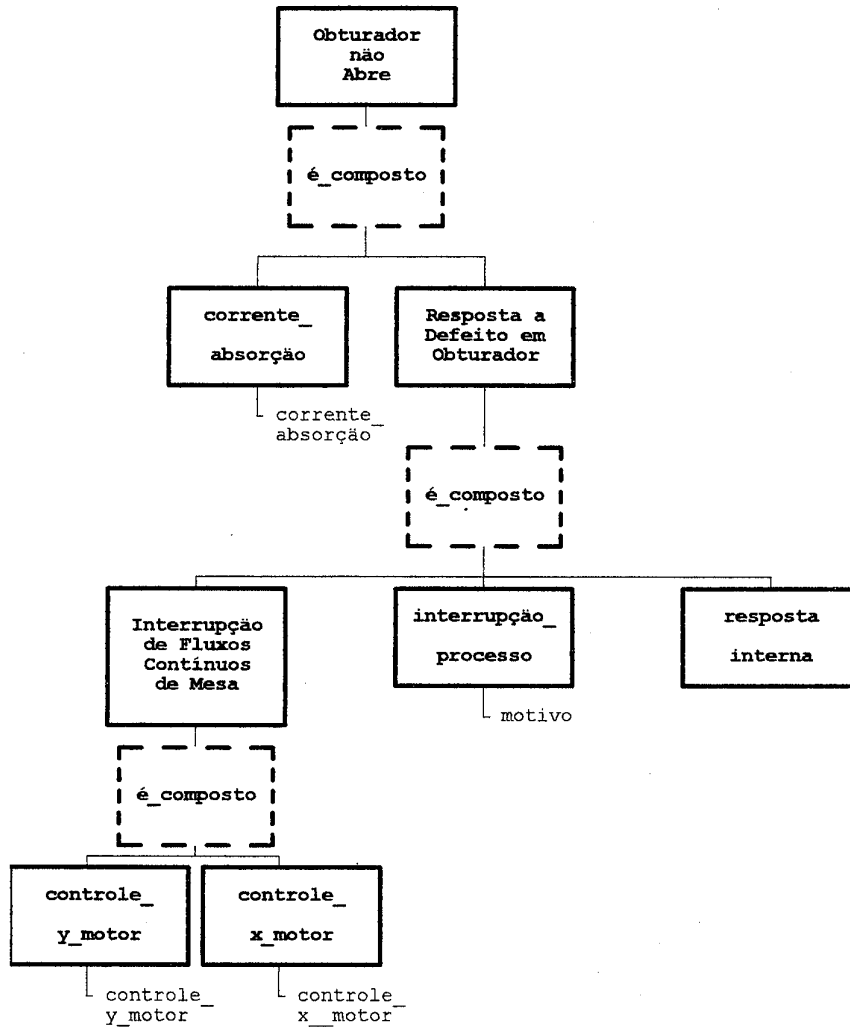
Detalhamento de R18.1.1

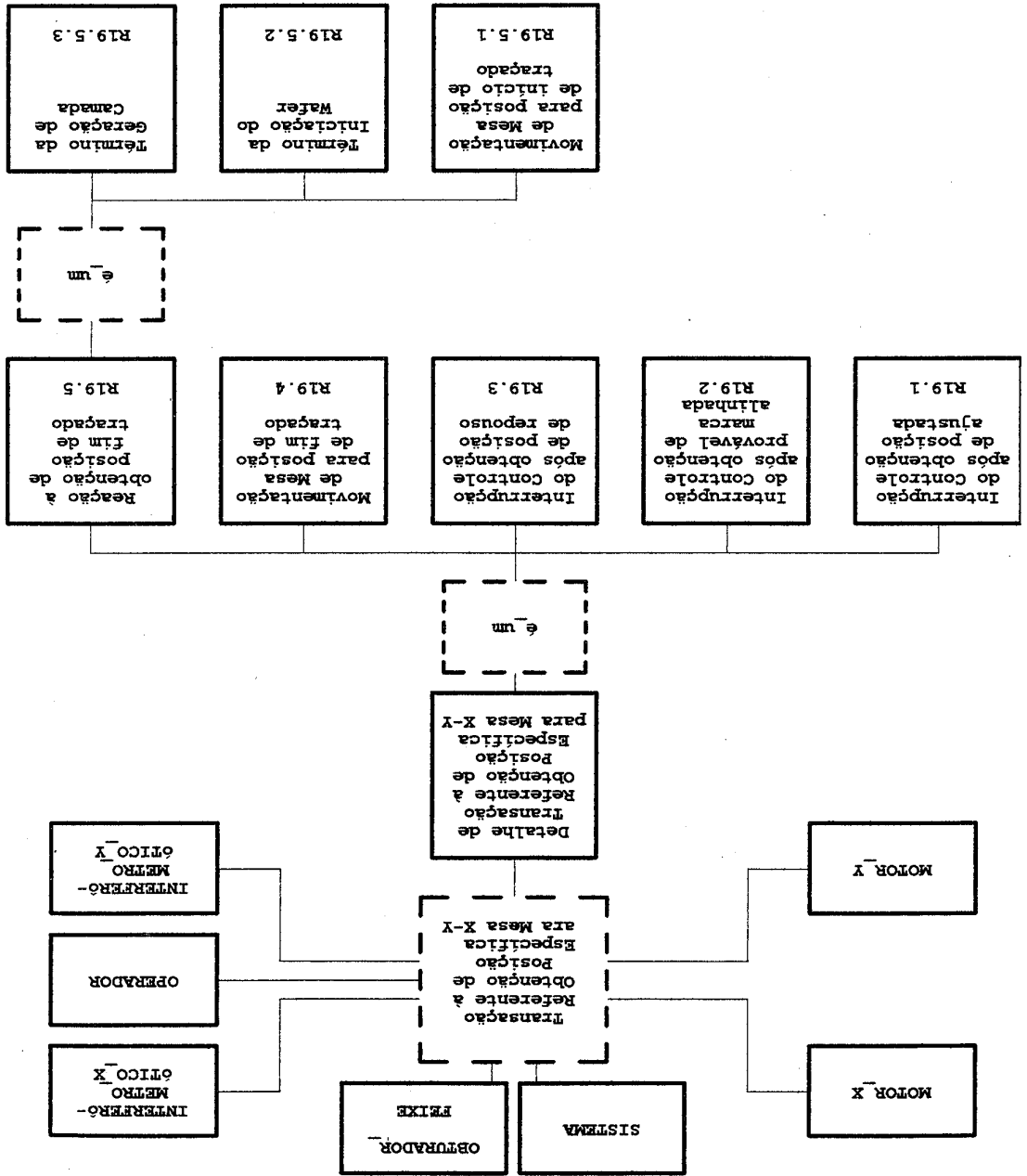
* evento externo 31 *



Detalhamento de R18.1.2

* evento externo 30 *

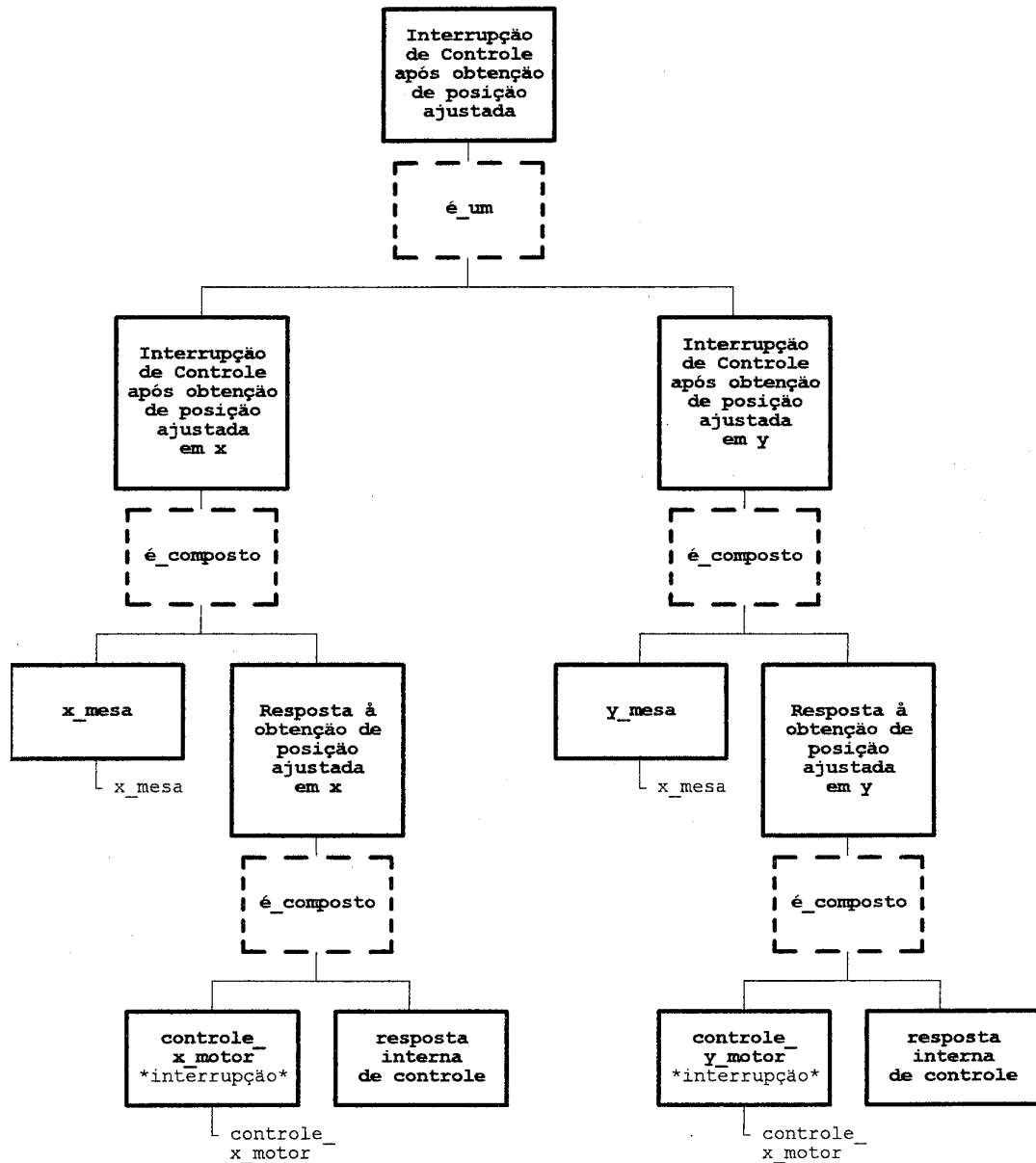




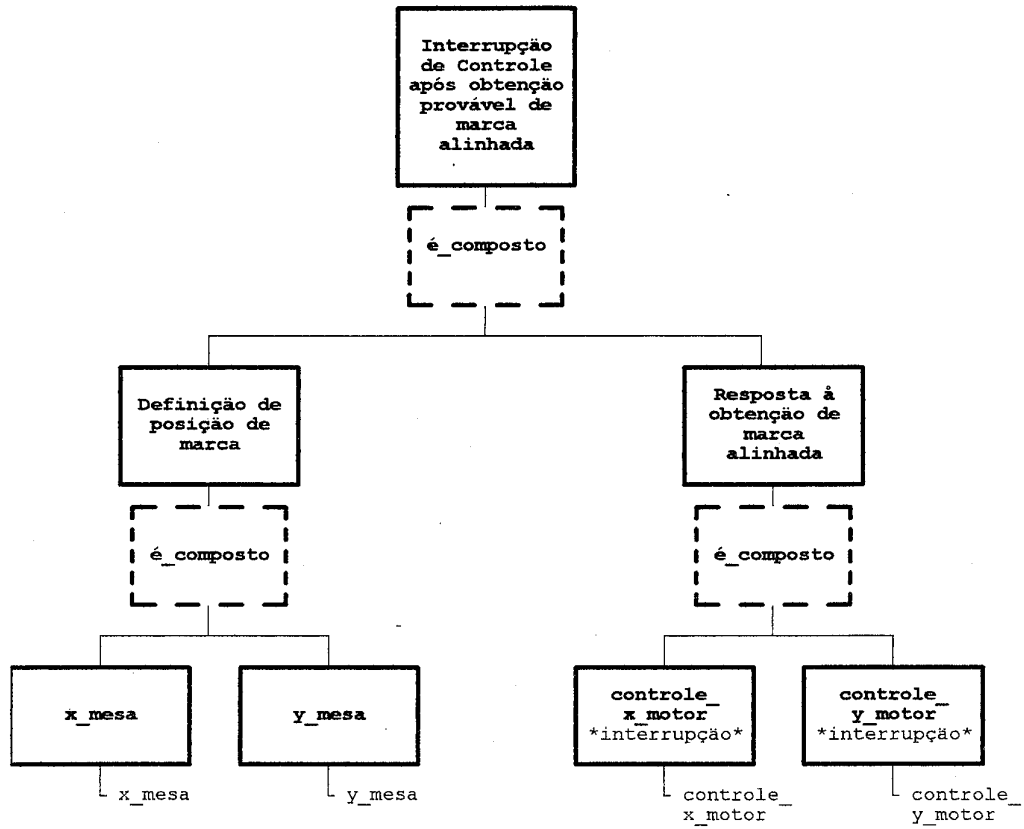
Detalhamento de R19

* evento externo 9 e 10 *

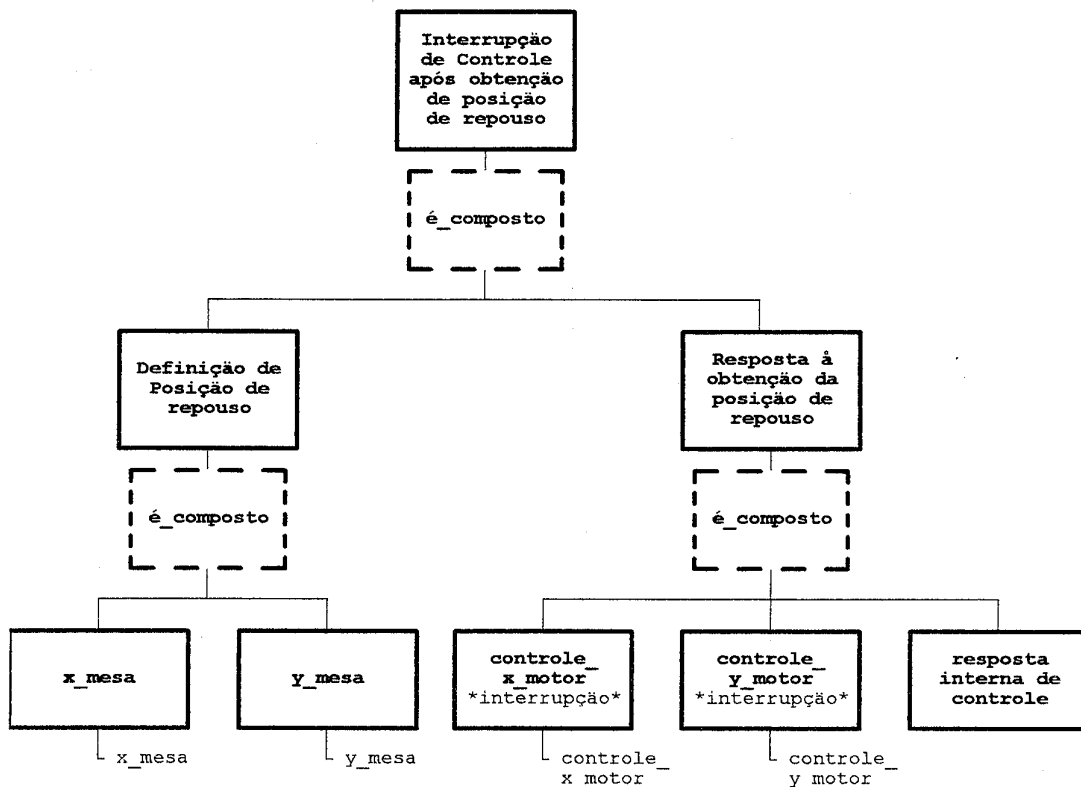
Detalhamento de R19.1



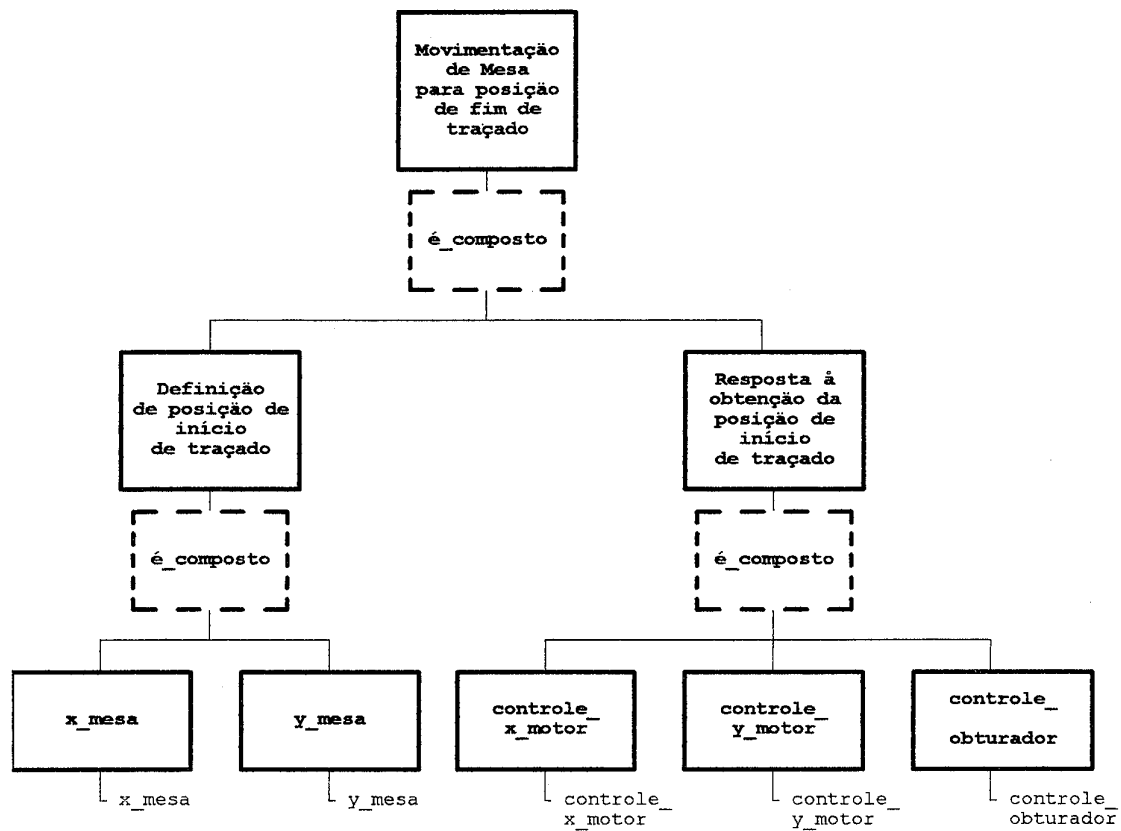
Detalhamento de R19.2



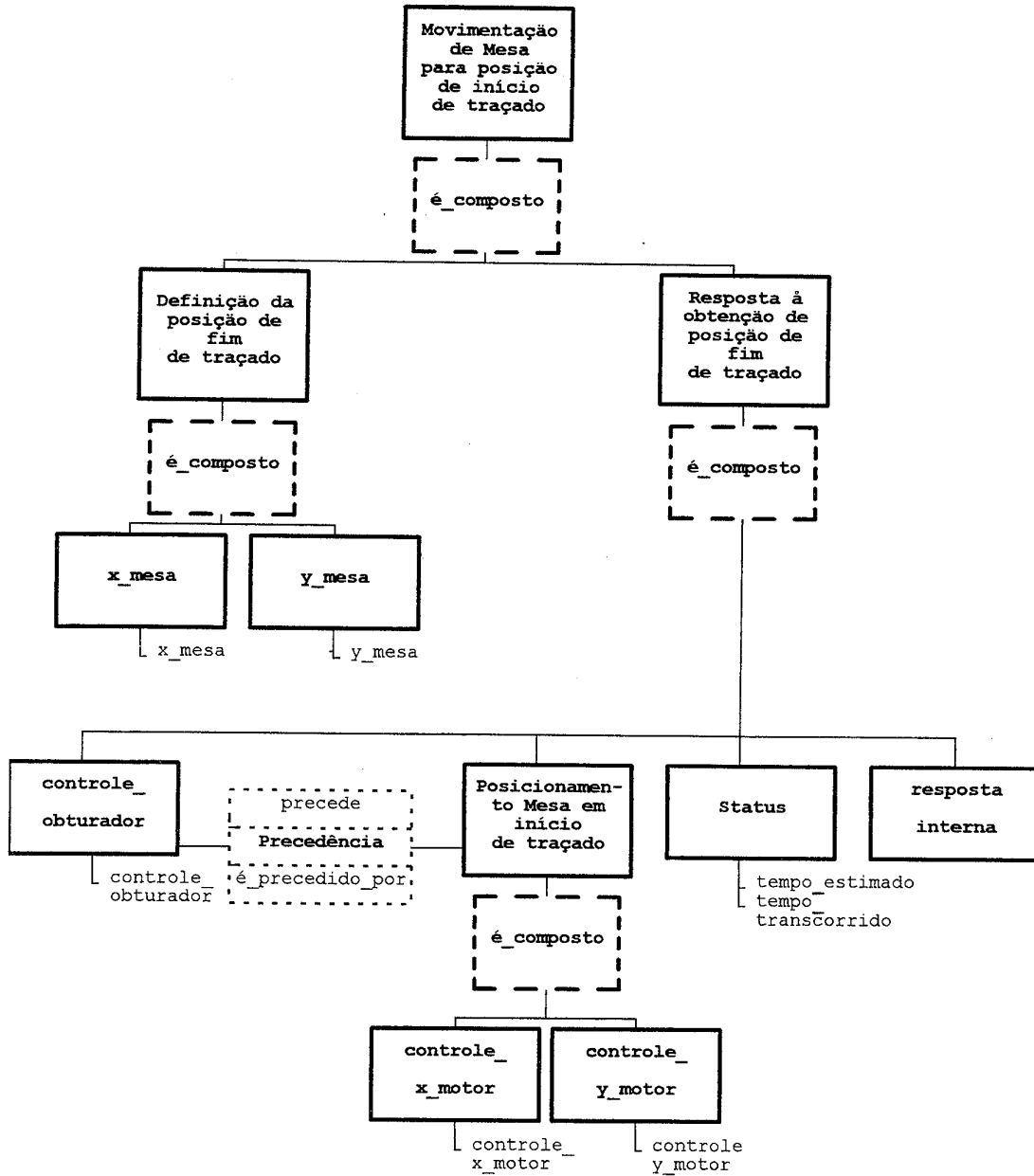
Detalhamento de R19.3



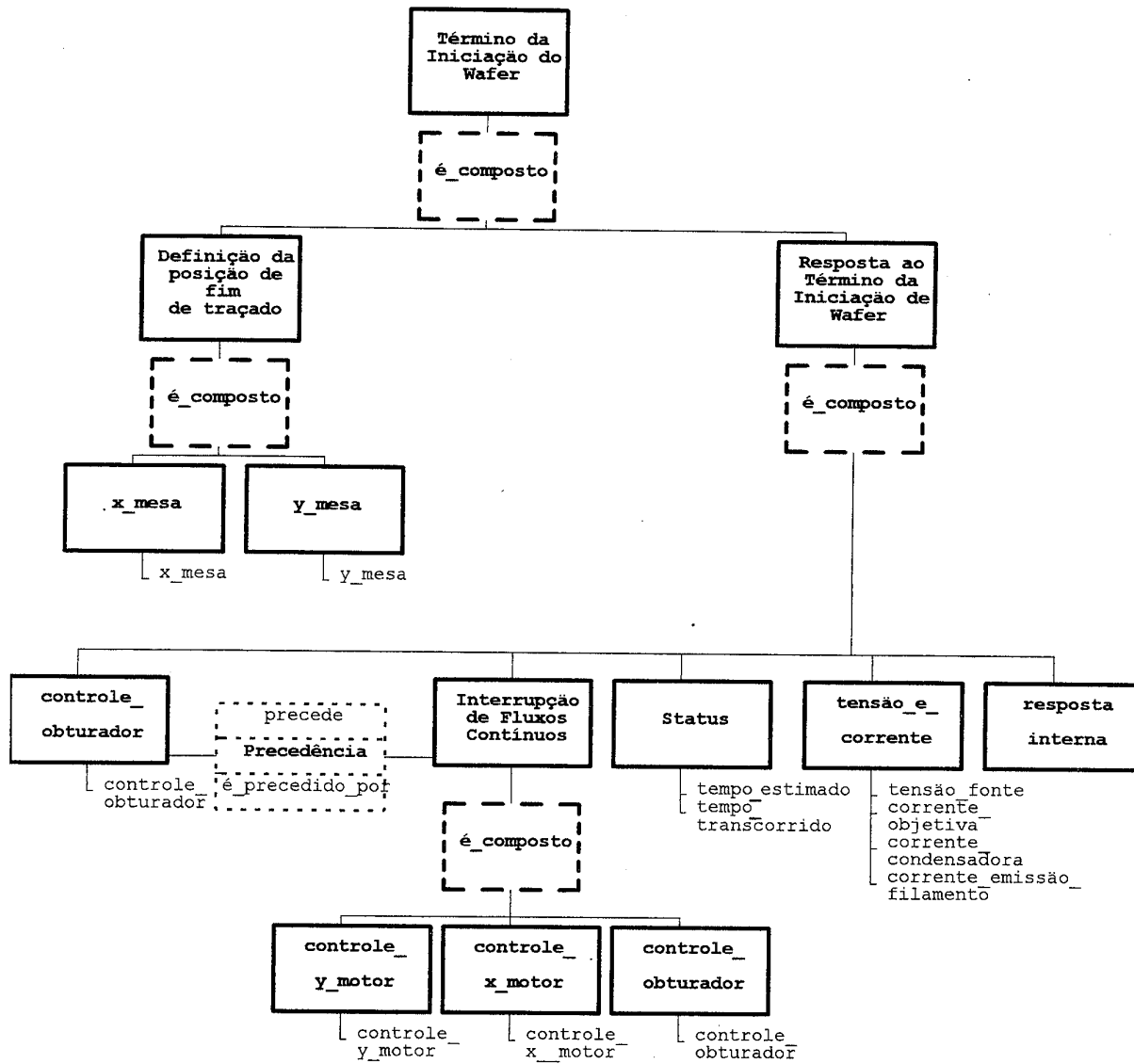
Detalhamento de R19.4



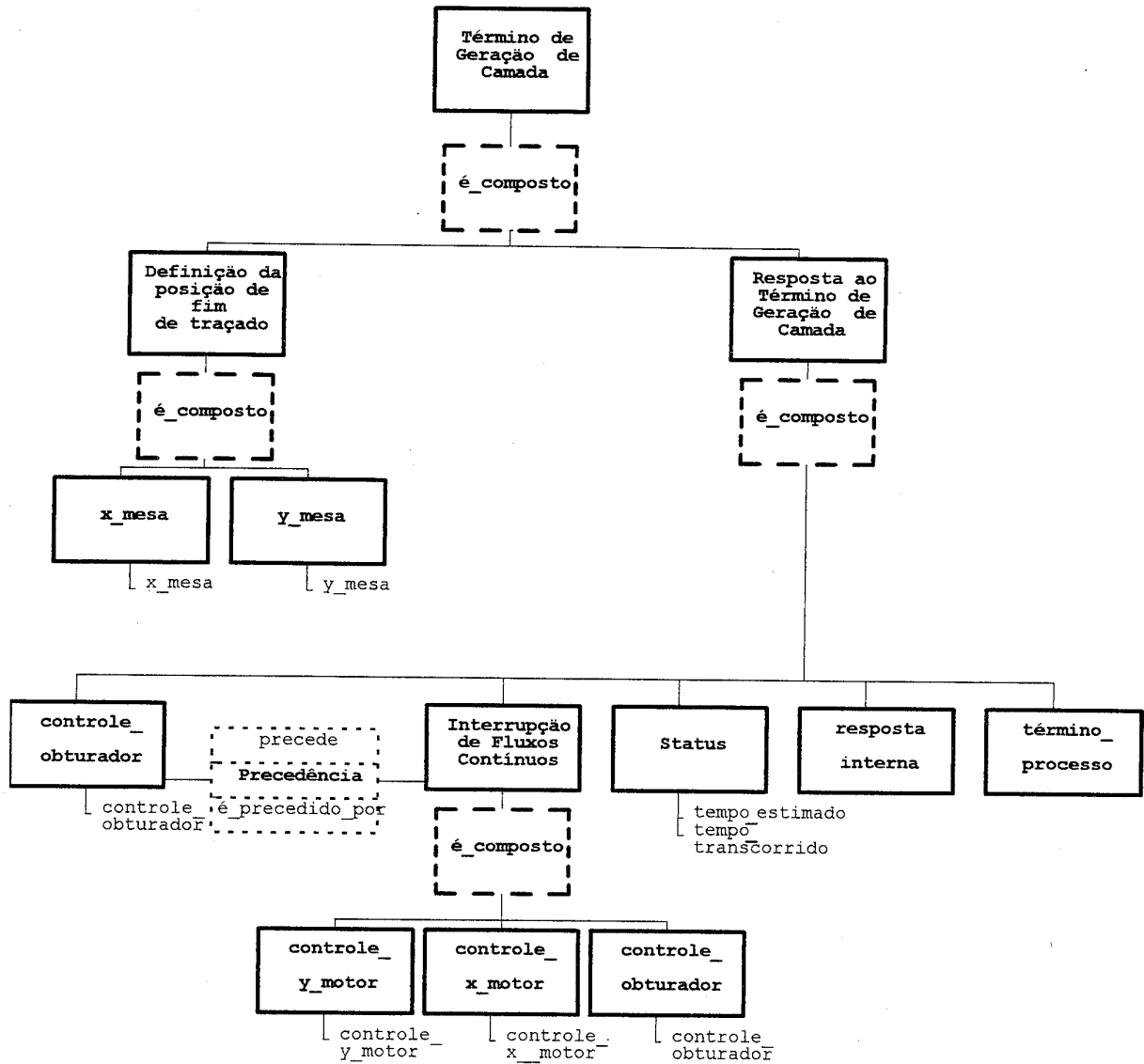
Detalhamento de R19.5.1



Detalhamento de R19.5.2

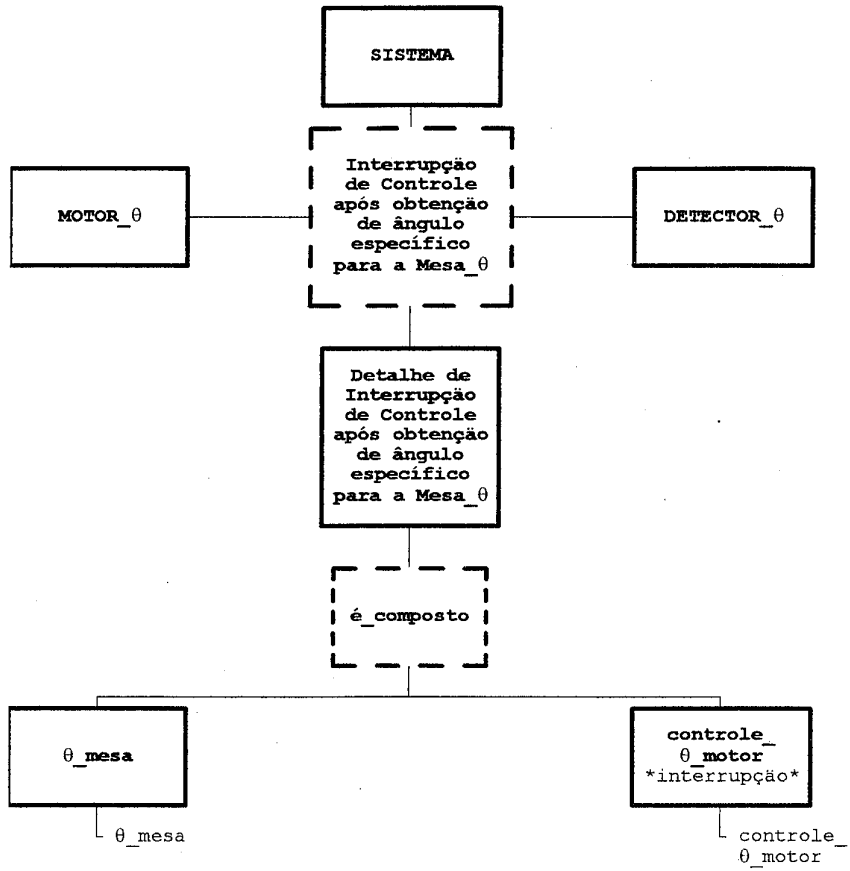


Detalhamento de R19.5.3

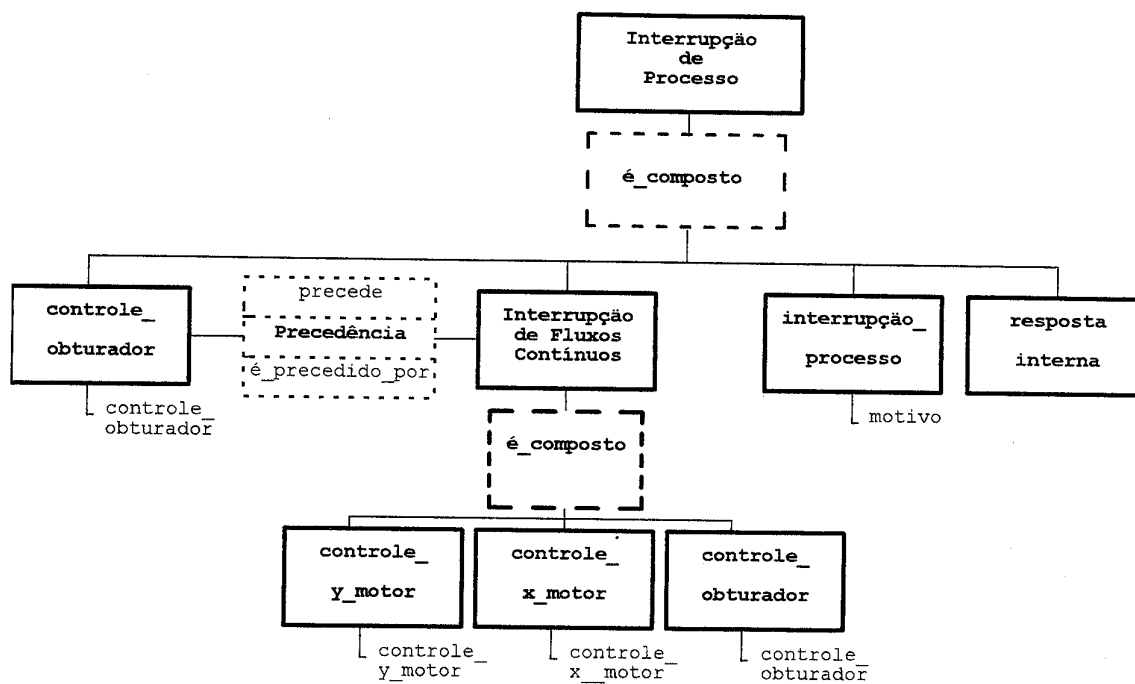


Detalhamento de R20

* evento externo 11 *



Detalhamento de Interrupção de Processo



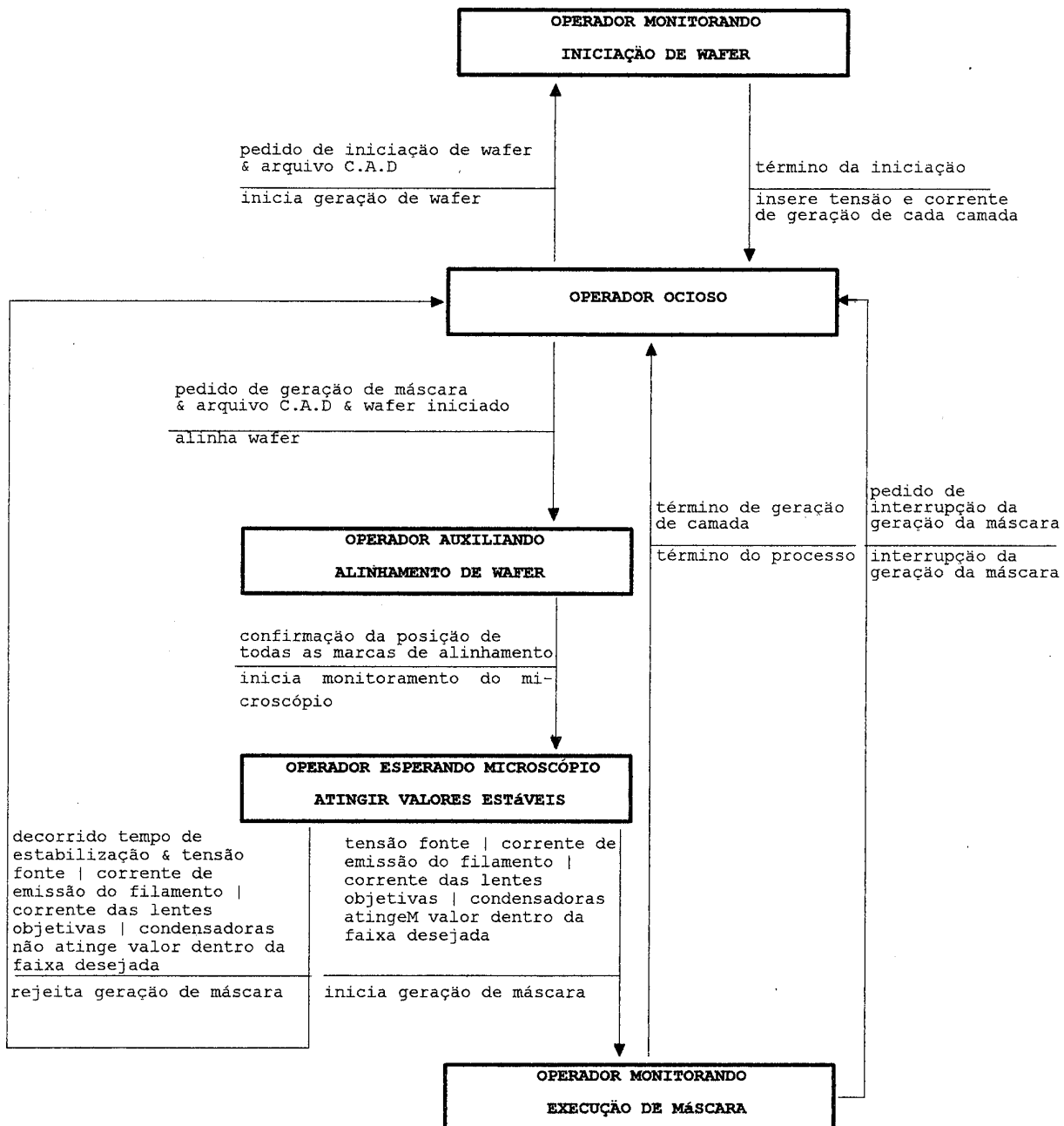
2.2.3. Esquema da Dinâmica

2.2.3.1. Versão utilizando Diagramas de Estados e Transições

Controle de Geração de Wafer

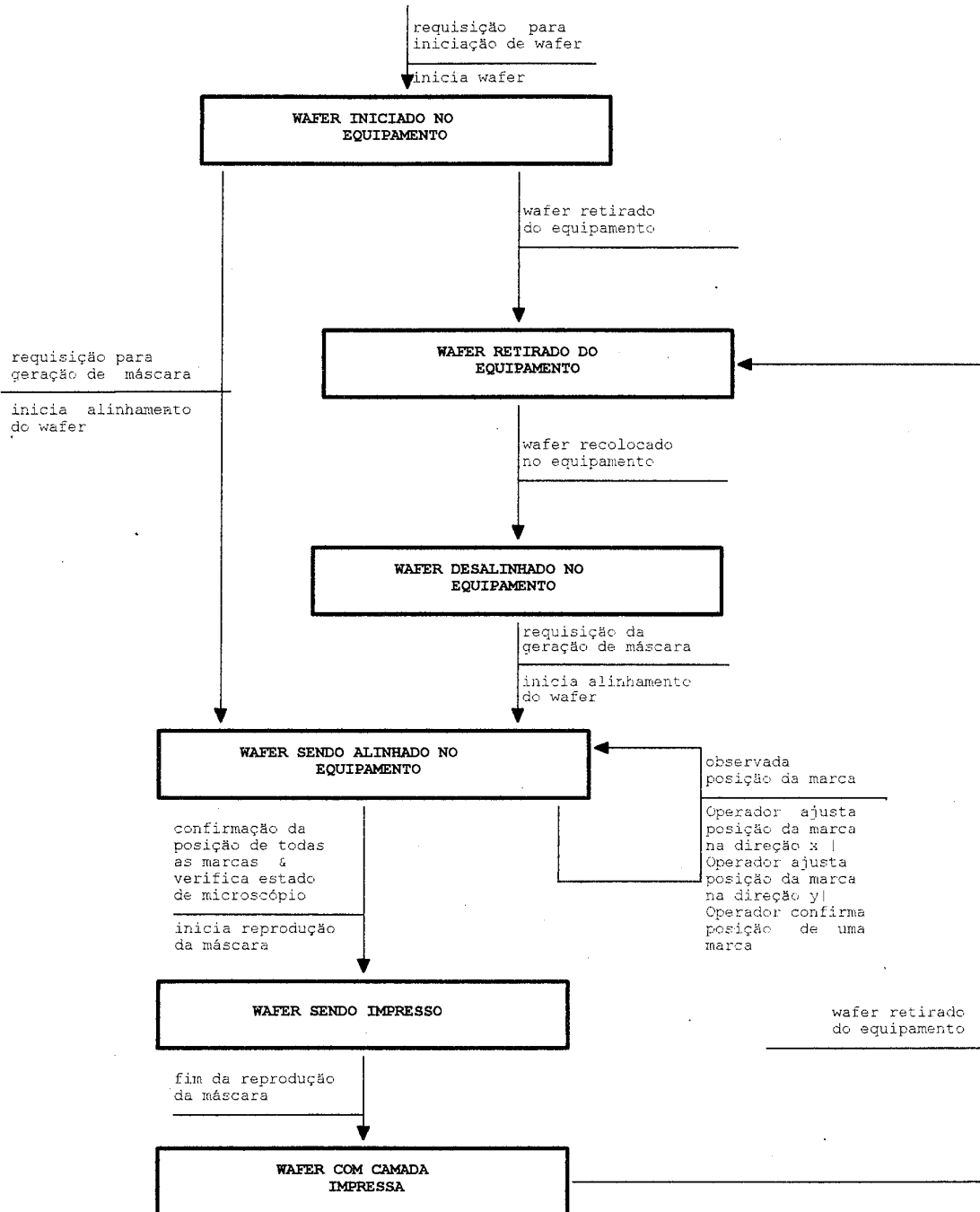
(Sob o ponto de vista do operador)

(Eventos Externos:1,2)



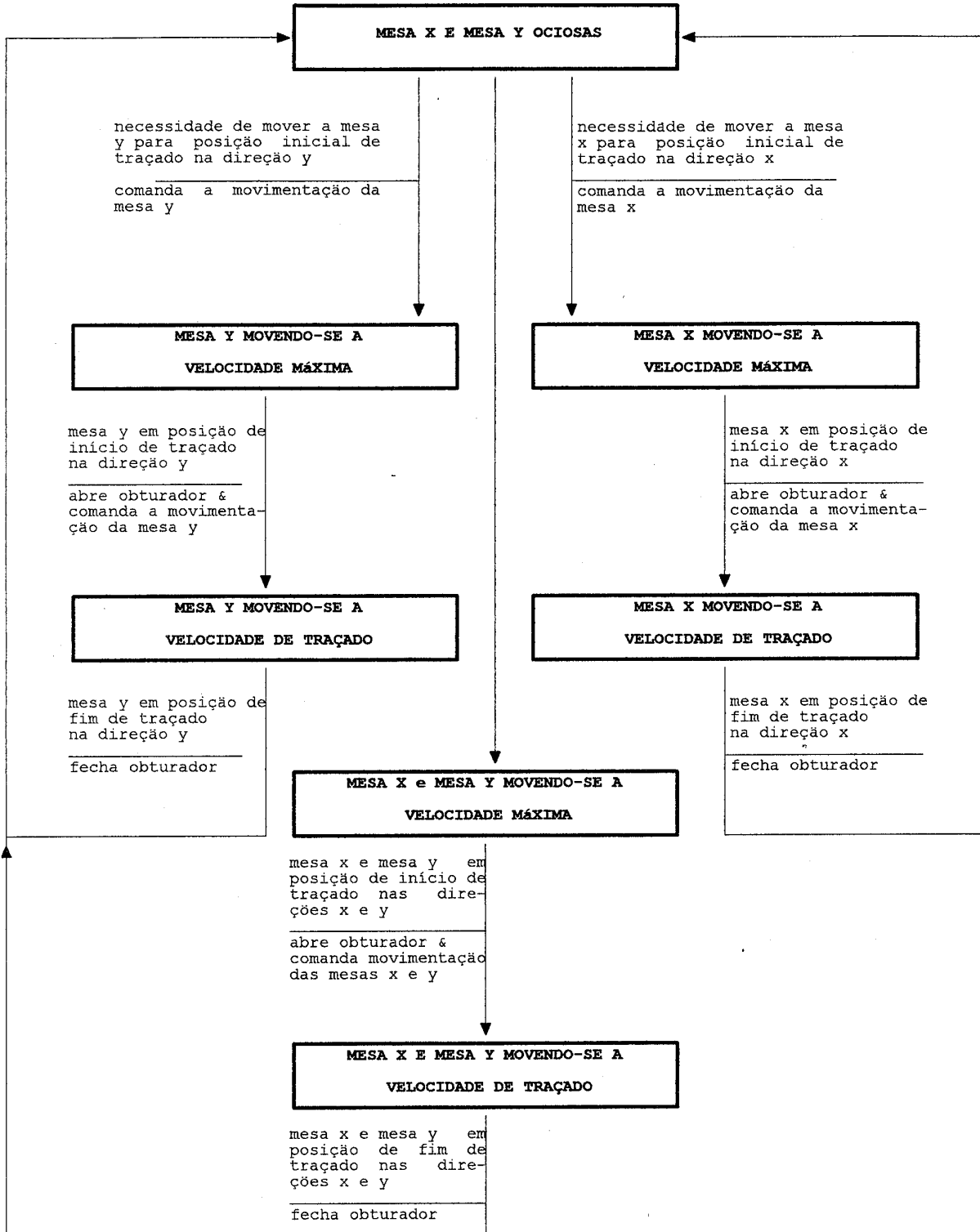
Controle de Geração de Wafer

(sob o ponto de vista do wafer)
(Eventos Externos:1,2)



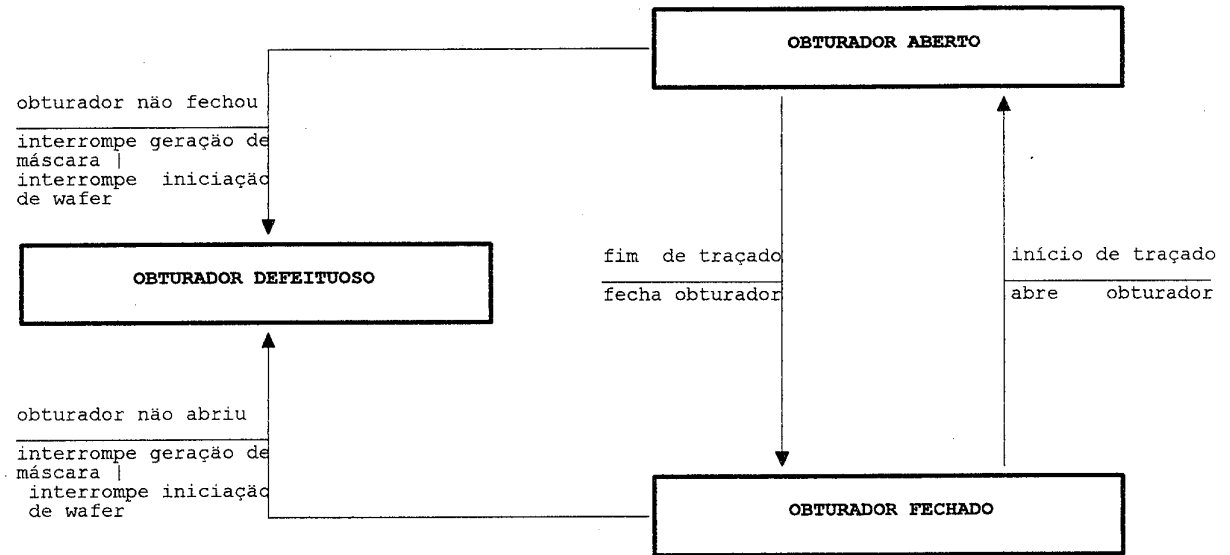
Execução de Traçado

(Eventos Externos: Mesa X-9,12,15 e 18
Mesa Y-10,13,16 e 19)



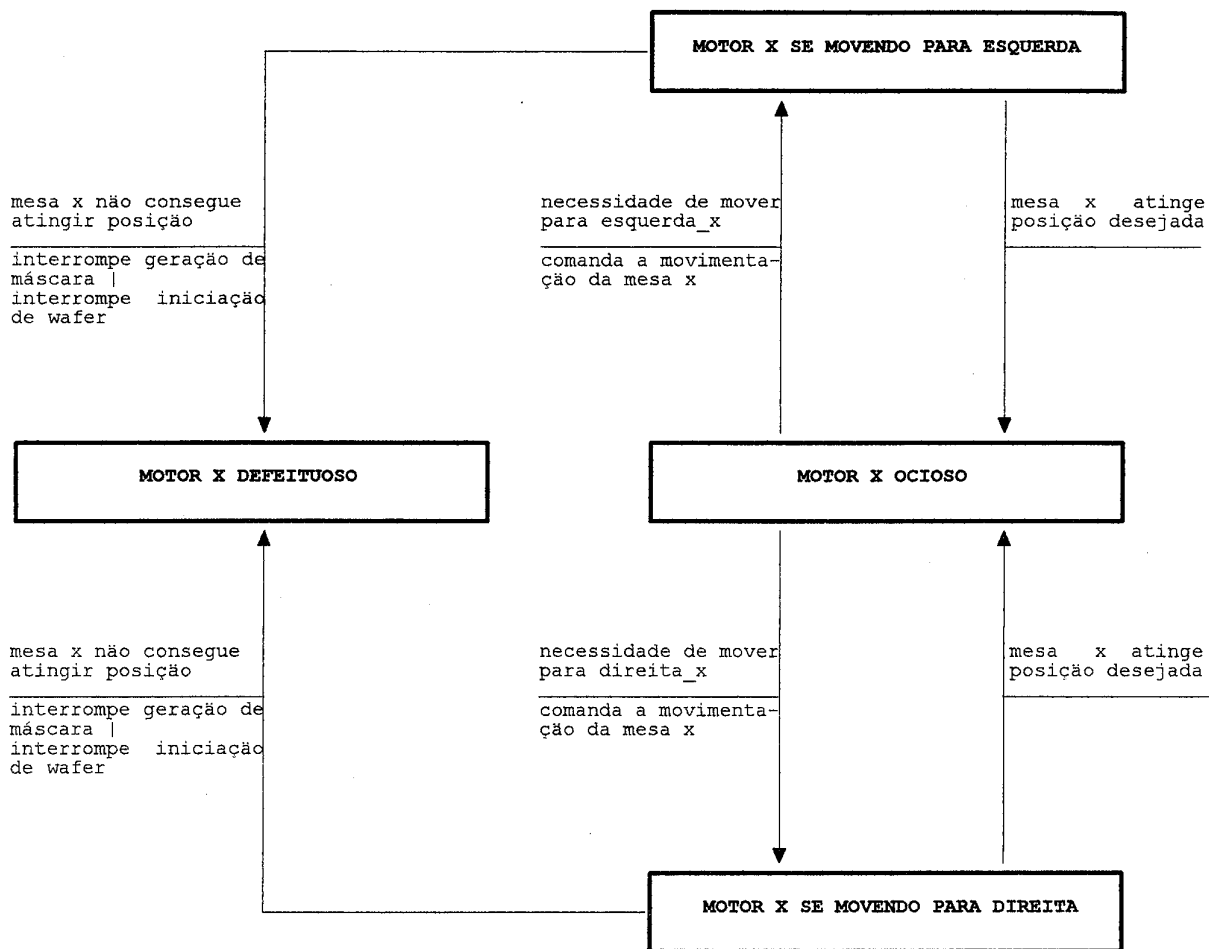
Controle de Obturador do Feixe

(Eventos Externos: 30,31)



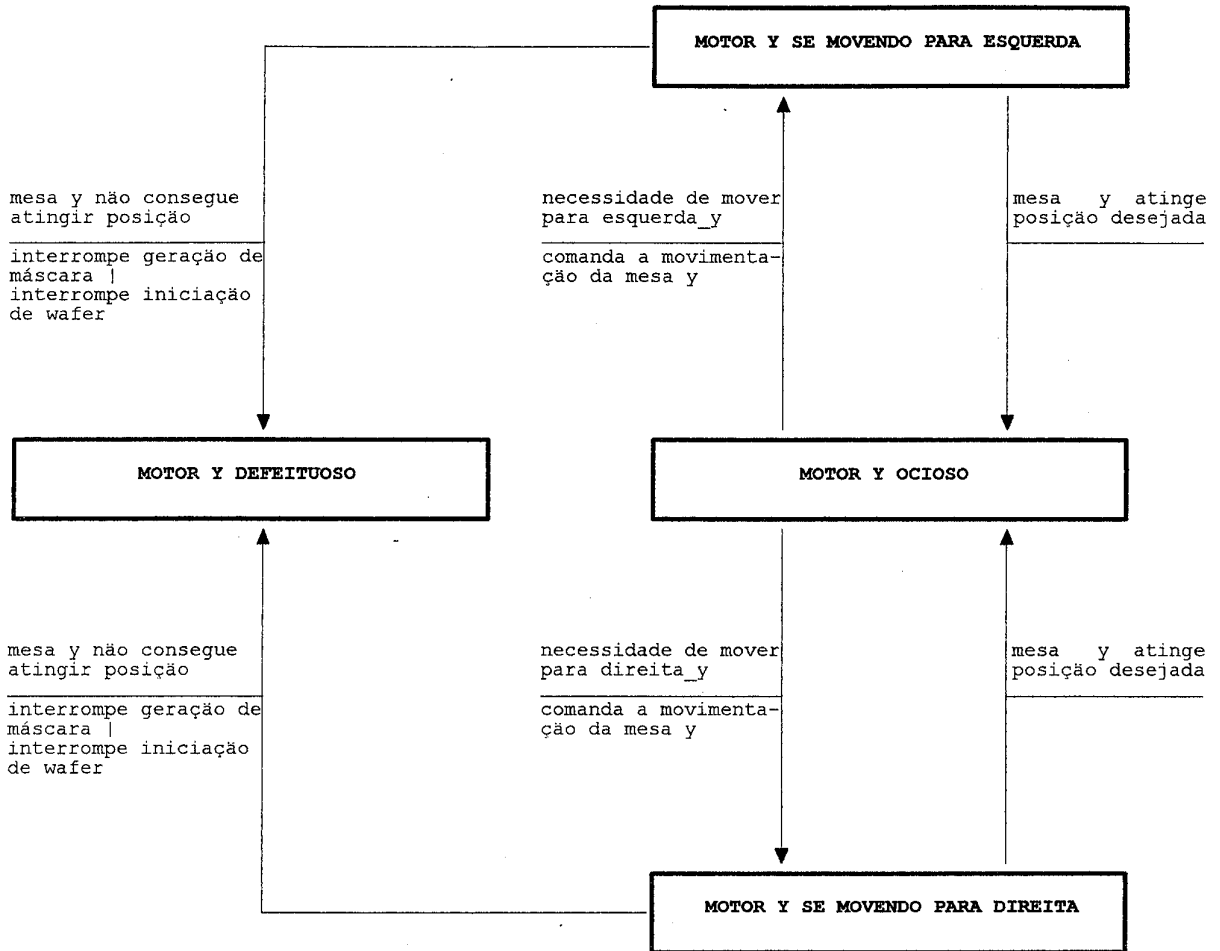
Controle de Movimentação da Mesa X

(Eventos Externos: 9,12,15 e 18)



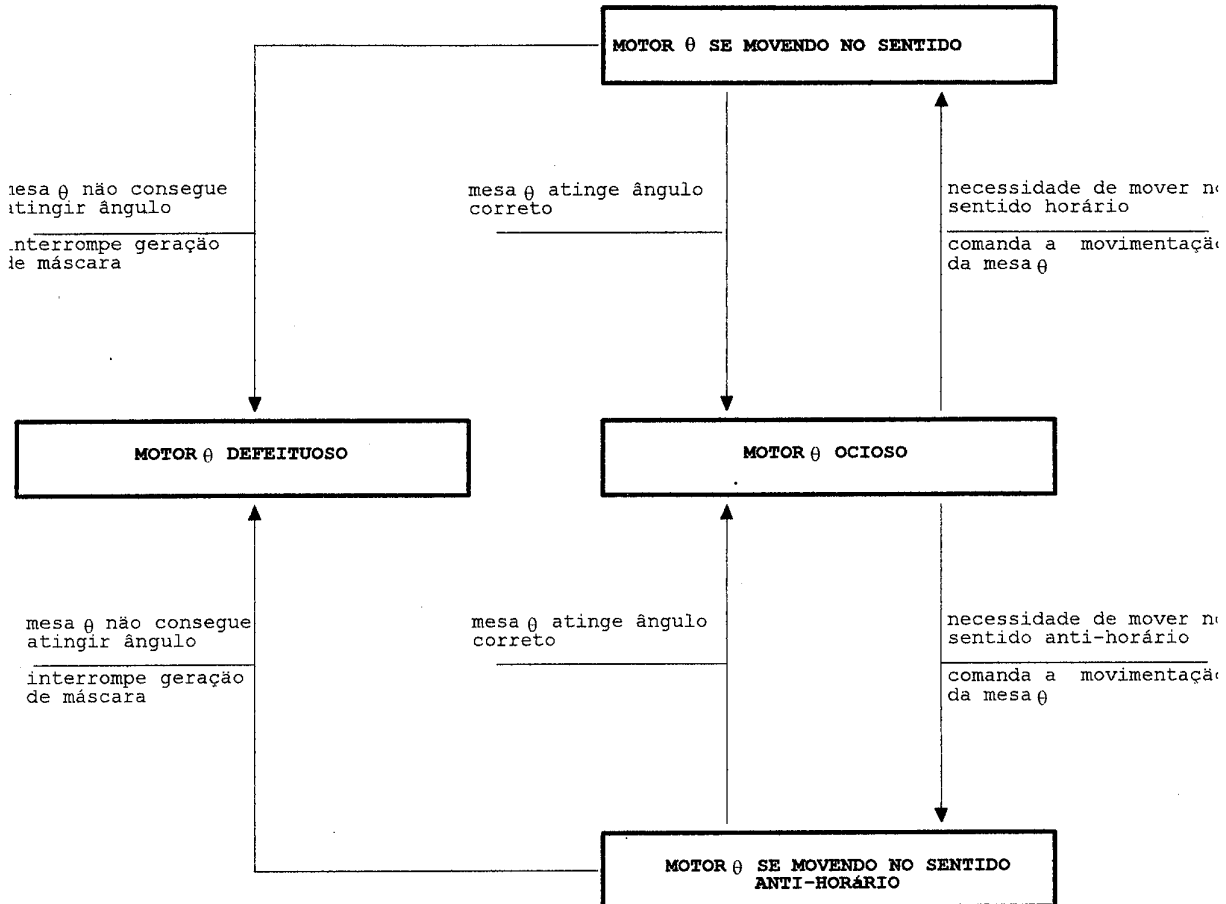
Controle de Movimentação da Mesa Y

(Eventos Externos: 10,13,16 e 19)



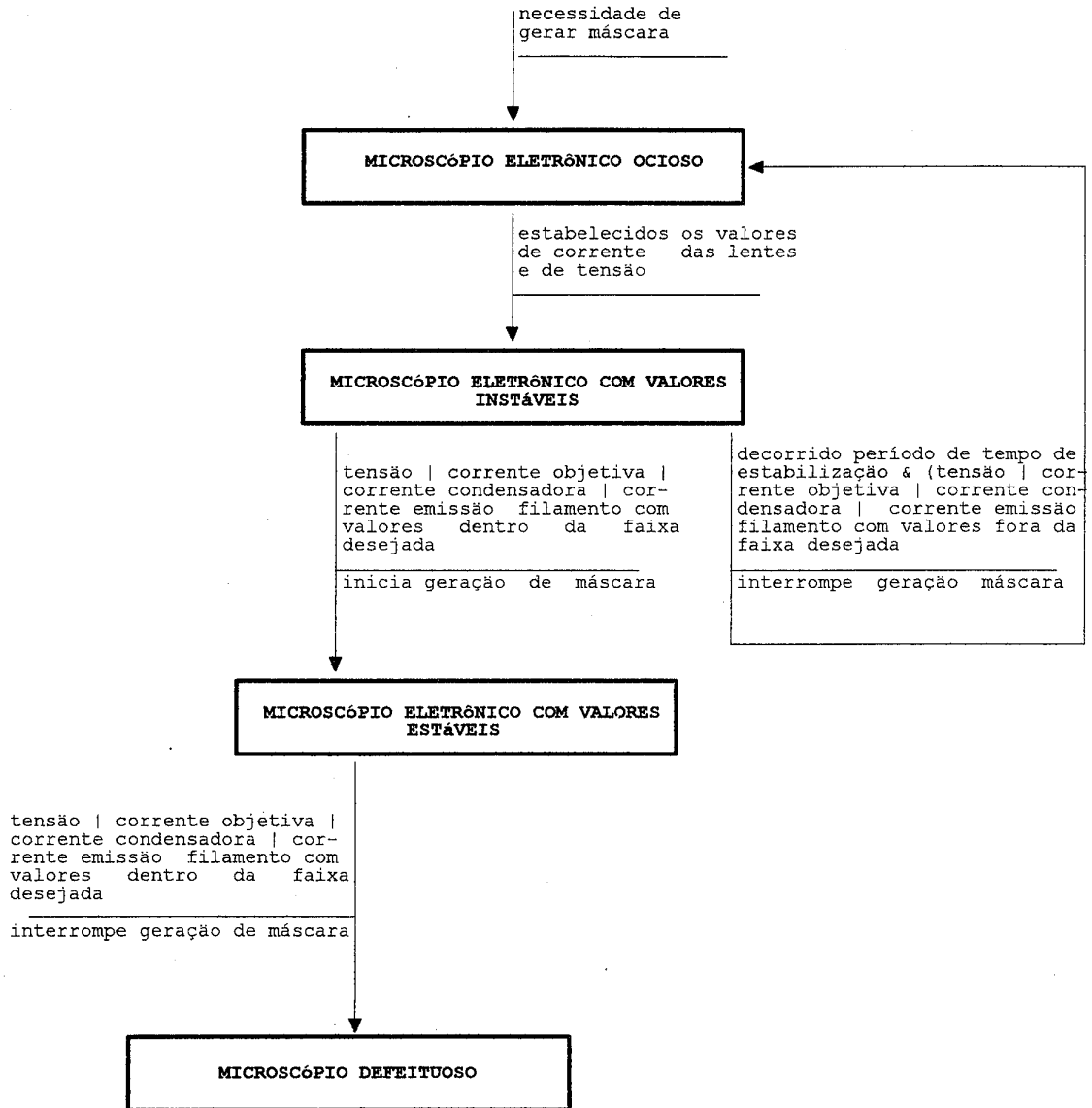
Controle de Movimentação da Mesa θ

(Eventos Externos: 11,14,17 e 20)



Monitoramento do Microscópio

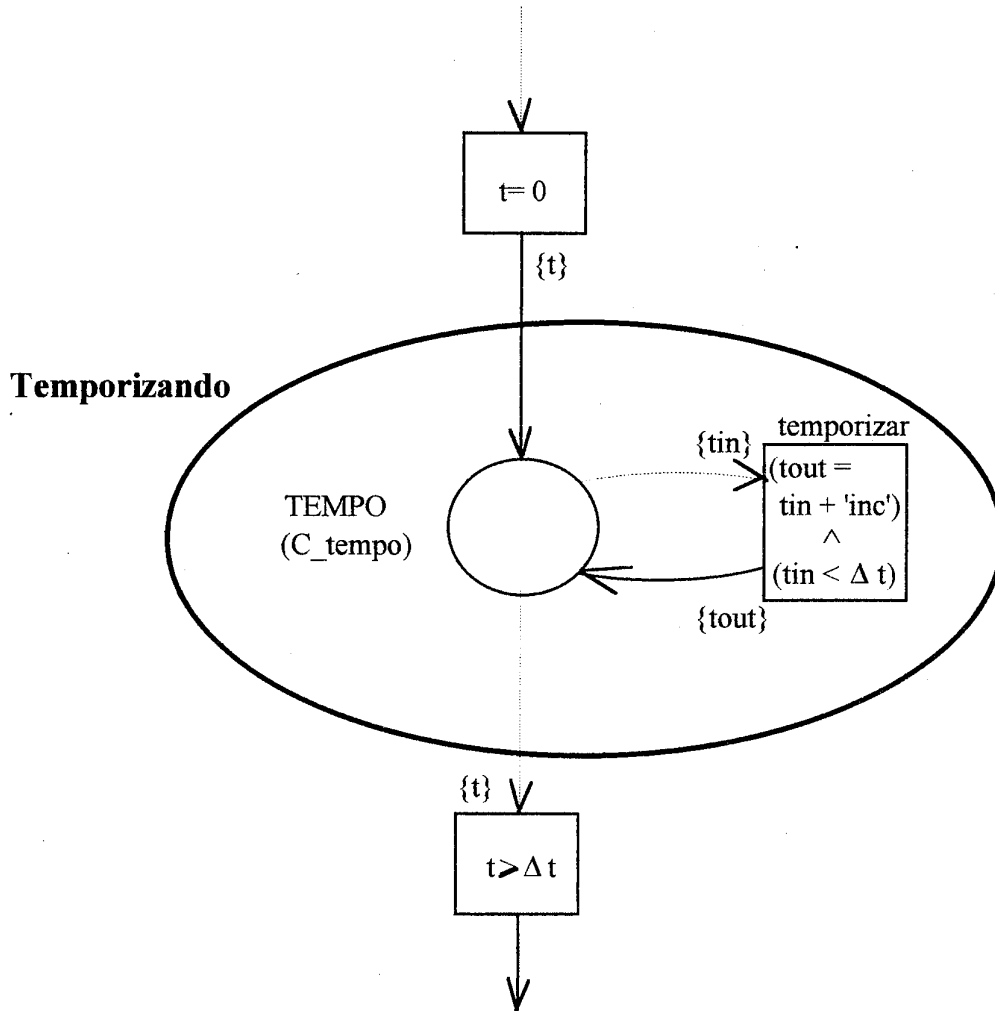
(Eventos Externos: 21,22,23,24,25,26,27,28, e 29)



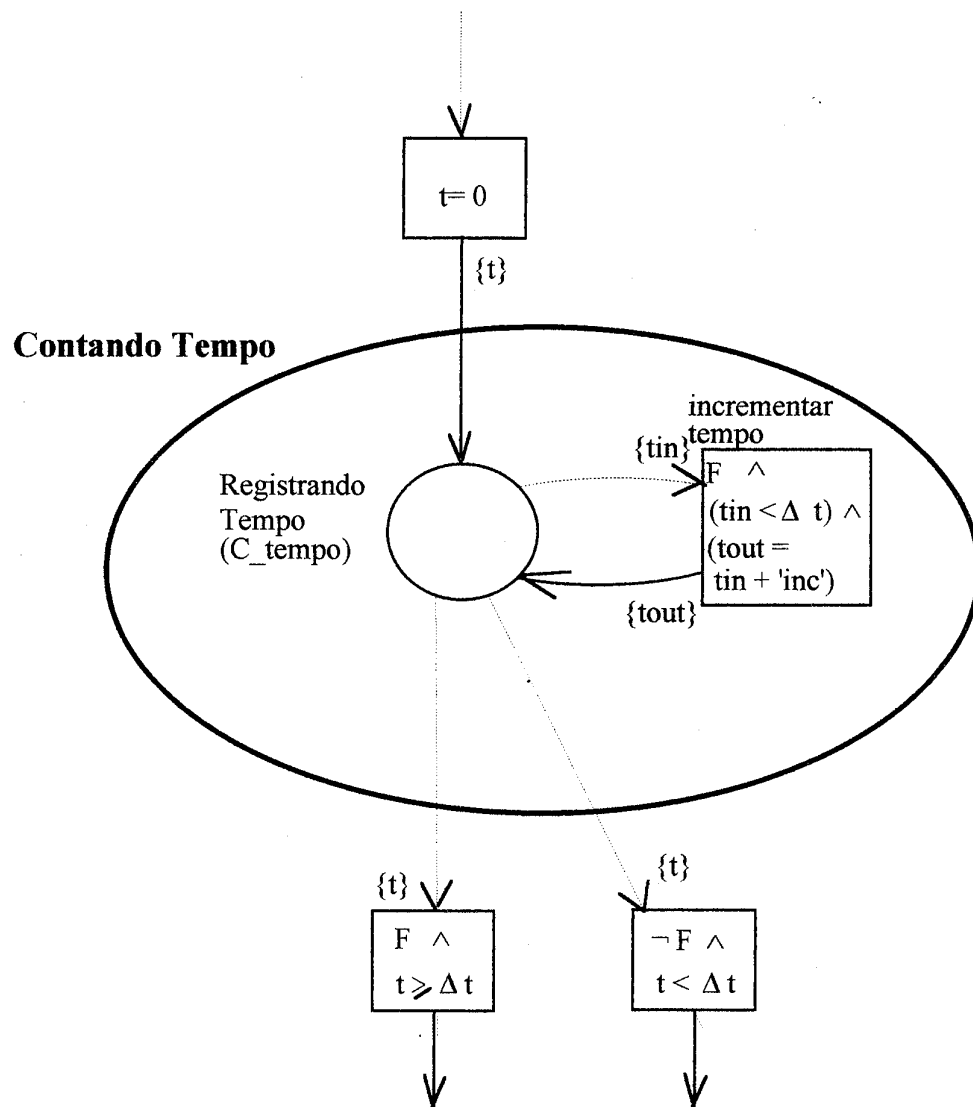
2.2.3.2. Versão utilizando Redes de Petri Estendidas

(ver Anexo B - Redes de Petri: Ramo Determinante e outras Extensões de Notação)

2.2.3.2.2. Temporizador ("Timer")



2.2.3.2.3. Relógio



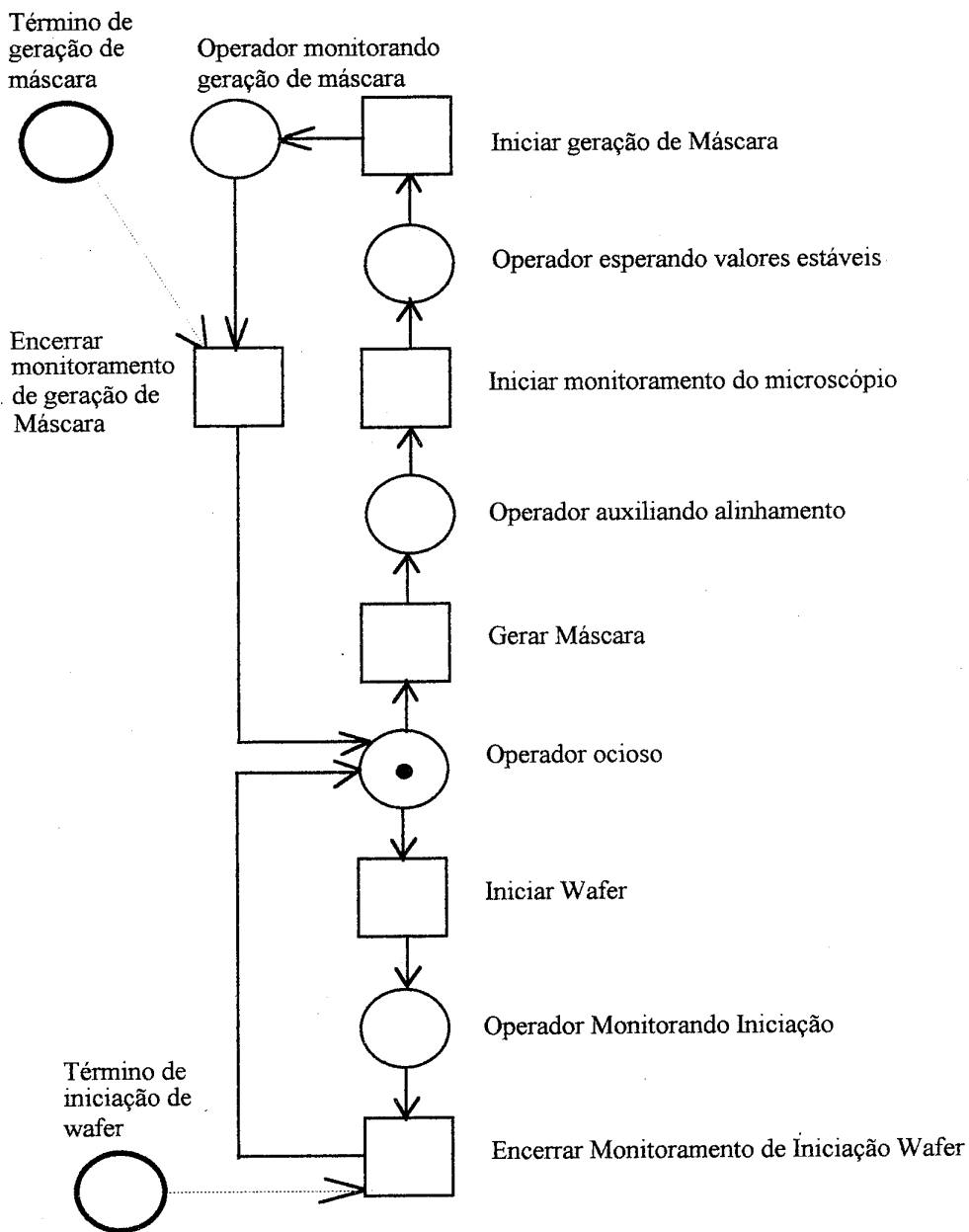
Onde F é a fórmula empregada nas conexões que explicitam a necessidade de uma temporização ("time-out").

2.2.3.2.4 Modelagem por Redes de Petri

Geração de Wafer

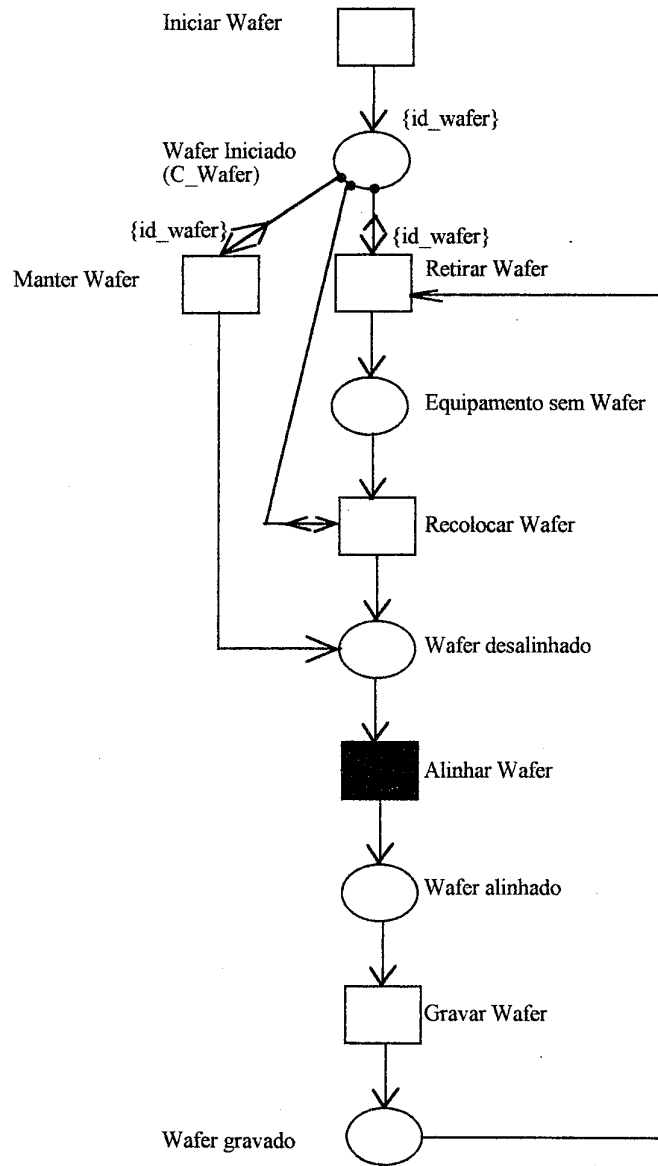
Sob o ponto de vista do Operador

(Eventos Externos: 1, 2)



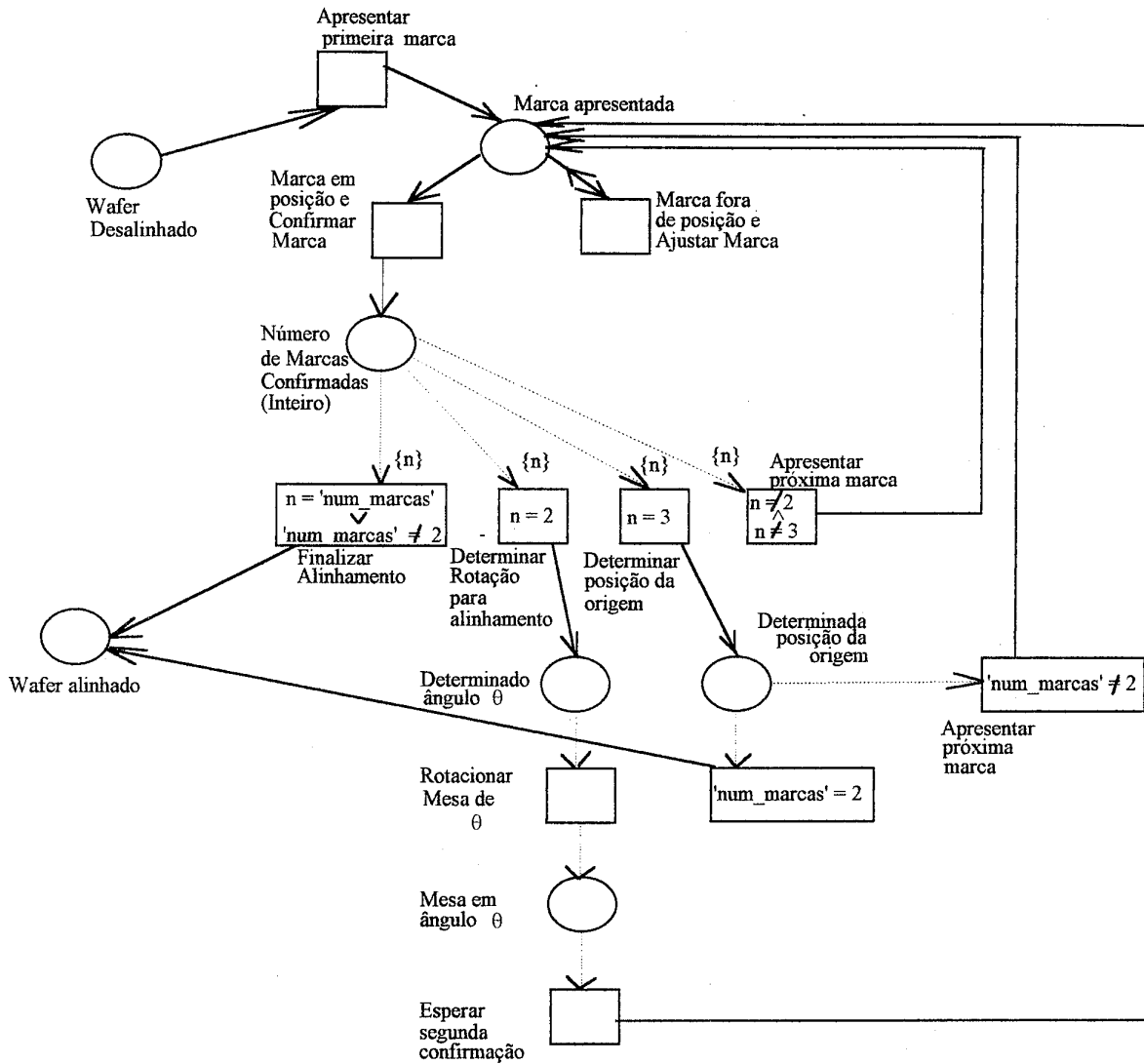
Geração de Wafer - Versão Simplificada

(Eventos Externos: 1 e 2)



Alinhamento de Wafer

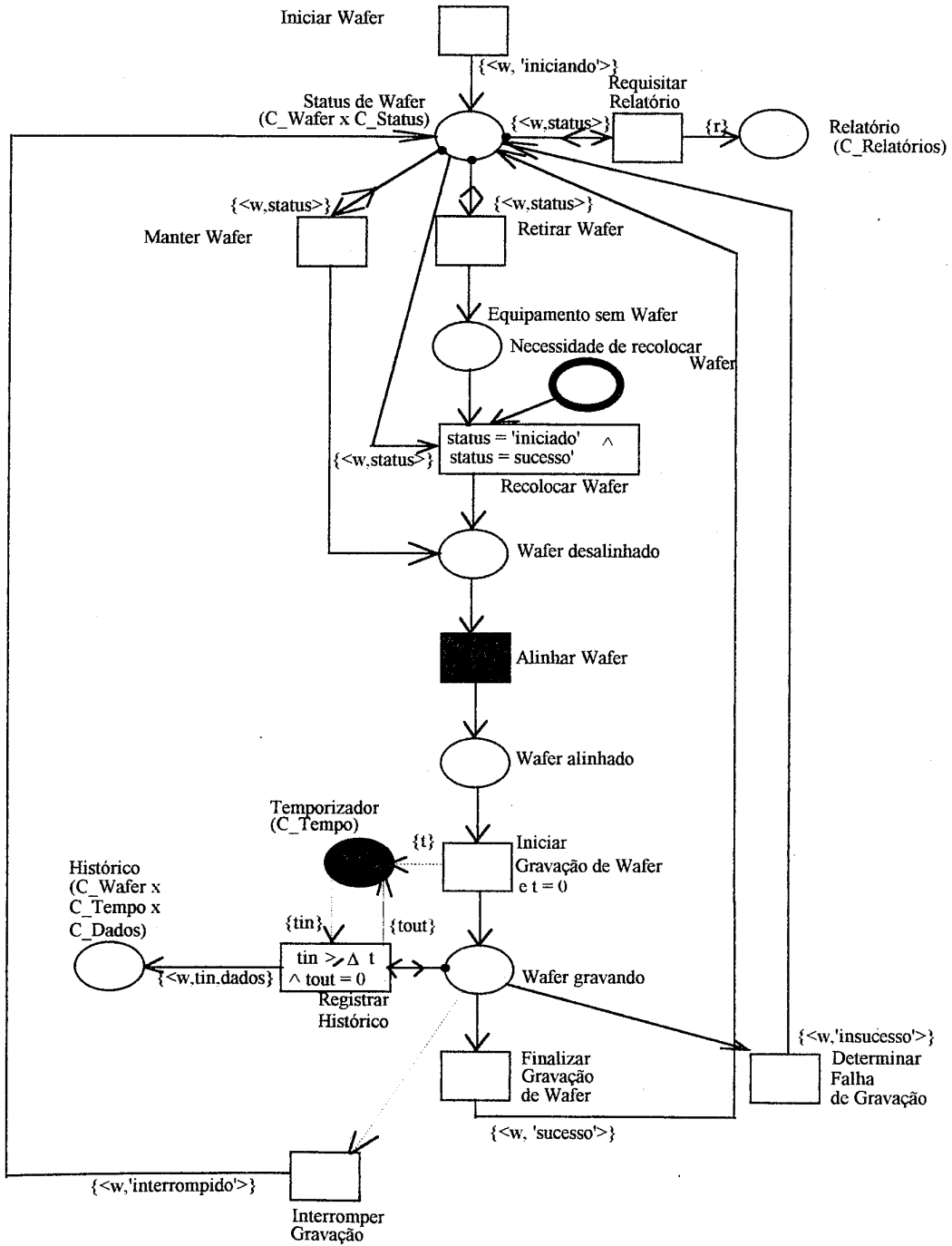
(Eventos Externos: 3, 4 e 5)



“num_marcas” representa o número de marcas de alinhamento gravadas na iniciação do wafer.

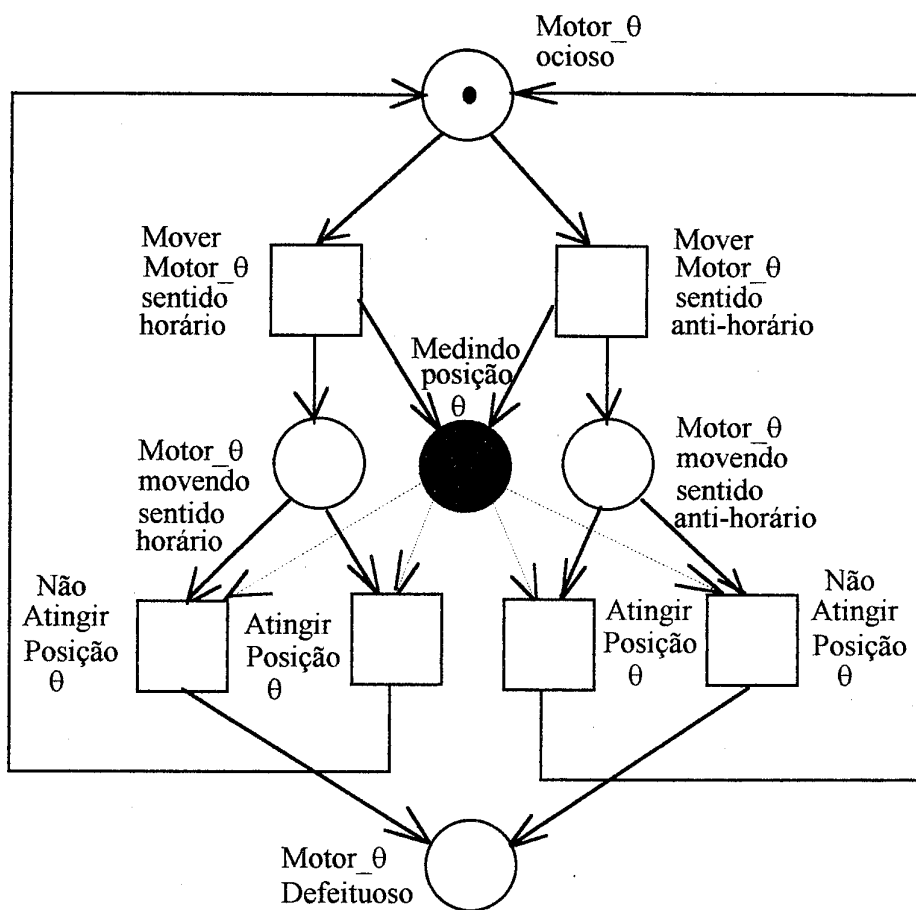
Geração de Wafer

(Eventos Externos: 1, 2, 6, 7 e 8)

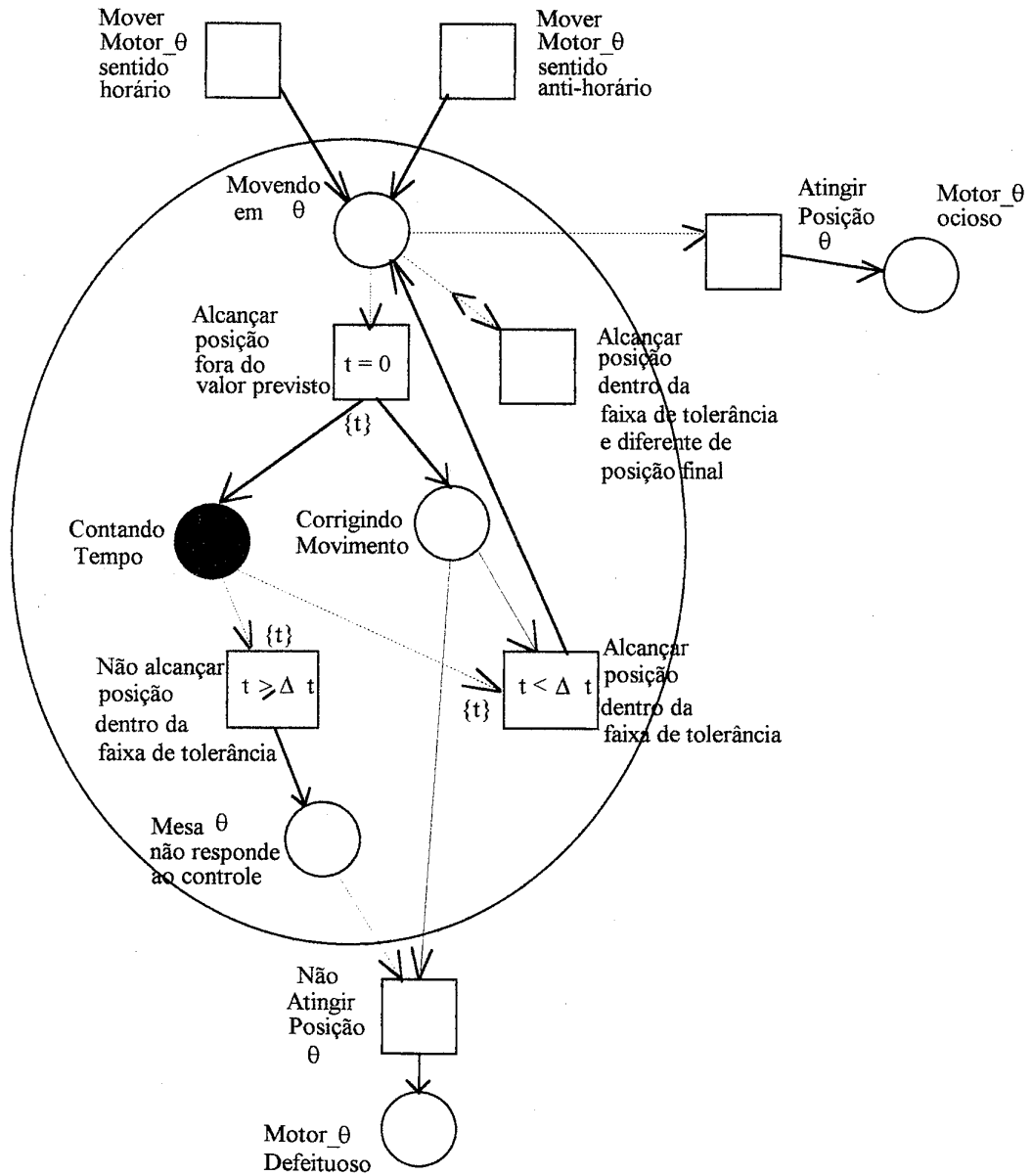


Movimentação da Mesa θ

(Eventos Externos: 11, 14, 17 e 20)

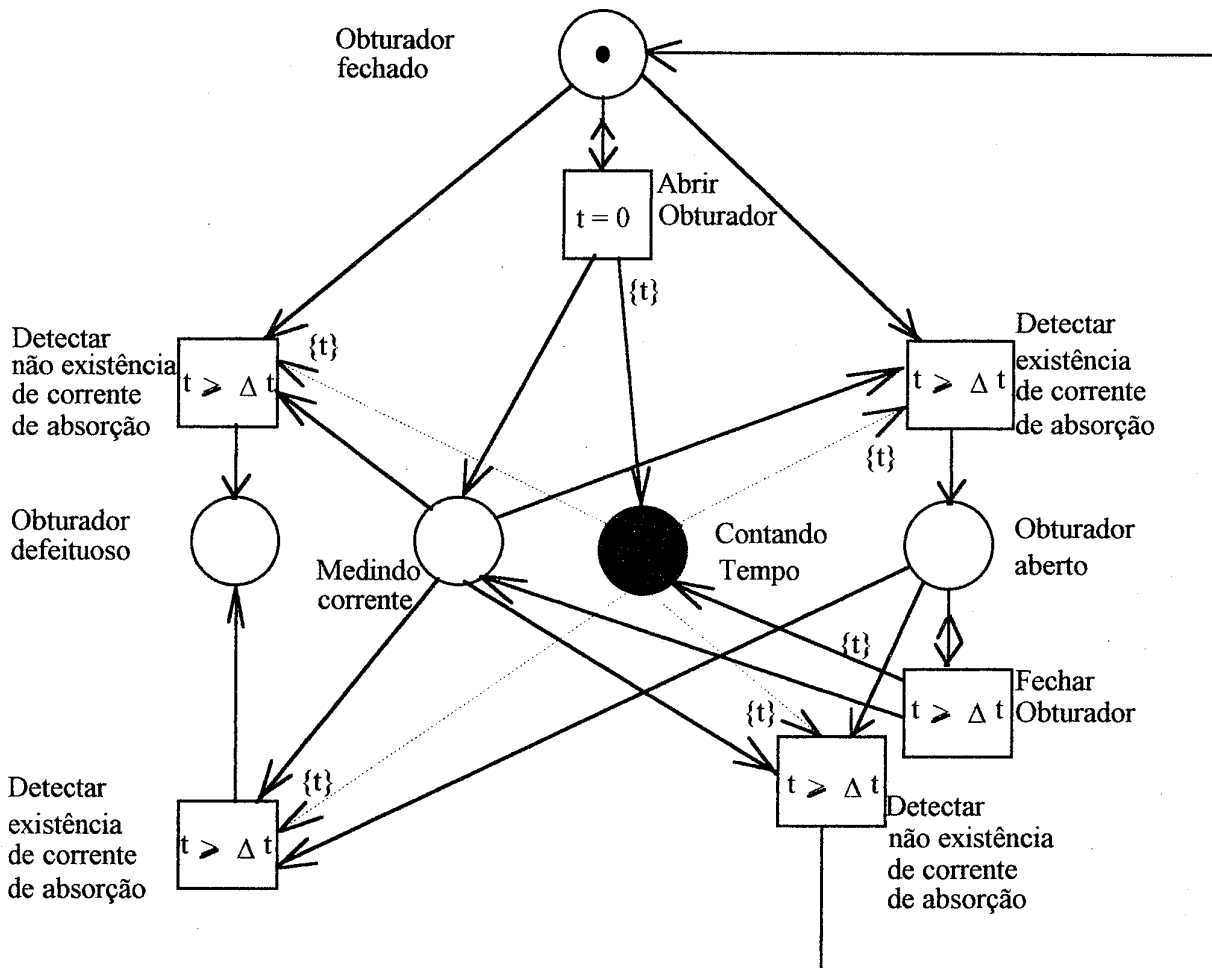


Medindo posição θ



Ação de Obturador do Feixe

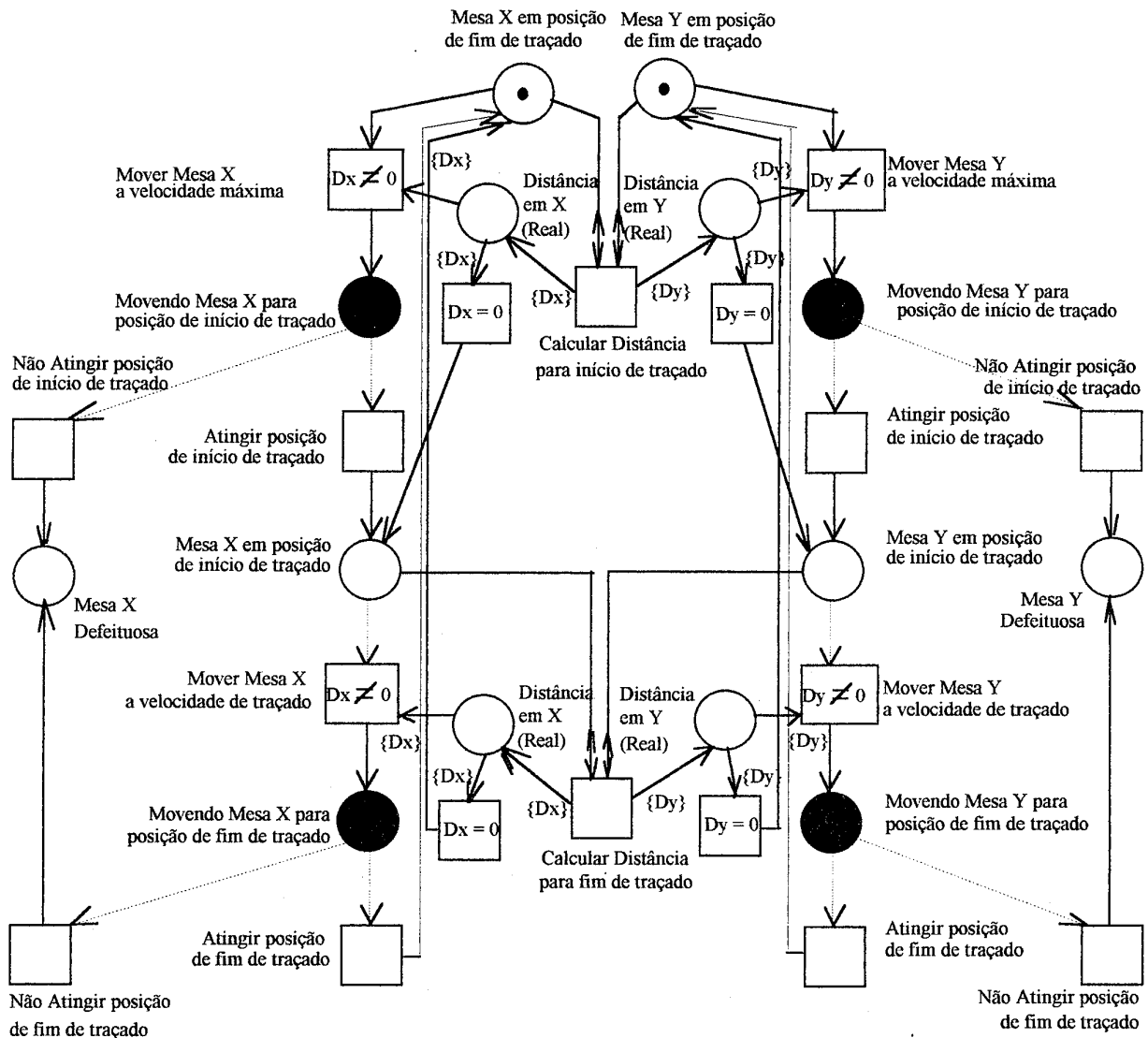
(Eventos Externos: 30 e 31)



Execução de Traçado

(Eventos Externos: Mesa X - 9, 12, 15 e 18

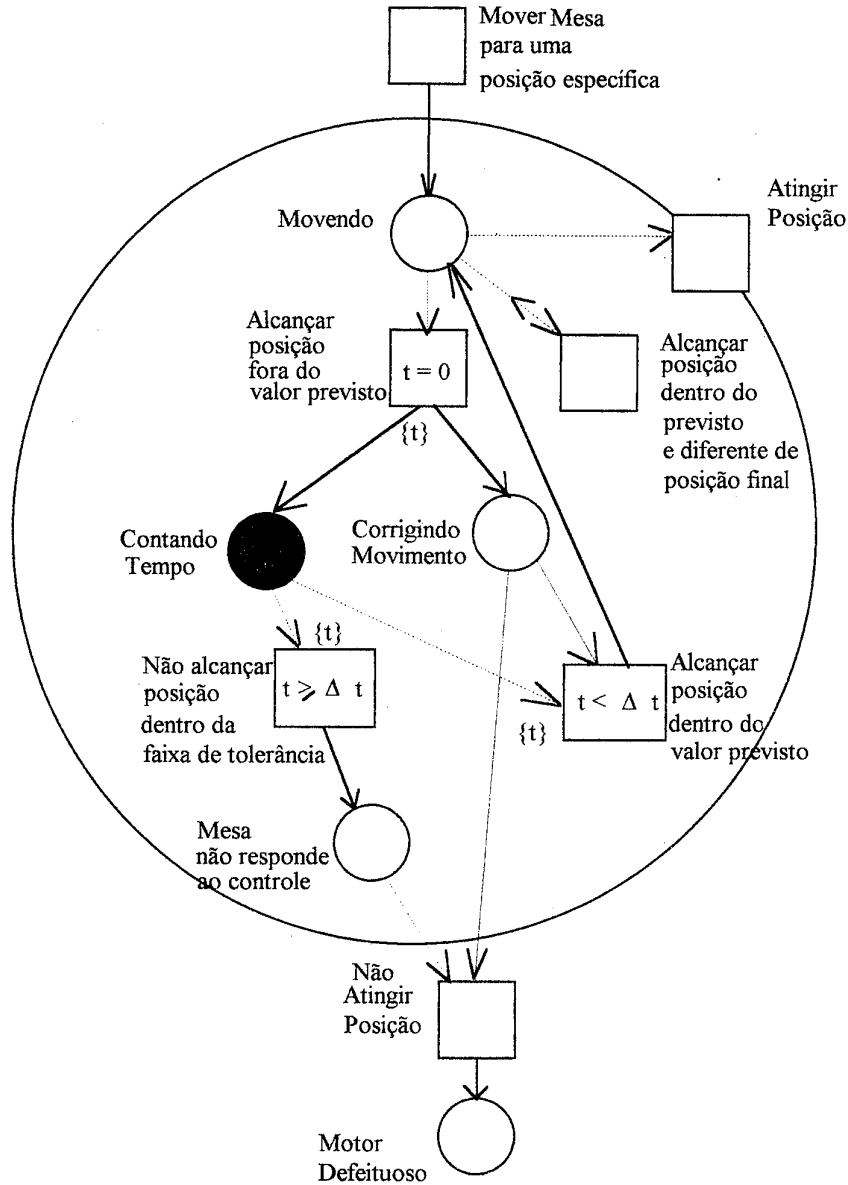
Mesa Y - 10, 13, 16 e 19)



Movimento da Mesa para uma dada posição

(Eventos Externos: Mesa X - 9, 12, 15 e 18

Mesa Y - 10, 13, 16 e 19)



Funcionamento de Microscópio

(Eventos Externos: 21,22,23,24,25,26,27,28 e 29)

